

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Schlussbericht

## **EnOB: plus-EQ-Net\_II**

### **Netzneutrales Wohn- und Geschäftshaus puls<sup>G</sup> in Geretsried – Monitoringphase –**

#### **Gemeinsamer Schlussbericht aller Verbundpartner**

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Akronym:           | +EQ-Net II |
| Förderkennzeichen: | 03EN1046A  |
| Laufzeitbeginn:    | 01.08.2021 |
| Laufzeitende:      | 31.07.2024 |

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

## Übersicht projektbeteiligter Unternehmen und Institute



### **Assmann Beraten + Planen GmbH**

Teilvorhaben: Monitoring und Qualitätssicherung  
Förderkennzeichen: 03EN1046A



### **Hochschule München**

Teilvorhaben: BuildingXModeling  
Förderkennzeichen: 03EN1046B



### **Technische Hochschule Nürnberg** Institut für Energie und Gebäude (ieg)

Teilvorhaben: Umsetzung Betriebsoptimierung  
Förderkennzeichen: 03EN1046C



### **EREA-Projekt GmbH & Co. KG**

Teilvorhaben: Betriebsoptimierung  
Förderkennzeichen: 03EN1046D

# INHALTSVERZEICHNIS

|       |                                                                       |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| I.1   | Aufgabenstellung .....                                                | 1   |
| I.2   | Voraussetzungen für das Vorhaben.....                                 | 1   |
| I.3   | Planung und Ablauf des Vorhabens.....                                 | 1   |
| I.4   | Wissenschaftlicher und technischer Stand.....                         | 2   |
| 4.1   | Betriebsoptimierung multivalenter Anlagentechnik.....                 | 2   |
| 4.2   | Oberflächennaheste Geothermie über Großkollektoranlagen .....         | 3   |
| 4.3   | Gebäudeautomation und smart Building .....                            | 4   |
| 4.4   | Energieverbrauchsdaten.....                                           | 4   |
| 4.5   | Digitales Bauen und Planen.....                                       | 5   |
| I.5   | Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....                              | 6   |
| II.1  | Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse..... | 7   |
| 1.1   | Vorhabensziele.....                                                   | 7   |
| 1.1.1 | Grundlegende Zieldefinition .....                                     | 7   |
| 1.1.2 | Sektorale Zielbeschreibung .....                                      | 7   |
| 1.2   | Dokumentation der erreichten Ergebnisse .....                         | 9   |
| 1.2.1 | AP1 – Monitoring und Qualitätssicherung .....                         | 9   |
| 1.2.2 | AP2 – Betriebsoptimierung .....                                       | 37  |
| 1.2.3 | AP3 – BuildingXModeling .....                                         | 95  |
| 1.2.4 | AP4 – Geothermie .....                                                | 193 |
| 1.2.5 | AP5 – Projektkoordination .....                                       | 245 |
| II.2  | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....               | 246 |
| II.3  | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....          | 247 |
| II.4  | Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....      | 248 |
| 4.1   | Wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....                               | 248 |
| 4.2   | Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten .....              | 248 |
| 4.3   | Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....         | 248 |
| II.5  | Fortschritt Dritter während der Laufzeit.....                         | 248 |
| II.6  | Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse .....           | 249 |
| 6.1   | Konferenzbeiträge .....                                               | 249 |
| 6.2   | Posterbeiträge .....                                                  | 249 |
| 6.3   | Veröffentlichungen.....                                               | 250 |

|                                                |                                                                                                                     |            |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| III.1                                          | Beitrag zu den förderpolitischen Zielen .....                                                                       | 251        |
| III.2                                          | Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens / erreichte Nebenergebnisse<br>/ wesentliche Erfahrungen ..... | 252        |
| III.3                                          | Fortschreibung des Verwertungsplans.....                                                                            | 253        |
| III.4                                          | Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....                                                                   | 253        |
| III.5                                          | Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer der Projektergebnisse .....                                          | 253        |
| III.6                                          | Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung .....                                                                      | 253        |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>             |                                                                                                                     | <b>254</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>               |                                                                                                                     | <b>262</b> |
| <b>Anlagenverzeichnis.....</b>                 |                                                                                                                     | <b>264</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>              |                                                                                                                     | <b>279</b> |
| <b>Liste der verwendeten Abkürzungen .....</b> |                                                                                                                     | <b>281</b> |



# **I. Kurzdarstellung**

## **I.1 Aufgabenstellung**

Das im vorangegangenen Forschungsvorhaben +EQ-Net (FKZ: 03ET1299) unter wissenschaftlicher Begleitung errichtete Wohn- und Geschäftsgebäude puls<sup>G</sup> im Zentrum der Stadt Geretsried adressierte eine möglichst ökonomisch und ökologisch optimale Betriebsweise seiner multivalenten Anlagentechnik als auch im Hinblick auf die Energieversorgung Gesichtspunkte wie Netzneutralität, Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch, hybride Wärmeerzeugung sowie Power-to-Heat. Aufgrund von Bauverzögerungen knüpft das Forschungsvorhaben +EQ-Net II thematisch daran an. Fokus liegt auf einer optimierten Betriebsweise der multivalenten Anlagentechnik in der Energiezentrale, indem Verbesserungsmaßnahmen aus der Analyse der Anlagentechnik sowie anhand der Messdaten aus dem umfangreichen wissenschaftlichen Monitoring abgeleitet werden. Eine weitere Thematik ist eine Weiterentwicklung der thermischen Einbindung des geothermischen Systems unterhalb der Bodenplatte des Gebäudes, wodurch weitere regenerative Potenziale zu heben sind.

## **I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben**

Basis für die Umsetzung des nachfolgend beschriebenen Forschungsvorhabens ist das vorangegangene Projekt +EQ-Net, wodurch die Errichtung des Gebäudes als auch der Einbau der Anlagentechnik wissenschaftlich begleitet wurde. Eine umfangreiche wissenschaftliche Messtechnik für ein Langzeitmonitoring ist eingebaut worden. Eine gleichzeitig gestartete Messdatenbank garantiert eine hohe Messauflösung, wodurch in +EQ-Net II direkt, ohne weitere Vorarbeiten mit der Bearbeitung der Arbeitspakete begonnen werden kann.

Eine weitere Triebfeder, welche den Projektansatz in das Interesse der Forschung rückt, ist das Bestreben zum Einsatz einer möglichst hohen regenerativen Deckung bei der Energieversorgung und die damit einhergehende Verdrängung fossiler Brennstoffe.

## **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben gliedert sich in fünf Hauptarbeitspakete, welche durch das Projektkonsortium bearbeitet wurden:

- AP1 Monitoring und Qualitätssicherung
- AP2 Betriebsoptimierung
- AP3 BuildingXModeling
- AP4 Geothermie
- AP5 Projektkoordination

Die Interaktion der Partner und der notwendige Austausch von Informationen zwischen Projektpartnern und (Unter-)Arbeitspaketen wurde durch Assmann im Rahmen des AP5 sichergestellt.

Im Rahmen der Projektdurchführung mussten naturgemäß marginale Anpassungen des Arbeitsplans und der Kostenstruktur (Mittelumwidmung) vorgenommen werden. Diese Anpassungen wurden durch die Projektpartner beschrieben, durch die Projektleitung an den Projektträger kommuniziert und gemeinsam umgesetzt. Die Ziele der von der Technischen Hochschule Nürnberg (THN) verantworteten Arbeitspakete wurden erreicht.

## **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

### **4.1 Betriebsoptimierung multivalenter Anlagentechnik**

Das Themengebiet der Betriebsoptimierung wird in der Literatur vorrangig aus Sicht eines optimal hydraulisch umgesetzten Systems betrachtet, sodass mithilfe heutiger computergestützter Technologien Regelstrategien erarbeitet werden können. Fokus der zugehörigen Arbeiten liegt dabei auf der modellprädiktiven Regelung. Mithilfe einer modellhaften Abbildung beispielsweise einer Anlage oder weitergeführt einer komplexen Gebäudephysik können Regelstrategien anhand gewisser Parameter wie Wetterdaten prognostiziert werden, sodass ein optimaler Anlagenfahrplan abgeleitet werden kann [1], [2], [3], [4]. Diese Strategien werden u.a. neben einer Steigerung der Energieeffizienz hinsichtlich eines verbesserten Komforts erweitert [5].

Abseits eines modellprädiktiven Lösungsansatzes existiert als ein weiterer wichtiger Vertreter zur Regelung Verschaltungsvarianten die agentenbasierte Regelung. Mithilfe dieser Technologie treffen nahezu autonom agierende Agenten eigene Entscheidungen, indem sie den Ist-Zustand analysieren. Jeder Agent bildet dabei beispielsweise eine Komponente einer komplexen Verschaltung ab. Die Agenten können untereinander Informationen austauschen als auch über eine übergeordnete Ebene Befehle empfangen, die wiederum ihre jeweilige Entscheidung beeinflusst [6]. Diese Möglichkeit wird sehr erfolgreich zur Abbildung komplexer Umgebungen wie Wirtschaft, Infrastruktur oder auch innerhalb der Energiebranche genutzt. In letzter Zeit gab es hierzu auch Lösungen für eine erfolgreiche Implementierung in der Gebäudetechnik zur Steuerung raumluftechnischer Anlagen [7].

Ein weiterer Ansatz, der auch im Forschungsvorhaben adressiert wird, ist die Entwicklung eines Reglers auf Basis der Fuzzy-Logik. Mithilfe dieser Technologie ist es mit umgangssprachlichen Begriffen möglich, Systemgrenzen, ohne den Bedarf einer scharfen Abgrenzung, zu definieren [8]. Komplexe mathematische Vorgänge, die einen hohen zeitlichen als auch finanziellen Aufwand in ihrer Umsetzung haben, können durch Zugehörigkeitsfunktionen abgebildet werden bei einer gleichzeitig hohen Zuverlässigkeit.

Dennoch kann in der Realität oftmals nicht ein optimal hydraulisches System in der Gebäudetechnik garantiert werden. Viele Akteure in der Planungs-, Bau- und Inbetriebnahmephase erhöhen das Risiko auf ungleichmäßig oder falsch eingestellten Ventilstellungen. Auch die Betriebsparameter der Anlagentechnik können noch auf Werkseinstellung stehen. Erkenntnisse

hinsichtlich weiterer Potenziale einer vermeintlich richtig ausgeführten Anlagentechnik mit optimal eingestellten Ventilen konnten in Abschlussarbeiten aufgezeigt werden [9], [10]. Auch ein Whitepaper der Begleitforschung Energiewendebauen zeigt auf, dass bereits kleinere, weniger komplexe Maßnahmen oder die Überprüfung der bestehenden Anlagenparameter auf einem low-tech Ansatz erhebliche Energieeffizienzsteigerungen hervorrufen können, ohne dass eine anspruchsvolle, hochtechnisierte Lösung nötig ist [11].

Die Potenziale zur Energieeffizienzsteigerung aus der Analyse der Anlagentechnik sollen abgeleitet werden, indem die Inbetriebnahme kontrolliert wird. Mögliche Verbesserungsmaßnahmen sind umzusetzen und deren Wirkung zu analysieren. Aus diesen Erkenntnissen sind Handlungsempfehlungen für einen optimierten Anlagenbetrieb auf einem gering-technologischen Ansatz zu transferieren. Auch eine erste Umsetzung eines optimierten Anlagenbetriebs über einen auf Basis der Fuzzy-Logik entwickelten Regler ist zu thematisieren.

## 4.2 Oberflächennahe Geothermie über Großkollektoranlagen

Mit der oberflächennahen Geothermie werden Erdwärmesysteme beschrieben, welche hauptsächlich die durch das Klima ins Erdreich eingeführte Wärmeenergie nutzen [12], [13] und nicht die in tiefen Erdschichten gespeicherte Wärmeenergie. Oberflächennahe Geothermiesysteme nutzen demnach das Quellwärmepotenzial in der obersten Erdschicht und beziehen sich auf alle geothermischen Anwendungen bis in eine Tiefe von 10 m bis 15 m [14], [15]. Während bei tieferen Systemen mit Erdwärmesonden, welche einige hundert bis tausend Meter tief reichen können, vor allem die Gesteinsschichten mit deren Wärmekapazität sowie der terrestrische Wärmestrom aus dem Erdinneren das Wärmeentzugspotenzial bestimmen, sind bei den oberflächennahen Systemen vor allem die vorherrschenden Bodenparameter des Oberbodens sowie die solare Einstrahlung ausschlaggebend [16], [17]. Wesentliche Faktoren zur Ertragsleistung des Systems sind die hydraulischen Bodeneigenschaften und der sich dem Klima bedingt einstellende und stark variierende Bodenfeuchtegehalt. Die Vegetation beeinflusst über die Transpiration die Bodenfeuchte zusätzlich [18]. Auch sind die Art der Verlegung und Abstand der Kollektoren wichtige Faktoren der Auslegung [18].

Die Planung von oberflächennahen Erdwärmekollektoranlagen erfordert die Kenntnis spezifischer und teils komplexer Berechnungsverfahren, für die die derzeitige gültige VDI 4640-2 nur begrenzt ausreichend ist [19]. Untersuchungen abgeschlossener und laufender Forschungsvorhaben zeigen, dass die Leistungsfähigkeit von Erdwärmekollektoranlagen und vor allem die von GKA meistens die in der Richtlinie festgelegten Werte übertrifft [20], [21], [22]. Derzeit laufende Forschungsvorhaben wie KNW-Opt (FKZ: 03EN3020), MultiSource (FKZ: 03EN3057), ErdEis III (FKZ: 03EN3068) liefern infolgedessen bereits neue Erkenntnisse zur Berechnung der Leistungsfähigkeit für die effiziente Nutzung von Umweltwärme im großskaligen Maßstab einschließlich der Potenzialerschließung durch die Vereisung [23], [24].

Bislang wird Umweltwärme bei oberflächennaher Geothermie im Temperaturbereich zwischen 10 °C und 0 °C genutzt. Über den großflächigen Wärmeentzug unter einem Wohngebäude, wodurch die klimabedingte Regeneration nicht stattfinden kann, gibt es aktuell noch keine/sehr wenige Erkenntnisse. Dies ist ein neues Forschungsfeld, das grundlegender Untersuchungen bedarf. Erste Betrachtungen mit Erdwärmekollektoren vereinzelt unter einer Garage und einem Einfamilienhaus wurden im bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben „+Eins“ (FKZ: 0327431R) durchgeführt.

Die Bewertung im größeren Maßstab im Rahmen eines wissenschaftlichen Monitorings stellt somit einen neuartigen Ansatz in Forschung und Entwicklung dar. Die Machbarkeit als auch mögliche Potenziale sind an diesem Gebäude mit Mischnutzung zu zeigen.

### 4.3 Gebäudeautomation und smart Building

Die Gebäudeautomation im klassischen Sinne der VDI 3814 sowie der Planungsleistung der Errichtung des Gebäudes nach der HOAI betrachtet nicht in einem ausreichenden Maße die während des Betriebs benötigten Energiemengen, da diese für den Gebäudebetrieb zwar relevant sind, jedoch einen planerischen Zusatzaufwand erfordern, welcher nicht immer gewünscht oder vergütet wird.

Die Umsetzung der Energetischen Anforderungen des am 16. Oktober 2023 zuletzt geänderten Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GEG) müssen neben den allgemeinen baulichen Parametern, wie z.B. 65 % erneuerbare Anteil, der zur Heizung oder durch Nutzung von unvermeidbarer Abwärme wird, hierbei um die zwingende Nutzung der Gebäudeautomation erweitert. Dabei müssen die Energieverbrauchsmengen in Nichtwohngebäuden ab einer Nennleistung von 290 kW der Heizungsanlage oder Lüftungsanlage gemäß §71a des GEG erfasst, visualisiert und einem Energiemanager zur Verfügung gestellt werden.

Diese Planung und Ausführung der technischen Anlagen ist jedoch nur insoweit förderliche für die energiepolitischen Ziele, in derer auch eine Umsetzung und Prüfung der Ausführung der geplanten Parameter auf Basis mehrerer Funktionstests erfolgt. Die Planung der Anlagen nach VDI 3814, welche eine Grundleistung der Planung darstellt, ist daher im Rahmen mehrerer Inbetriebnahmen überprüft und die Ausführung validiert werden. Die zugrundeliegende Norm VDI 6039, welche mehrere Arten des Inbetriebnahmemanagements beispielsweise Langzeit- und Kurzzeitmonitoring ausweist, stellt hier eine Basis dar, welche jedoch nicht standardmäßig umgesetzt wird. Diese bildet darüber hinaus auch einen Umfang ab, welcher über den in den gesetzlichen Grundlagen nicht explizit gefordert ist und über diesen weit hinausgeht. Speziell sind die komplexen technischen Anlagen, welche mehrere Sektoren koppeln, welche auch im Projekt +EQ-Net II zum Einsatz gekommen sind, nicht Teil einer Investitionsminimierenden Planung. Das Monitoringsystem, muss daher, wie im Antrag bereits beschrieben ein grundlegender Bestandteil einer Planung der Gebäudetechnik sein, um hier auch die Verbräuche und im Speziellen auch Verluste den entsprechenden Nutzern zu visualisieren.

Aus diesem Grund ist es wichtig die Gebäudeautomation als solches nicht nur rein als Planungsaufgabe zu sehen sondern als ganzheitliche Aufgabe auch während des Gebäudebetriebs

### 4.4 Energieverbrauchsdaten

Der Gebäudebetrieb ist, wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert ein integraler Bestandteil der gesamtheitlichen Emissionen des Gebäudes. Dabei ist die Reduzierung der Residuallast durch simulative Prozesse eine weiterführende Untersuchung dieser Betrachtung. Dabei sollten neben dem Gebäudebetrieb auch die mögliche Reglungsparameter auf Basis

der bestehenden Anlagentechnik sowie der vorliegenden Verbrauchsdaten betrachtet und untersucht werden.

Das Hauptziel der Untersuchung bestand darin, die zentralen gebäudetechnischen Anlagen – einschließlich Wärmeerzeugung, Kälteerzeugung und Stromerzeugung – möglichst realitätsgetreu und im Detail zu ergänzen. Durch diese präzise Modellierung sollte der Betrieb der technischen Systeme besser nachvollziehbar werden, um deren Verhalten unter verschiedenen Bedingungen realistisch simulieren und bewerten zu können.

Im zweiten Schritt, der den Schwerpunkt der Simulationsstudie bildete, wurde die Regelung der einzelnen, im „Advanced Level“ abgebildeten Anlagenteile angepasst und optimiert. Dabei stand die Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Regelungsstrategien auf den Gebäudebetrieb im Fokus. Ziel war es, das Gebäudemodell so zu regeln, dass es nicht nur den Anforderungen des Gebäudebetriebs gerecht wird, sondern auch möglichst netzdienlich agiert. Um dies zu erreichen, wurden verschiedene Varianten von Regelungsstrategien entwickelt und simuliert. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Varianten sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse detailliert beschrieben und ausgewertet.

## 4.5 Digitales Bauen und Planen

Das digitale Planen und Bauen, wird in der Praxis über die Building Information Modeling-Methode (BIM) realisiert, was sich jedoch auf die Planung der Errichtung des Gebäudes beschränkt, und vernachlässigt die Betriebsoptimierung, während des Betriebs. Die BIM-Methodik nutzt dabei üblicherweise ein 3D-Modell, welches dann um Planungstechnische Parameter erweitert werden kann. Dieses rein konstruktiv erstellte Modell könnte dabei um die energetischen sowie regelungstechnischen Parameter erweitert oder mit den zugehörigen Simulationsprogrammen verknüpft werden. Üblicherweise wird diese Simulation als ein separates Werkzeug genutzt, welches nicht in das übergeordnete 3D-Modell oder in die zugehörige Datenbank rückgeführt wird. Dies ist in der Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Programmen zu begründen, welche nur teilweise eine Anbindung zu den geometrischen Daten des Modells ermöglichen. Durch die Nutzung mehrere Datenbanken und der nicht praxisnah genutzten Verknüpfung derer gehen dabei im Verlauf der Gebäudeplanung mehrere Daten verloren oder fließen nicht ausreichend in den Gebäudebetrieb ein. Diese Simulationsprogramme unterscheiden sich darüber hinaus in der Anwendung.

Darüber hinaus ist als Basis der Berechnung in den Planungsaufgaben von Neubauten oder größeren Modernisierungen auf Basis von normativ unterlegten Annahmen durchzuführen, da in der Regel keine Messdaten des Gebäudes vorliegen.

Aus diesem Grund ist es wichtig, dass zusätzlich zu der Verknüpfung der verschiedenen Gebäudedaten auch ein Einbezug von spezielleren Nutzerdaten erfolgt, welche als Basis der Berechnung für die Betrachtungen dienen. Die gängigen Regelwerke (DIN V 18599, VDI 2078, ...) stellen dabei eine Datenbasis dar, welche jedoch nicht für alle Nutzungsarten der Praxis mit abbildet.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit den Strukturen und Projektarbeitern innerhalb des +EQ-Net II-Konsortiums. Die Darstellung der Projektergebnisse und die damit einhergehende projektbegleitende Erfolgskontrolle wurde durch die entsprechende Berichterstattung und die regelmäßigen internen, monatlichen Projektstandspräsentationen sichergestellt.

Die Bearbeitung der Arbeitspakete 2 und 4 der THN konnte durch eine fruchtbare und erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Projektpartner EREA abgeschlossen werden. EREA als Anlageneigentümer im Gebäude puls<sup>G</sup> als auch verantwortlich für die Versorgungssicherheit unterstützte die Umsetzungsmaßnahmen, die von Seiten der THN empfohlen wurden. Umbau- als auch Erweiterungsmaßnahmen an der Anlagentechnik konnten problemlos umgesetzt werden.

Von Seiten der THN wurde das Arbeitspaket 2 „Betriebsoptimierung“ hinsichtlich einer sozialwissenschaftlichen Begleitung durch Befragungen der Bewohnenden im Gebäude puls<sup>G</sup> erweitert. Das Institut für Energie und Gebäude, verantwortlich für die Bearbeitung der Arbeitspakete der THN im Forschungsvorhaben, konnte dabei unterstützend auf die langjährige Erfahrung des Kompetenzzentrums Soziale Innovationen, Methoden und Analyse (kurz: KoSIMA) der THN zurückgreifen. Über diese Kooperation konnten erfolgreiche Befragungen sowie auch ausgewählte, ausführliche Einzelinterviews der Bewohnenden stattfinden. EREA hat die neuen Themenstellungen begrüßend unterstützt. Dabei nahmen sie die Schnittstelle zwischen Bewohnenden und den wissenschaftlichen Akteuren der THN ein.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse**

#### **1.1 Vorhabensziele**

##### **1.1.1 Grundlegende Zieldefinition**

Im Vorhaben werden anhand der Vorarbeiten und auf Basis des vorangegangenen Forschungsvorhabens +EQ-Net die bisher langfristig aufgezeichneten sowie weiter fortgeführten Monitoringdaten in der wissenschaftlichen Messdatenbank eingehend analysiert. Folglich sind aus Perspektive der multivalenten Anlagentechnik Betriebsoptimierungspotenziale abzuleiten. Ziel ist es, Energieeffizienzsteigerungen im Betrieb der Wärmepumpen sowie Energieeinsparungen auf Seiten Verbraucher/Erzeuger zu erzielen. Die Performancesteigerung sowie die Reduktion an Energieeinsparung soll nachhaltig erreicht werden.

Auf Seiten der Großkollektoranlage (GKA) sollen anhand der Analysen der Betriebsparameter Steigerungen des geothermischen Entzugspotenzials erzielt werden. Eine möglichst detaillierte simulative Abbildung des Gebäudefundaments mit Erdwärmekollektoren (EWK) und allen Umwelteinflüssen ist aufzubauen. Entsprechende Handlungspotenziale und Empfehlungen für den Betrieb des geothermischen Systems sind abzuleiten.

Darauf aufbauend sind über bauliche Anpassungen elektrisch verstellbare Regelventile an den einzelnen EWK-Strängen zu installieren, die mithilfe einer Verknüpfung aus Gebäudeleittechnik, aktuellen Messdaten sowie zuvor erarbeiteten Simulationsergebnissen die passende Ventilstellung für einen optimierten Quellwärmeentzug einstellen. Eine langfristige wissenschaftliche Untersuchung bewertet die getroffenen Maßnahmen.

Ziel ist es, aus diesem Arbeitspaket Optimierungspotenziale für GKA unterhalb der Tiefgarage eines Gebäude abzuleiten. Die Maßnahmen sind zu bewerten und Handlungsempfehlungen sind zu transferieren.

##### **1.1.2 Sektorale Zielbeschreibung**

###### **1.1.2.1 Forschung & Innovation**

Aufgrund der stetig steigenden Anforderungen an die Gebäudeeffizienz leistet das Gesamtziel des Forschungsvorhabens +EQ-Net II einen bedeutenden Beitrag für die Ressourceneinsparung und Effizienzerhöhung, um ökonomische und ökologische Ziele miteinander zu kombinieren. Das Gesamtvorhaben ist sowohl wissenschaftlich als auch anwendungstechnisch orientiert. Es baut dabei auf einem bereits bestehenden Verständnis der Betriebsoptimierung multivalenter Anlagen aus bisher abgeschlossener Forschungsvorhaben wie beispielsweise „+Eins“ auf. Des Weiteren knüpfen die wissenschaftlichen Arbeiten zur Bewertung und simulativen Abbildung des geothermischen Systems an einem langjährig, stetig gewachsenen Wissens über hydrothermische Vorgänge im Untergrund aus anderen Verbundprojekten an.

Das vorliegende Vorhaben fokussiert sich nun auf die Erweiterung des Wissens von GKA unterhalb von Gebäuden sowie deren Potenziale für eine regenerative Wärmeversorgung von Gebäuden. Des Weiteren sind über niedrig-technologische Maßnahmen Effizienzsteigerungen in der Anlagentechnik zu ergreifen und deren Einfluss aufzuzeigen.

#### **1.1.2.2 Marktziele**

Die Ziele der Arbeitspakete der THN verfolgen keine Marktziele.

#### **1.1.2.3 Gesellschaft**

Die Erkenntnisse aus dem Arbeitspaket 2 „Betriebsoptimierung“ der THN lassen über die Verbreitung von Handlungsempfehlungen für niedrig-technologische Maßnahmen in der Betriebsoptimierung multivalenter Anlagentechnik die Akzeptanz für die Umsetzung eines komplex verschalteten, technologischen Systems steigern. Ideologische Hürden können abgebaut sowie das Vertrauen in die Technik gesteigert werden.

Damit einhergehend sind auch die Wissenssprünge eines geothermischen Systems unterhalb einer Tiefgarage eines Gebäudes zu veröffentlichen (Arbeitspaket 4). Akzeptanz als auch das Interesse an solchen Systemen kann gesteigert werden für eine Zunahme zukünftiger Umsetzungsprojekte, indem technologische Grenzen dieser Einbauvariante aufgezeigt werden.

Die Bearbeitung und das Erreichen der Ziele aus den Arbeitspaketen 2 und 4 leisten damit einen erheblichen Beitrag für die regenerative Wärmeversorgung von Gebäuden, mit dem Endergebnis einen positiven Effekt auf Umwelt und Gesellschaft zu ermöglichen.

## 1.2 Dokumentation der erreichten Ergebnisse

### 1.2.1 AP1 – Monitoring und Qualitätssicherung

#### 1.2.1.1 AP 1.1 Optimierung des Datensystems und der Datenqualität

Im Rahmen des Arbeitspakets „**1 Monitoring und Qualitätssicherung**“ wurde der Meilenstein „**M1.1 Aufbau und Optimierung Datensystem**“ weitgehend erreicht. Durch die Umstellung und kontinuierliche Verbesserung des Datensystems konnten Datenqualität und Verfügbarkeit deutlich gesteigert werden.

#### **Einführung und Umstellung auf ein verbessertes Datensystem**

Das bestehende Datensystem für Austausch und Auswertung, ursprünglich auf hdf5-Dateien basierend, wurde erfolgreich auf das csv-Format umgestellt. Diese Anpassung vereinfachte die Visualisierung und Auswertung der Messdaten erheblich und ermöglichte eine breitere Nutzung durch die Projektpartner. Die verbesserte Zugänglichkeit der Daten trug wesentlich zur Identifikation von Optimierungspotenzialen bei.

#### **Automatisierte Datenqualitätsprüfungen**

Zur Sicherstellung der Datenqualität wurden automatisierte Routinen eingeführt, die periodisch Reports erstellen. Diese beinhalten Kennwerte wie:

- Anzahl der Messwerte und Sensoren,
- Anzahl der Zeitstempel,
- Abweichungen von vorgesehenen Rastergrößen (1 Minute, 5 Minuten, 30 Minuten, 120 Minuten) und
- Anzahl von Lücken in der Datenaufzeichnung.

Die **automatisierten pdf-Reports** wurden durch Visualisierungen wie Carpet-Plots ergänzt, welche die zeitliche Verteilung der Messwerte anschaulich darstellen. Probleme wie Datenlücken oder fehlerhafte Sensoren konnten so schneller identifiziert und behoben werden.

#### **Verbesserung der Datenqualität und Reduktion von Ausfällen**

In den Jahren 2020 und 2021 traten wiederholt Probleme bei der Datenaufzeichnung auf, die eine kontinuierliche Auswertung erschwerten. Eine signifikante Verbesserung wurde Ende 2021 erreicht, als der für die Datenübermittlung eingesetzte Router ausgetauscht wurde. Dieser Schritt reduzierte die Ausfallzeiten erheblich und verbesserte die Stabilität der Datenübertragung.

### **Datenbanken und erfasste Messwerte**

Die im Gebäudekomplex erfassten Messwerte werden in drei separaten SQL-Datenbanken verwaltet:

1. **Datenbank „Heizung“:** Nach Integration der Daten von nachgerüsteten Wärmepumpen umfasst diese Datenbank 200 Messpunkte.
2. **Datenbank „Gewerbe“:** Diese enthält Messwerte von 323 Datenpunkten, darunter auch Daten von Stromzählern, die vom Energieversorger „Naturstrom“ bereitgestellt werden.
3. **Datenbank „Wohnungen“:** Mit 676 Datenpunkten deckt sie die Messwerte von 66 Wohnungen ab.

### **Ergänzende Datenquellen und Validierung**

Für fehlende Messdaten aus den Jahren 2020 und 2021 wurden alternative Datenquellen wie lokale Microcontroller oder Exporte des Stromversorgers „Naturstrom“ überprüft. Routinen zur Integration dieser Datenquellen wurden entwickelt, um solche Lücken auch in Zukunft automatisiert zu schließen. Dennoch traten in den Microcontroller-Daten ähnliche Lücken auf, die durch die Umstellung auf ein zentralisiertes System minimiert werden konnten. Überblicke zur Datenqualität analog zu den Daten aus den SQL-Datenbanken wurden in den folgenden Diagrammen dargestellt:

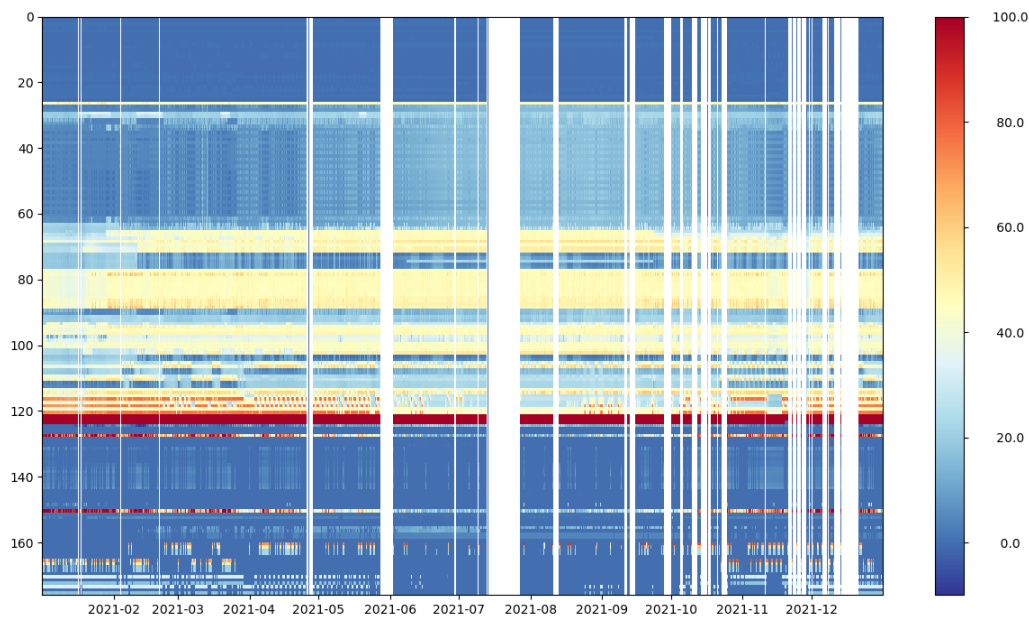


Abbildung 1 Übersicht der Messwerte aus Microcontrollern für „Heizung“ im Jahr 2021

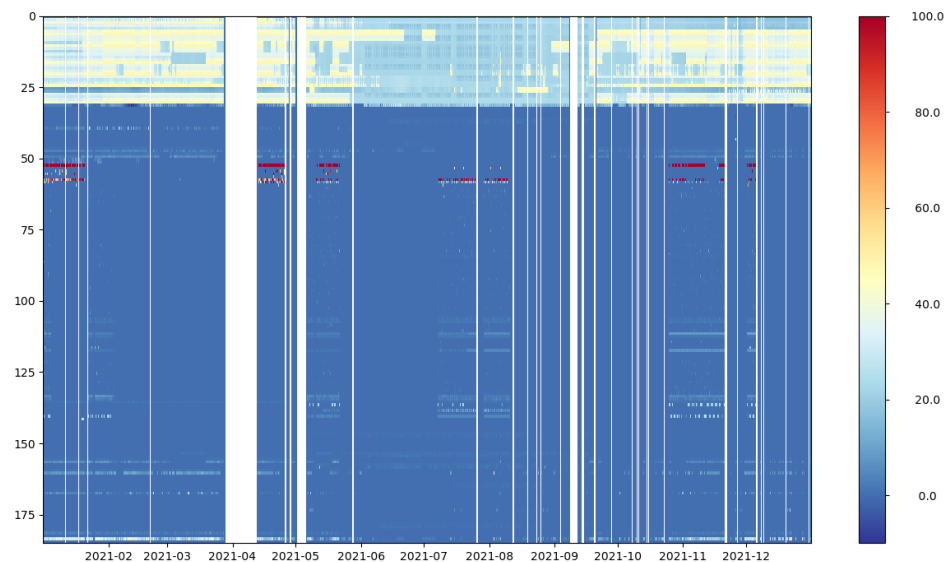


Abbildung 2 Übersicht der Messwerte aus Microcontrollern für „Gewerbe“ im Jahr 2021

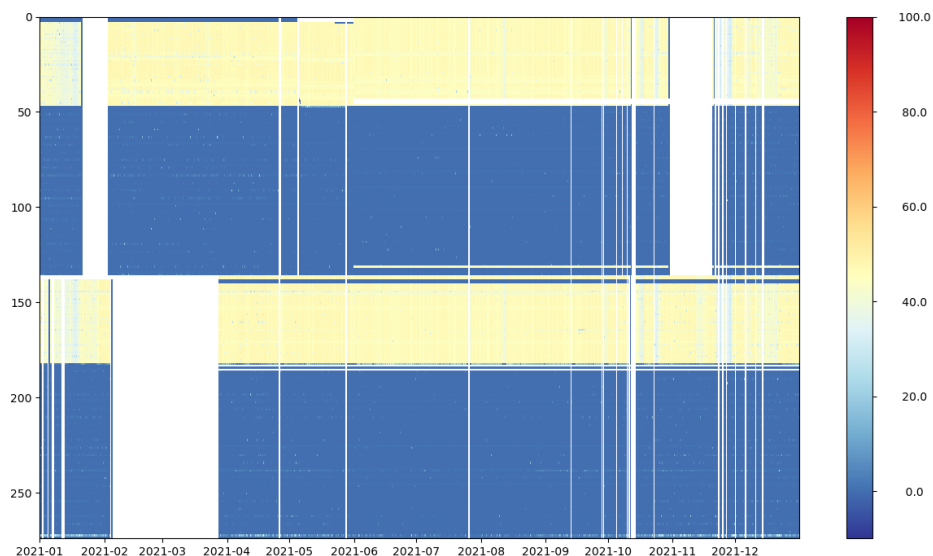


Abbildung 3 Übersicht Messwerte aus Microcontrollern für „Wohnungen“ im Jahr 2021

### **Messdaten der nachgerüsteten Wärmepumpen („Hydromodule“)**

Die Messwerte der beiden nachgerüsteten Wärmepumpen („Hydromodule“) wurden in den Online-Daten der Fachfirma und in der SQL-Datenbank integriert. Die Reports zur Datenqualität und die Aufbereitung der Daten für die Projektpartner wurde um diese Datenpunkte erweitert.

### **Erhöhung der Prüfzyklen und Datenqualität**

Im Jahr 2022 wurde die Datenprüfung auf einen **48-Stunden-Zyklus** verkürzt. Diese Maßnahme ermöglichte eine schnellere Identifikation und Behebung von Fehlern. Die Reports wurden um detaillierte Carpet-Plots erweitert, die Datenpunkte nach Einheit und Wertebereich

aufteilen. Dies erleichtert die Analyse von Vor- und Rücklauftemperaturen, Leistungen und Volumenströmen.

### Jährliche Fortschritte bei der Datenqualität

- **2020–2021:** Häufige Lücken und technische Probleme erschwerten die Datenaufzeichnung.

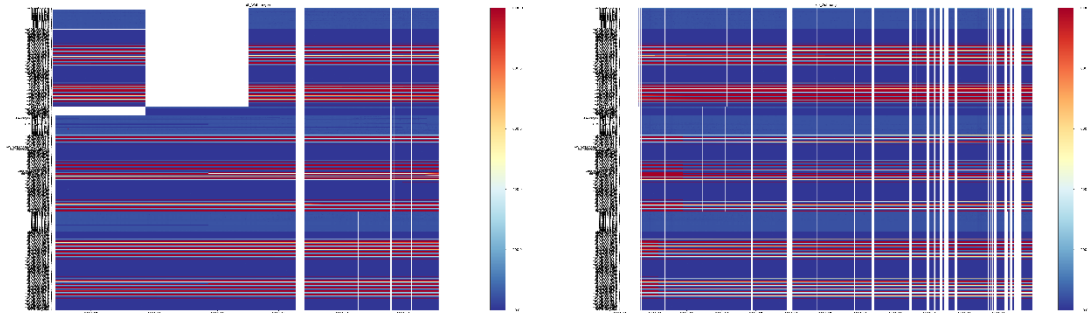


Abbildung 4 Datenbank "Wohnung" 2020 und 2021

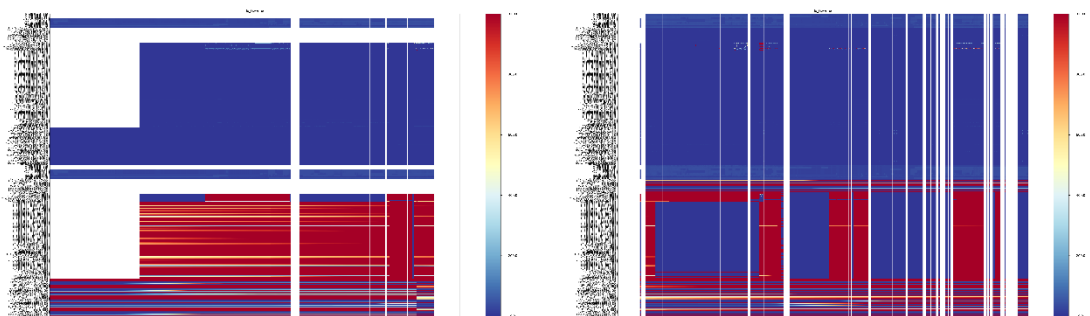


Abbildung 5 Datenbank "Gewerbe" 2020 und 2021

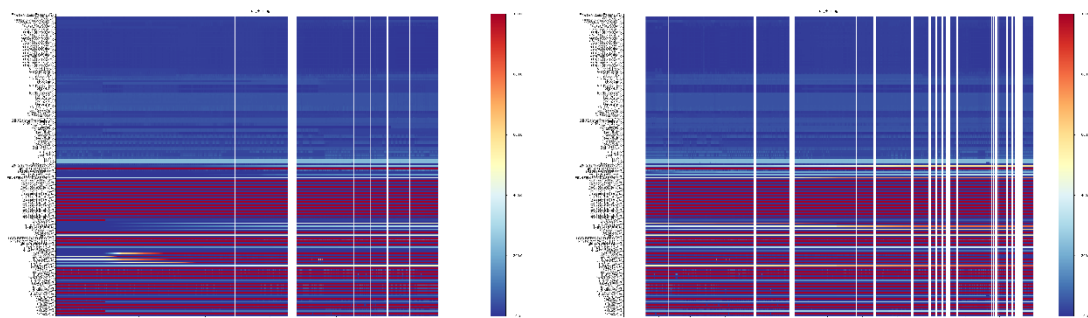


Abbildung 6 Datenbank "Heizung" 2020 und 2021

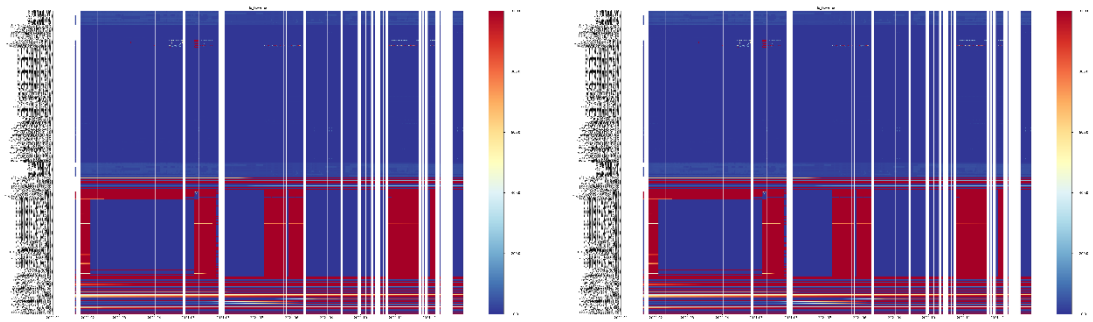


Abbildung 7 Datenbank "Gewerbe" 2020 und 2021

- **2022:** Verbesserte Erfassungsqualität in den Datenbanken „Heizung“ und „Gewerbe“. In der Datenbank „Wohnungen“ traten zwischen März und Juli 2022 größere Lücken auf, die auf defekte Sensoren zurückzuführen waren.

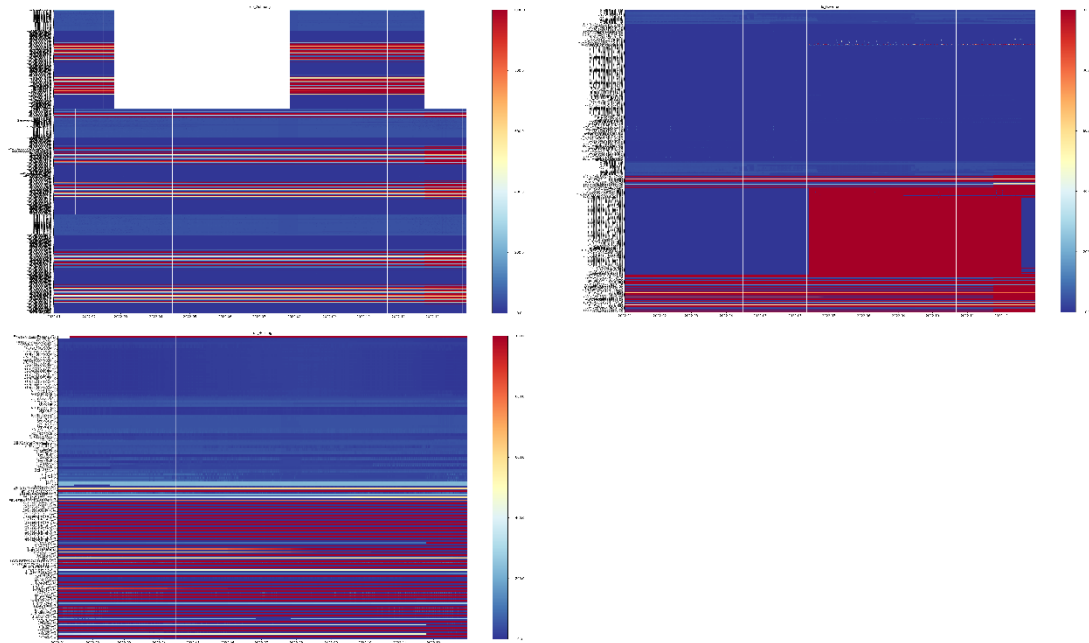


Abbildung 8 Datenbanken "Wohnung, Gewerbe und Heizung" 2022

- **2023:** Nach Behebung der Sensorausfälle zeigte sich eine deutliche Stabilisierung der Datenqualität. Das neue Reporting ermöglichte die frühzeitige Erkennung und Behebung von Problemen.

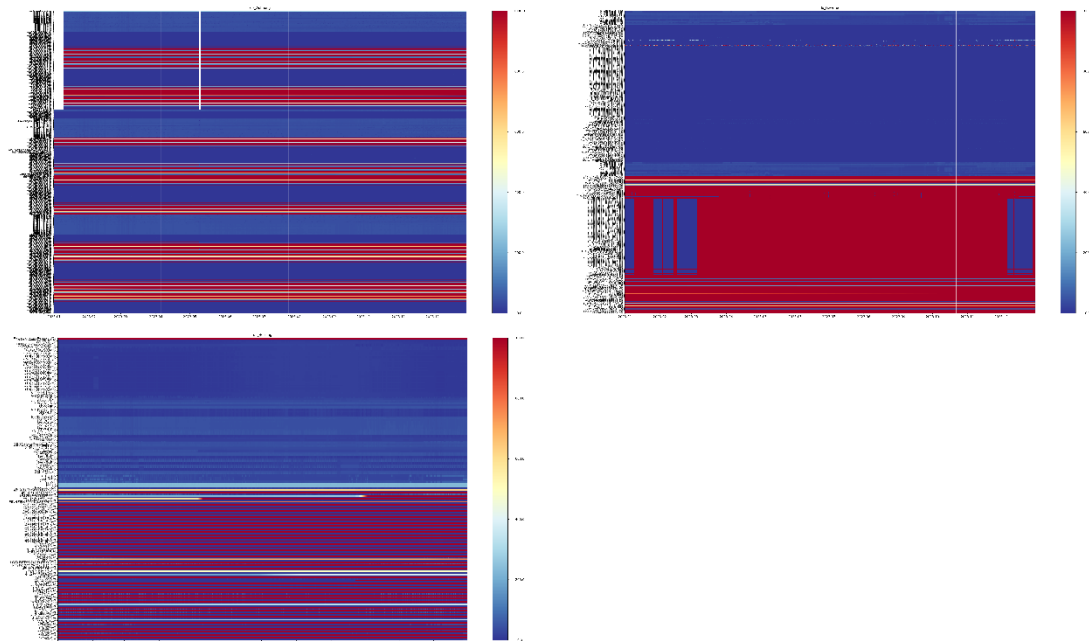


Abbildung 9 Datenbank "Wohnung, Gewerbe und Heizung" 2023

- **2024:** Die Erhöhung der Prüfzyklen hat sich bewährt. Datenausfälle, insbesondere in der Naturstrom-Datenbank, konnten zeitnah lokalisiert und behoben werden.

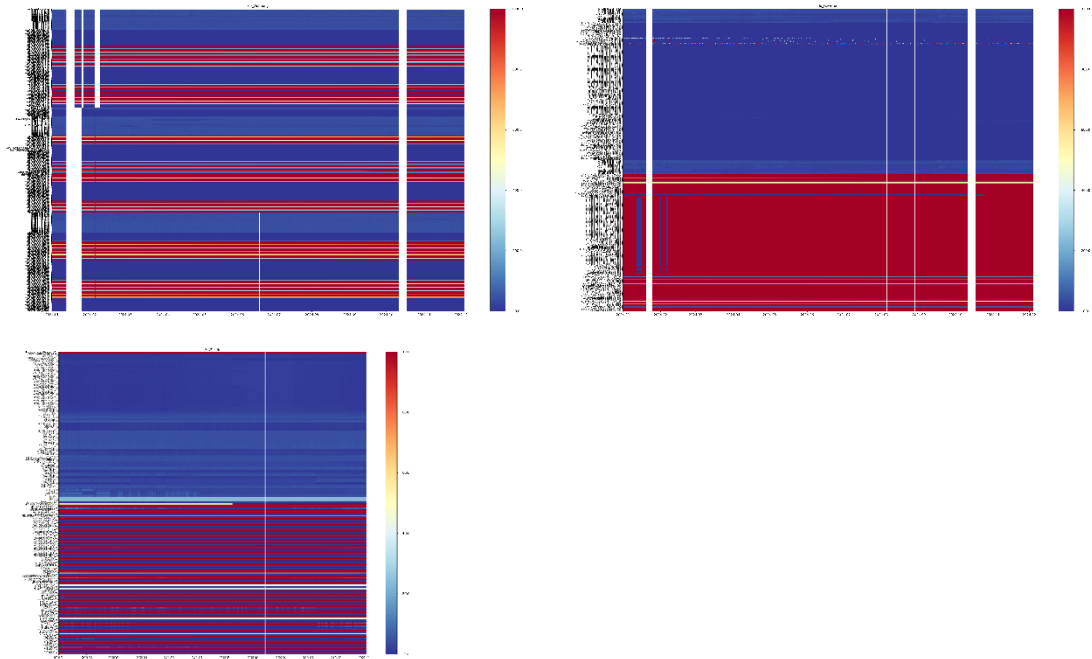


Abbildung 10 Datenbank "Wohnung, Gewerbe und Heizung" 2024

## Visualisierungen und Erkenntnisse

Durch die übersichtlichen Reports und Datenplots konnten Auffälligkeiten bei Messwerten frühzeitig erkannt werden. Beispiele umfassen:

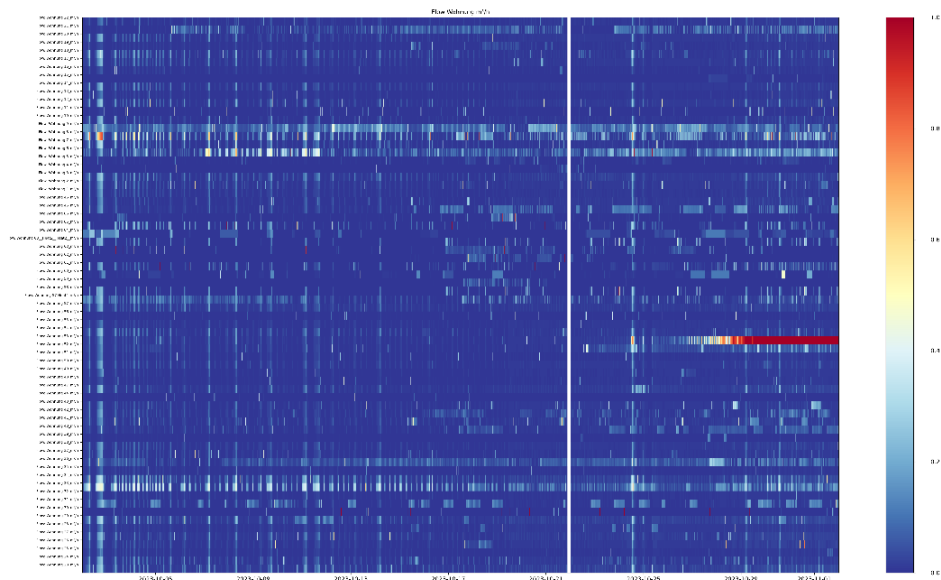


Abbildung 11 Unregelmäßigkeiten im Massestrom eines Wärmestromzählers

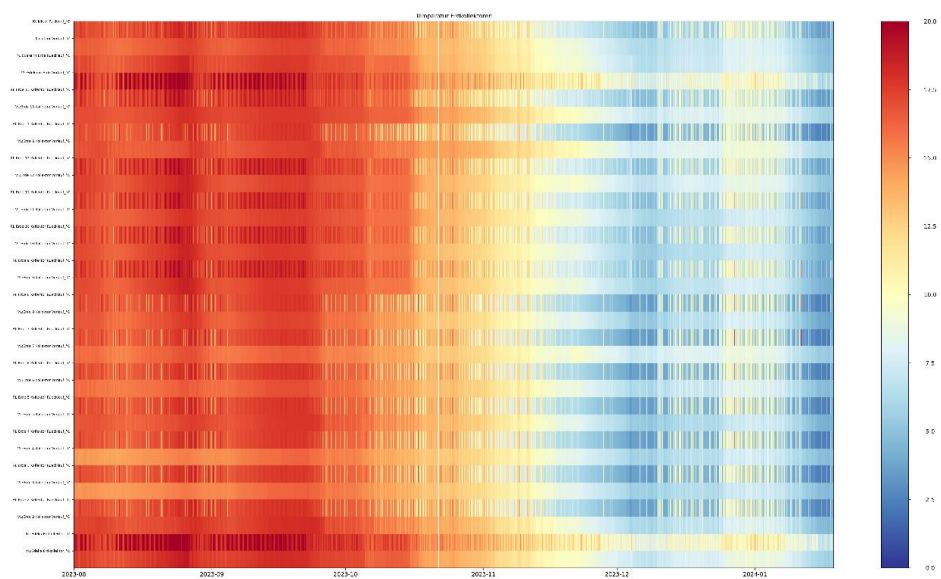


Abbildung 12 Temperaturänderungen der Erdkollektoren

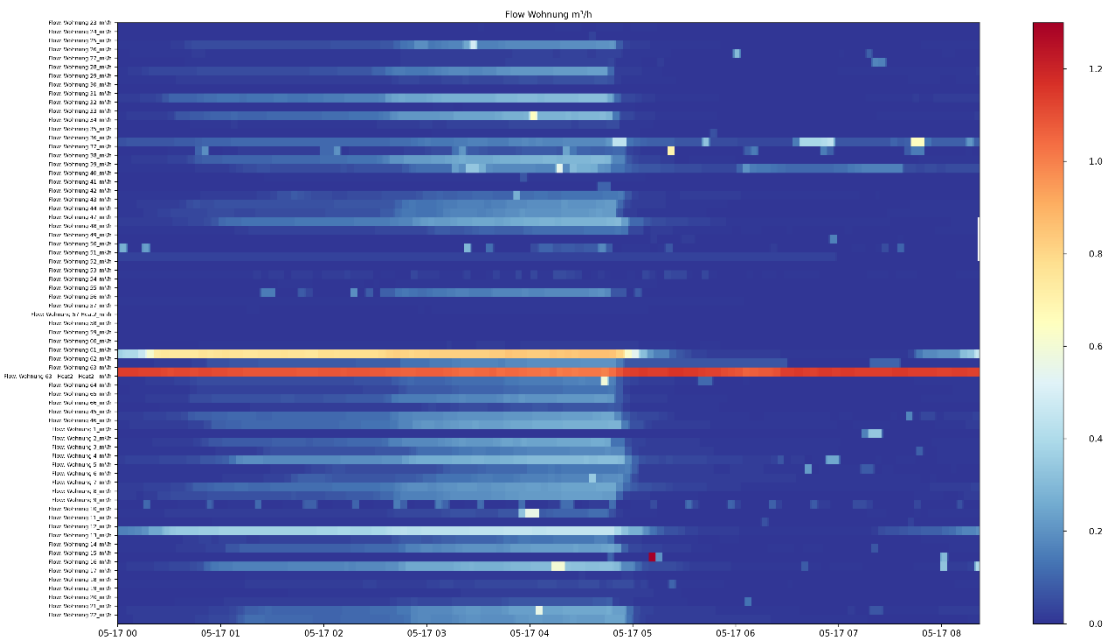


Abbildung 13 Systematische Verbesserungen durch Anpassungen der Regelventile und der Sensor-technik

### **Fazit und Ausblick**

Die Maßnahmen zur Optimierung des Datensystems und der Datenqualität haben eine signifikante Verbesserung der Datenstabilität und -konsistenz ermöglicht. Automatisierte Prüfungen und regelmäßige Berichte unterstützen eine effiziente und frühzeitige Erkennung von Fehlern. Im Hinblick auf zukünftige Projekte werden diese Systeme kontinuierlich weiterentwickelt, um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden.

### 1.2.1.2 AP 1.2 Langzeit-Monitoring pulsG

Das Arbeitspaket „**1.1.3 Einregulierungs-Monitoring nach Optimierungsmaßnahmen**“ hatte zum Ziel, effiziente Routinen für die langfristige Analyse von Gebäudedaten zu entwickeln. Diese Routinen sollten nicht nur die Auswertung der Kennwerte ermöglichen, sondern auch als Grundlage für das Langzeit-Monitoring im Rahmen des Projekts dienen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Validierung der Effizienzsteigerungen durch Optimierungsmaßnahmen und auf der Überwachung des Energieverbrauchs.

#### **Entwicklung und Implementierung von Auswertungsroutinen**

- **Python-basierte Auswertungen:** Im Projektverlauf wurden Messwerte in Python verarbeitet und in **nutzbare CSV-Dateien** umgewandelt, die eine effiziente Analyse ermöglichten.
- **Berechnung zentraler Kennzahlen:** Die entwickelten Routinen analysierten die Daten hinsichtlich:
  - Betriebsstunden der Anlagen,
  - Energiemengen (monatlich und jährlich),
  - Arbeitszahlen und Heizenergieaufteilungen nach Erzeugern.Diese Kennzahlen bildeten die Grundlage für die regelmäßige Bewertung der Systemleistung.

#### **Verbesserungen durch automatisierte Reports**

Die im Arbeitspaket **AP 1.1** beschriebenen **automatisierten Datenqualitätsreports** unterstützten die fortlaufende Analyse. Fehler und Unstimmigkeiten konnten frühzeitig erkannt und behoben werden, was einen **kontinuierlichen Datenfluss** sicherstellte. So wurde das Monitoring zunehmend zuverlässiger, und größere Datenverluste konnten vermieden werden.

#### **Ergebnisse und Auswertungen des Heizenergieverbrauchs**

Die kontinuierliche Analyse und Optimierung führten zu bemerkenswerten Verbesserungen des Energieverbrauchs im Laufe der Jahre. Die Ergebnisse für die Jahre 2021 bis 2024 werden im Folgenden dargestellt.

## 2021 – Ausgangssituation

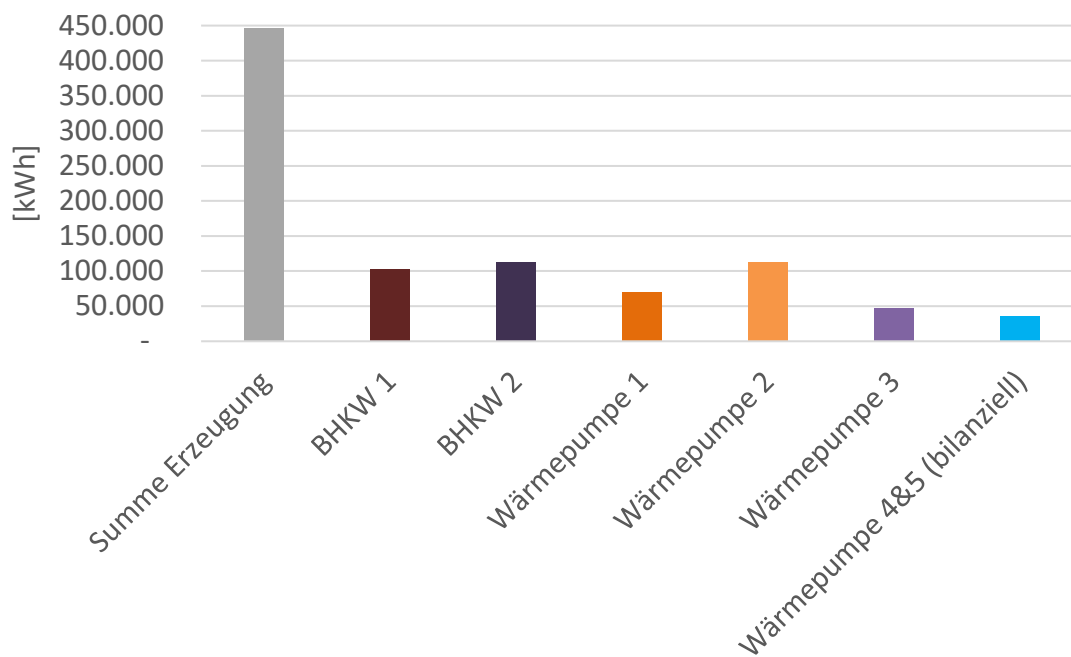


Abbildung 14 Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2021

- Die Heizenergie wurde im Jahr 2021 hauptsächlich von den Blockheizkraftwerken (BHKWs) erzeugt, ergänzt durch die Wärmepumpen.
- Die Effizienz des Systems war aufgrund von Verteilverlusten und unzureichender Einregulierung noch nicht optimal.
- **Optimierungsmaßnahmen eingeleitet:** Basierend auf den Analyseergebnissen wurden erste Maßnahmen zur Verbesserung der Anlagensteuerung und -regelung umgesetzt.

## 2022 – Erste Ergebnisse der Optimierungen

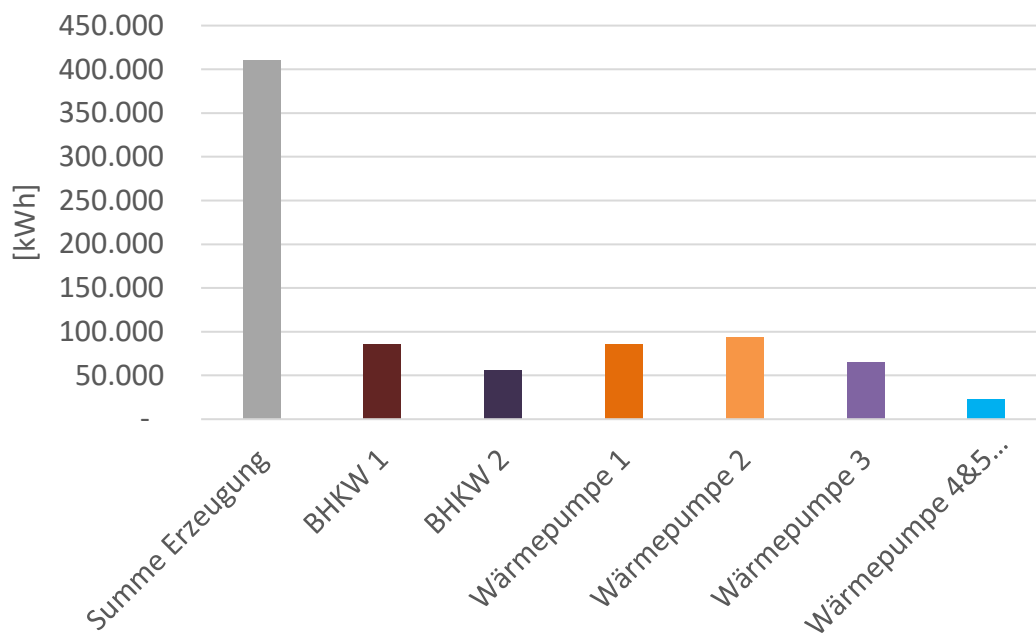


Abbildung 15 Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2022

- Durch die **laufenden Einregulierungsmaßnahmen** konnte der Heizenergiebedarf bereits im Jahr 2022 deutlich reduziert werden.
- Die BHKWs erzeugten weniger Energie, während die Wärmepumpen den restlichen Bedarf effizient abdeckten.
- **Reduktion des Energieverbrauchs um 10%:** Im Vergleich zu 2021 wurde insgesamt eine Reduktion der erzeugten Heizenergie um etwa 10% verzeichnet.

## 2023 – Erweiterte Einregulierungsmaßnahmen

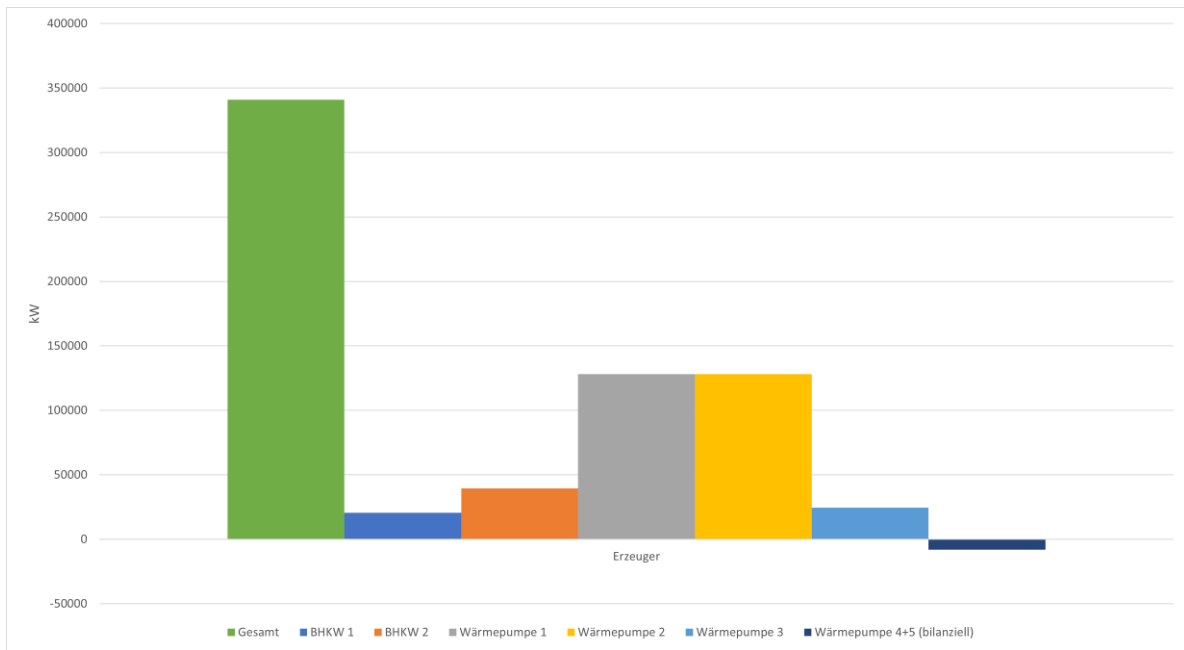


Abbildung 16 Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2023

- Zusätzliche Maßnahmen, wie die präzisere Regelung der Heizkreise und die Verbesserung der Sensortechnik, führten zu einer weiteren Reduktion des Energieverbrauchs.
- Der **Energieverbrauch der BHKWs wurde um 50% gesenkt**, während die Wärmepumpen den Hauptanteil der Heizenergie erzeugten.
- **Herausforderungen bei der Datenqualität:** Einige Datenlücken in den frühen Phasen des Jahres wurden durch verbesserte Prüfroutinen ausgeglichen.

## 2024 – Stabilisierung und weiterer Fortschritt

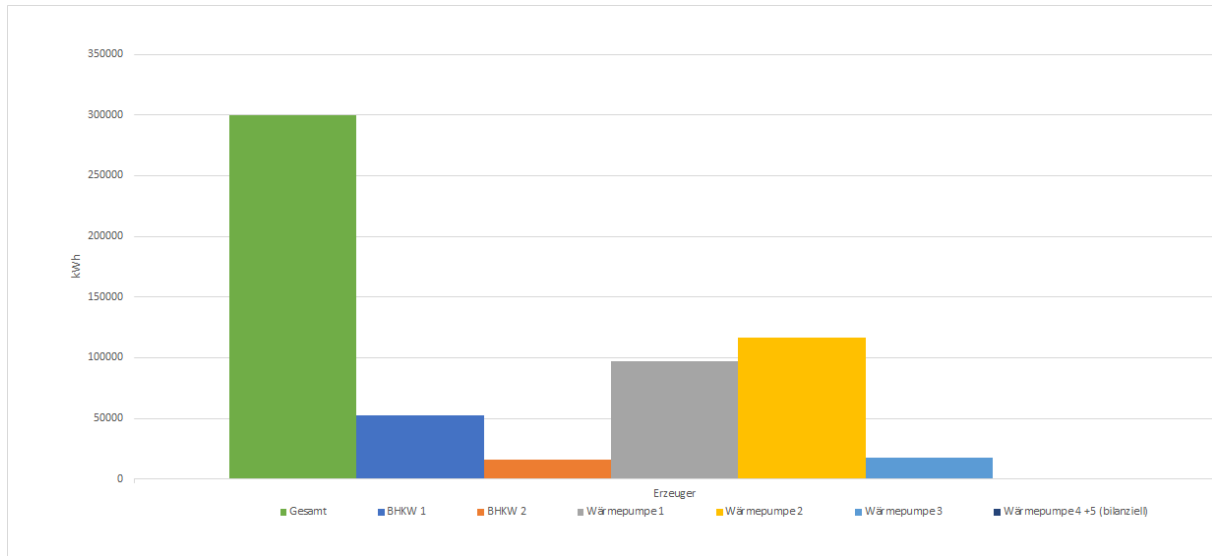


Abbildung 17: Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2024

- Im Jahr 2024 wurde der Gesamtheizenergieverbrauch nochmals um ca. 40 kW reduziert.
- **Gesamtreaktion seit Projektstart:** Im Vergleich zu den Ausgangswerten aus dem Jahr 2021 wurde der Energieverbrauch des Systems insgesamt um ca. 150 kW gesenkt.
- Die Maßnahmen trugen nicht nur zur Effizienzsteigerung bei, sondern senkten auch die Betriebskosten erheblich.

### Fazit und Ausblick

Das **Langzeit-Monitoring und die Einregulierungsmaßnahmen** haben gezeigt, dass eine konsequente Überwachung und regelmäßige Anpassung der Systemparameter entscheidend für eine nachhaltige Energieeinsparung sind. Die automatisierten Berichte und entwickelten Routinen ermöglichten eine datenbasierte Entscheidungsfindung und identifizierten Optimierungspotenziale frühzeitig.

Durch die konsequente Umsetzung der Maßnahmen wurde eine **Gesamtreaktion des Energieverbrauchs um 150 kW** im Vergleich zum Projektstart erreicht. Dies entspricht einer signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz und einer deutlichen Senkung der Betriebskosten.

### 1.2.1.3 AP 1.3 Einregulierungs-Monitoring nach Optimierungsmaßnahmen

Das Arbeitspaket „**AP 1.3 Einregulierungs-Monitoring nach Optimierungsmaßnahmen**“ hatte das Ziel, durch gezielte Überwachung und Bewertung die Effizienz der Heizsysteme zu steigern und den Gesamtenergieverbrauch zu reduzieren. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets dienen zugleich als Grundlage für das „**AP 2 Betriebsoptimierung**“, indem Datenexporte für die energetische Bewertung bereitgestellt wurden.

Zentrale Aufgaben des Arbeitspakets waren:

- **Erstellung von Kennwerten** zur energetischen Bewertung des Gebäudebetriebs,
- Implementierung von Routinen zur Berechnung und Visualisierung,
- Analyse und Reduzierung von Verteilverlusten und Optimierung der Wärmeerzeuger.

#### **Kennzahlen und energetische Bewertung**

Die energetische Bewertung des Gebäudes basierte auf der Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs, wobei folgende Flächen berücksichtigt wurden:

- Gesamtnutzfläche: **10.098 m<sup>2</sup>**,
- Wohnfläche: **4.499 m<sup>2</sup>**,
- Gewerbefläche: **1.013 m<sup>2</sup>**,
- Vollsortimenter: **1.970 m<sup>2</sup>**.

Der Heizwärmeverbrauch der 66 Wohnungen und 7 Gewerbeeinheiten wurde durch die Wärmemengenzähler der Heizkreise 2 und 3 erfasst.

#### **Ergebnisse für das Jahr 2021**

- **Gesamtverbrauch:** 464.957 kWh.
- **Spezifischer Heizwärmebedarf:** 57,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) bei einer Fläche von 8.128 m<sup>2</sup> (Gesamtfläche abzüglich der Vollsortimenterfläche).
- **Energetische Herausforderungen:** Hohe Verteilverluste und ineffizient eingestellte Wohnungsstationen führten zu übermäßigen Energieflüssen und einem erhöhten Wärmebedarf.

### Verbesserung durch Energiemonitoring

Die Einführung von Visualisierungs- und Analysewerkzeugen wie der **Energetische Gebäudesignatur** des Gebäudes (Abbildung 26) ermöglichte eine detaillierte Betrachtung des Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

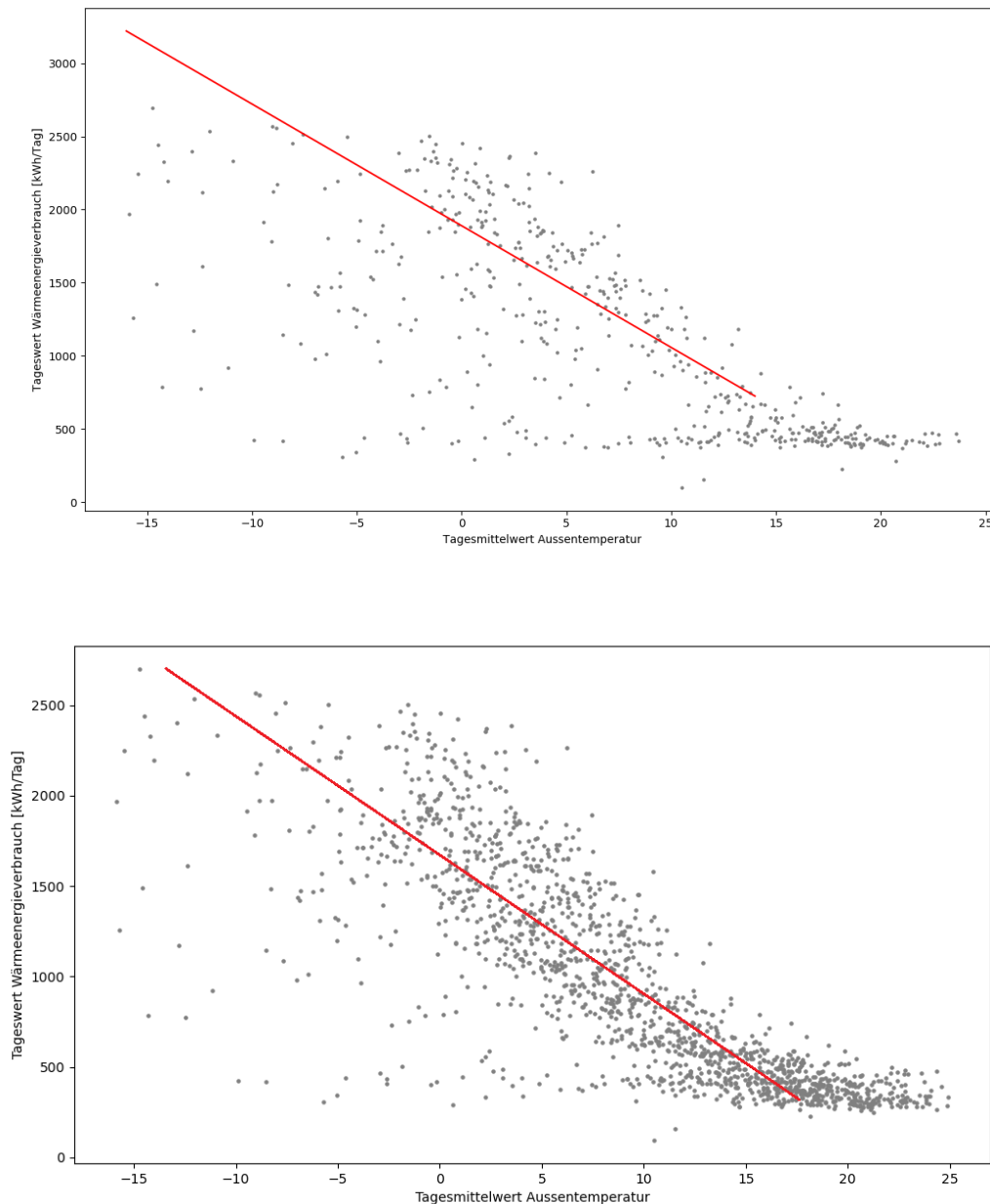


Abbildung 18 Energetische Gebäudesignatur des Heizwärmebedarfs für Wohnungen und Gewerbe im Jahr 2021 (oben) und für den Projektzeitraum (unten)

- **Dimensionierung der Wärmeerzeuger:** Die Berechnung der benötigten Heizleistung bei  $-16\text{ °C}$  ergab einen Wert von **134,2 kW**. Im Vergleich dazu steht die installierte Heizleistung von **301,2 kW**, bestehend aus:
  - Blockheizkraftwerke (BHKW): 80 kW (je 40 kW pro Einheit),
  - Wärmepumpen: 221,2 kW (verteilt auf fünf Module).

## Komponentenbewertung und Optimierungen

### Leistungsbewertung der Wärmepumpen

- Die Leistungszahlen der Wärmepumpen wurden durch Vergleich mit Herstellerangaben überprüft. Für Wärmepumpe 1 vom Typ WPF 66 zeigten die Tagesmittelwerte eine Übereinstimmung mit den Herstellerangaben (Leistungszahlen zwischen 3,2 und 3,4).

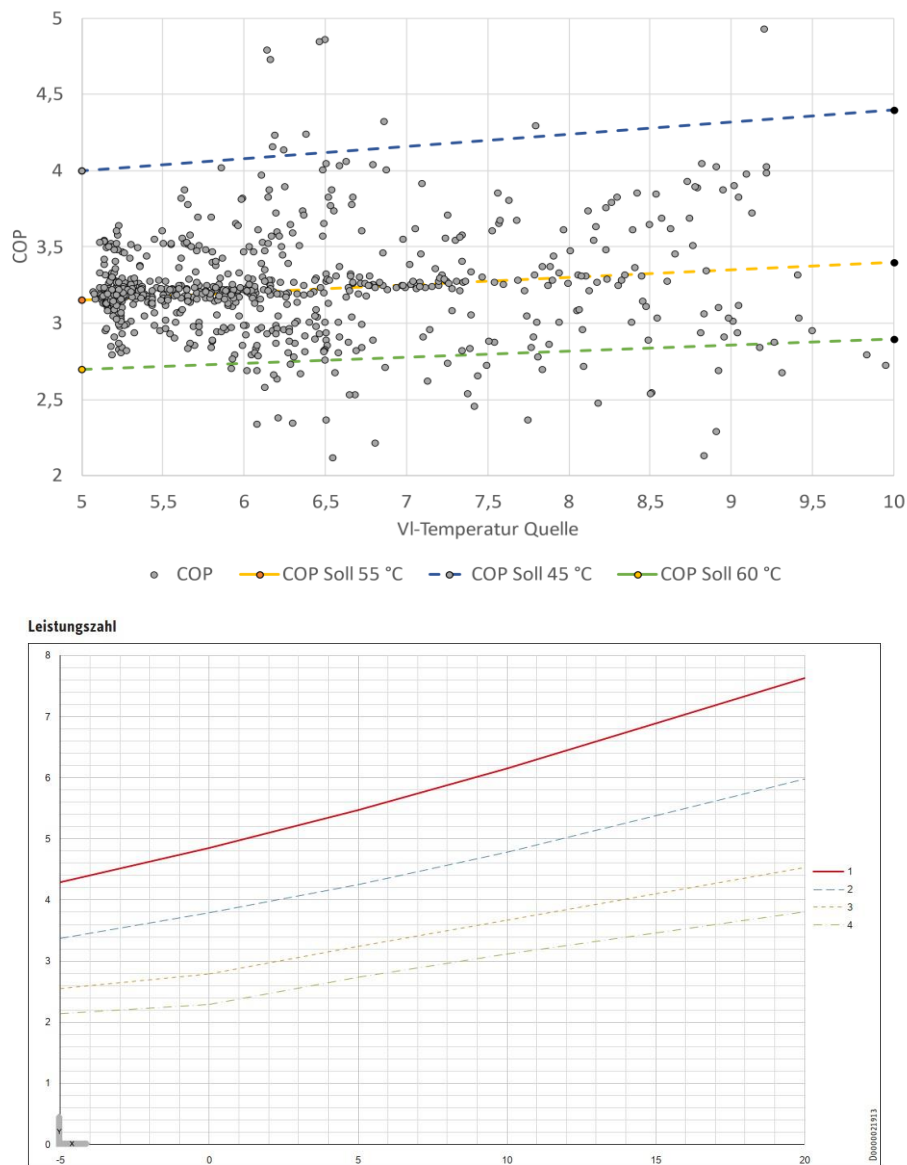


Abbildung 19 Leistungszahl der Wärmepumpe 1 im Januar 2022 (oben) sowie Herstellerangaben zur Leistungszahl von Wärmepumpen des Typs WPF 66 (unten)

### **Betriebsverhalten der BHKW**

- Erste Auswertungen des BHKW-Betriebs ergaben inkonsistente Gasverbrauchswerte aufgrund fehlerhafter Einheitenangaben. Nach Anpassung der Einheiten konnten Effizienzkennzahlen berechnet werden:
  - **Gesamtwirkungsgrad:** 87%,
  - **Elektrischer Wirkungsgrad:** 30,8%,
  - **Thermischer Wirkungsgrad:** 56,3%.

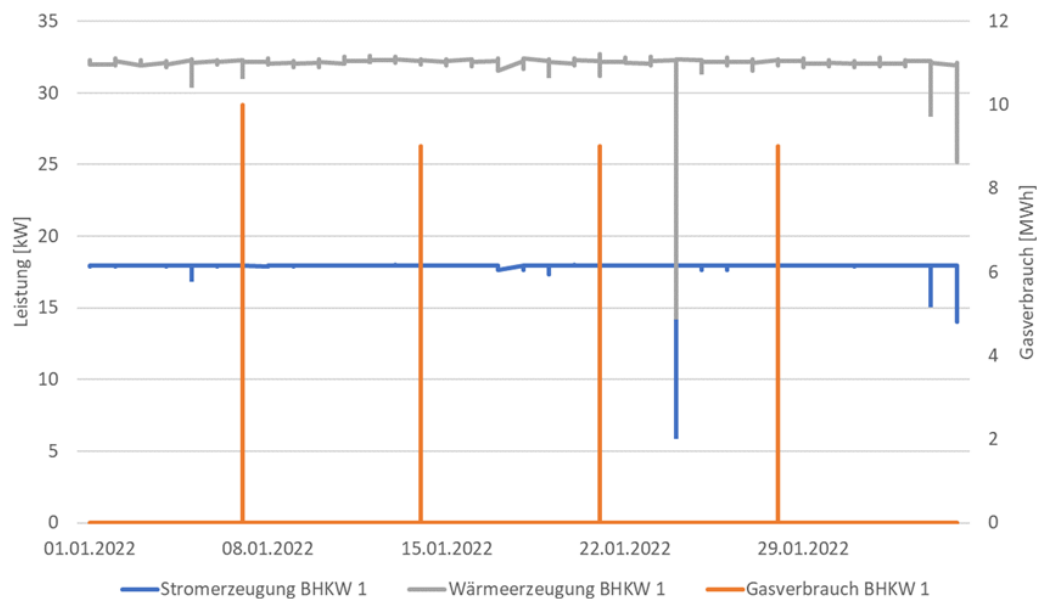


Abbildung 20 Betriebsverhalten des BHKW 1 im Januar 2022

### **Analyse von Verteilverlusten**

Eine wesentliche Herausforderung waren die hohen Verteilverluste im System. Die Differenz zwischen der Wärmeabgabe an die Heizkreise und dem tatsächlichen Wärmeverbrauch in Wohnungen und Gewerbeflächen war signifikant. Fehlerhaft eingestellte Wohnungsstationen führten zu übermäßigen Durchflüssen. Optimierungen, die durch „AP 2 Betriebsoptimierung“ eingeleitet wurden, zeigten erste Erfolge.

## Energiemonitoring mit Flussdiagrammen

### Energieflüsse 2021

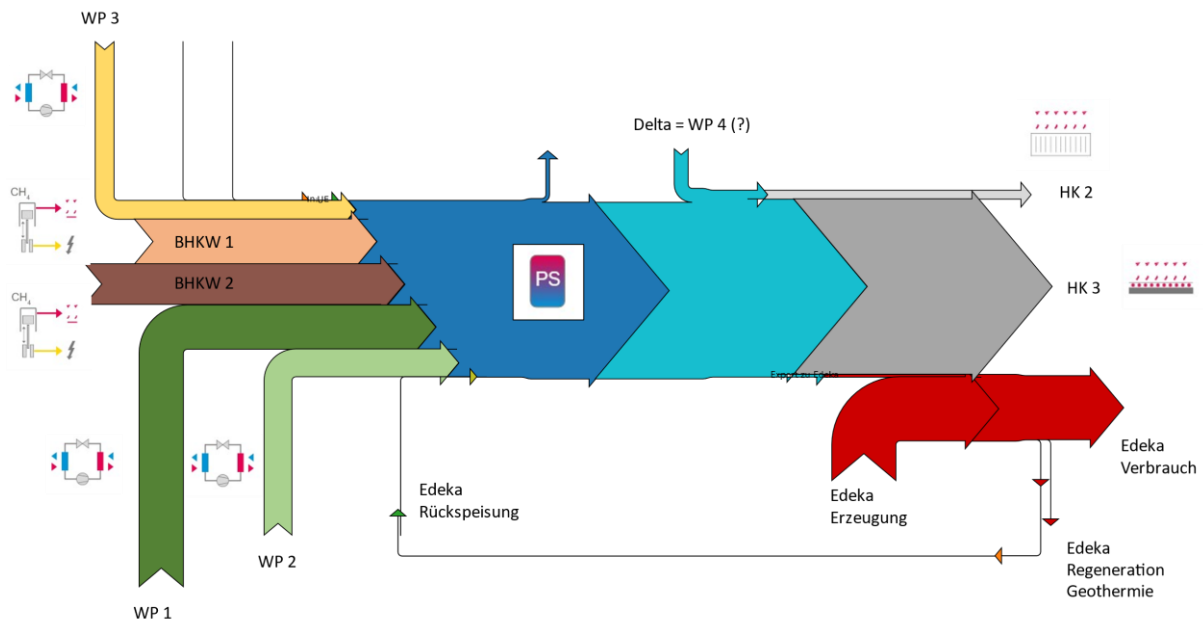


Abbildung 21 Sankey-Diagramm der Energieerzeugung, der Einspeisung in den Pufferspeicher und der Versorgung der Heizkreise im Jahr 2021

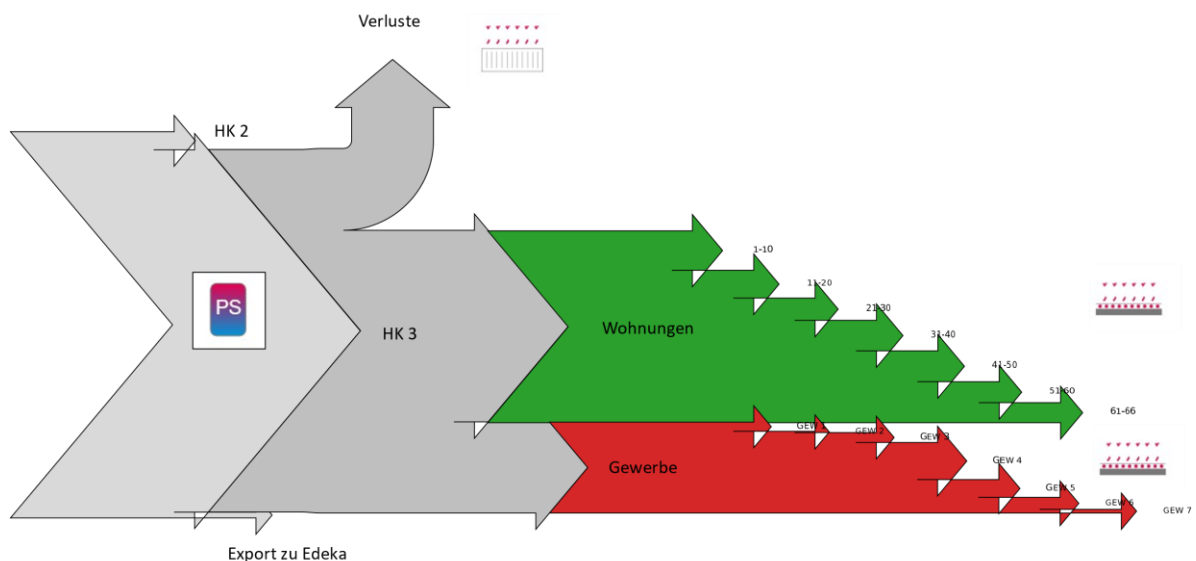


Abbildung 22 Sankey-Diagramm der Entnahme auf dem Pufferspeicher und der Versorgung der Wärmeverbraucher in den Wohnungen und Gewerbe-Einheiten im Jahr 2021

- Im Jahr 2021 wurde die Heizenergie zu **51% von den BHKWs** und zu **49% von Wärmepumpen** bereitgestellt.
- Geringe Synergieeffekte zwischen Wohnungen, Gewerbe und dem Supermarkt wurden identifiziert, z. B. bei der Nutzung von Abwärme oder der Rückspeisung in Pufferspeicher.

## Energieflüsse 2022 bis 2024

Die fortlaufenden Optimierungen führten zu einer kontinuierlichen Reduktion der Verteilverluste und des spezifischen Heizwärmebedarfs:

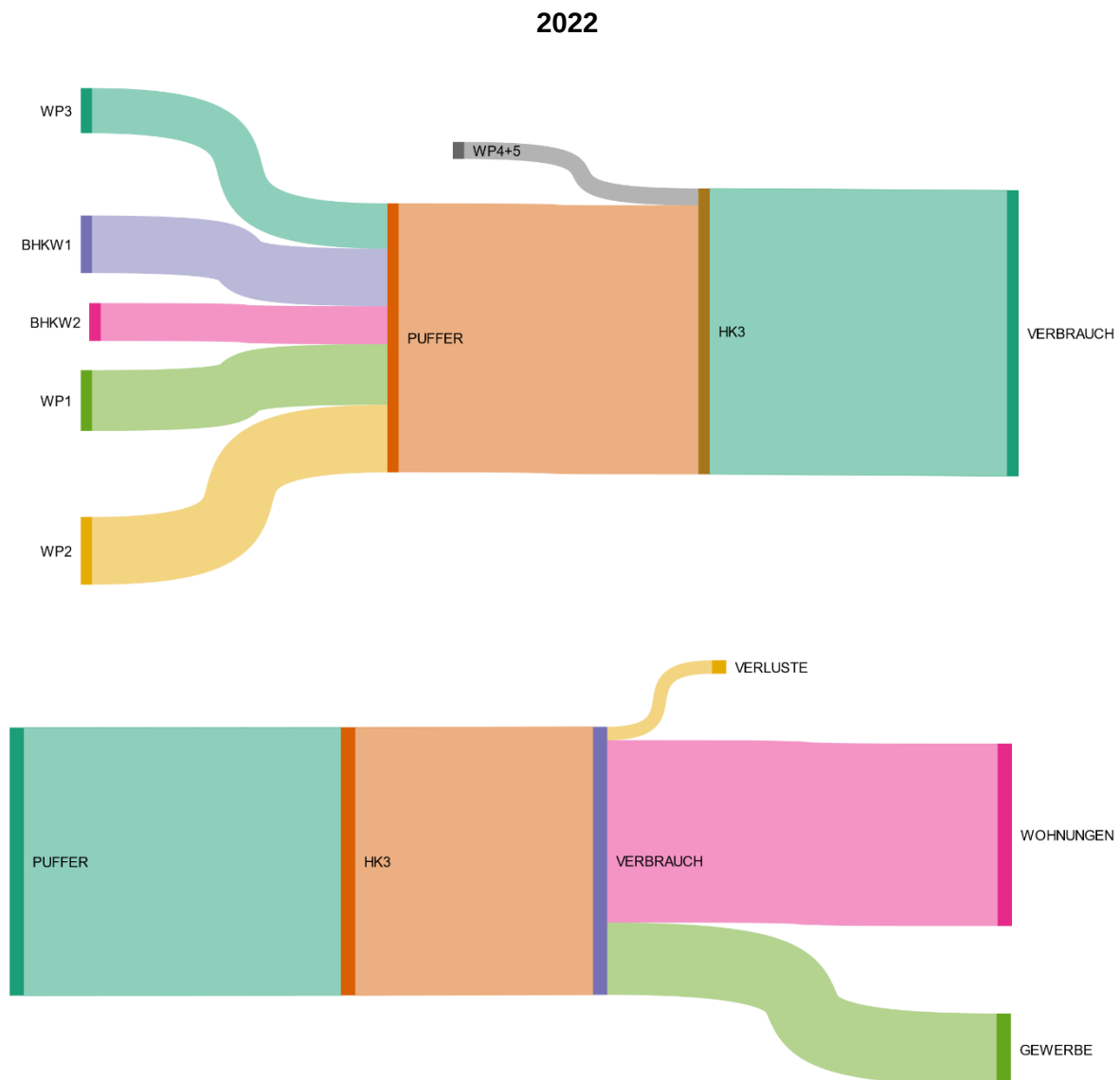


Abbildung 23 Energieflussdiagramm für das Jahr 2022

- Heizwärmebedarf: 47,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Reduktion um 9,4 kWh/(m<sup>2</sup>a)).
- Verteilverluste: 20,4 kWh.
- Erhöhter Einsatz der Wärmepumpen bei gleichzeitig reduziertem Gesamtverbrauch.

2023:

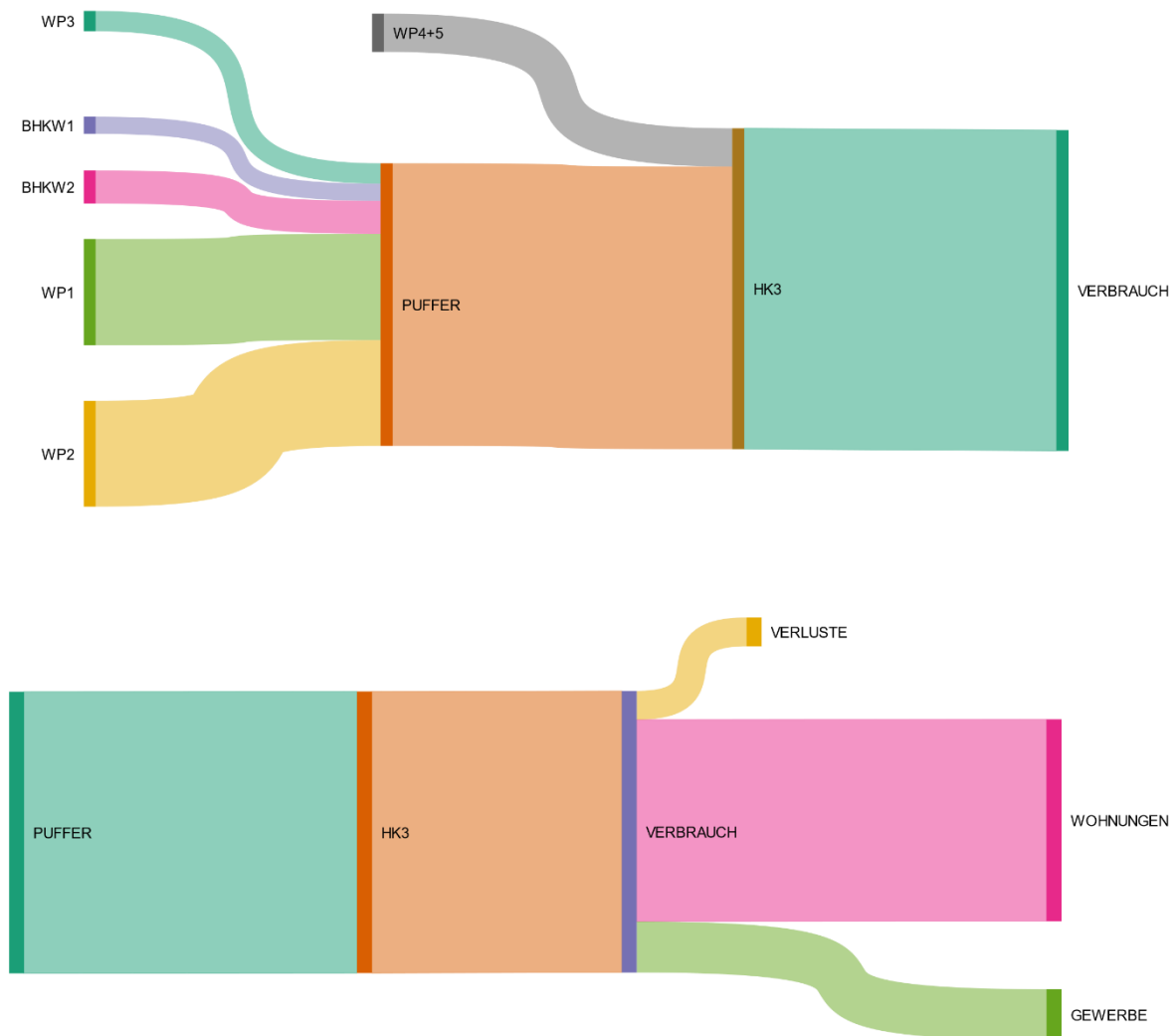


Abbildung 24 Energieflussdiagramm für das Jahr 2023

- Heizwärmebedarf: 42,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) (weitere Reduktion um 4,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)).
- Verteilverluste: 39,7 kWh.
- Bessere Integration der Wärmepumpen in den Gesamtenergiebedarf.

2024:

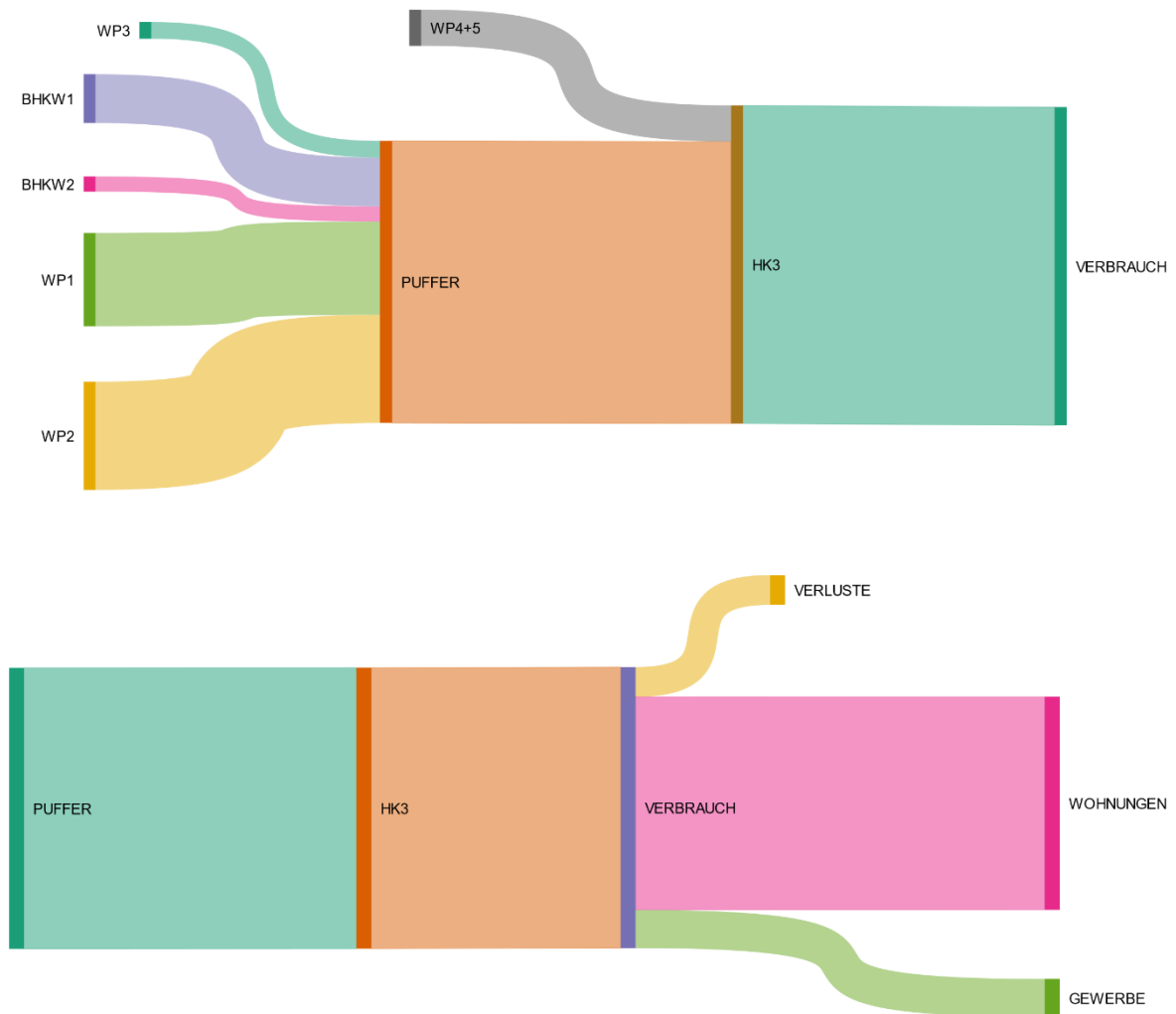


Abbildung 25 Energieflussdiagramm für das Jahr 2024

- Heizwärmebedarf: 37,8 kWh/(m²a) (weitere Reduktion um 5,1 kWh/(m²a)).
- Verteilverluste: 36,4 kWh.
- Energieverbrauch stabilisiert, Systemverluste minimiert.

### **Fazit und Ausblick**

Die kontinuierliche Überwachung und Optimierung der Heizkreise und Wärmeerzeuger führte zu erheblichen Verbesserungen der Energieeffizienz:

- **Reduktion des Heizwärmebedarfs um 19,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a)** innerhalb des Projektzeitraums (2021–2024).
- **Etablierung effizienter Monitoring-Systeme** durch den Einsatz von Visualisierungs- und Analysesystemen wie Sankey-Diagrammen und der Energetischen Gebäudesignatur
- **Minimierung der Verteilverluste** durch Anpassung der Wohnungsstationen und der Systemsteuerung.

Das Arbeitspaket „**AP 1.3 Einregelungs-Monitoring**“ hat einen Beitrag zur nachhaltigen Verbesserung der Energieeffizienz des Gebäudekomplexes geleistet. Die Ergebnisse bieten eine wertvolle Grundlage für ähnliche Projekte und weitere Optimierungen im Gebäudemanagement.

#### 1.2.1.4 AP 1.4 Daten-Management und Definition Schnittstellen

Das Arbeitspaket „**AP 1.4 Daten-Management und Definition Schnittstellen**“ konzentrierte sich auf die Bereitstellung einer robusten Dateninfrastruktur und die Entwicklung klar definierter Schnittstellen für eine effiziente Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten. Wichtige Ziele waren:

- Die regelmäßige Bereitstellung von Messdaten in einem standardisierten Format
- Optimierung der Datenbankverwaltung und Update-Prozesse
- Entwicklung automatisierter Schnittstellen für die Integration mit externen Systemen und Modellen.

#### **Schnittstellenentwicklung**

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden den Projektpartnern monatlich aktualisierte **csv-Dateien aller Messwerte** zur Verfügung gestellt. Diese Dateien dienten als Grundlage für die weitere Verarbeitung und Analyse in verschiedenen Projekten.

#### **Kooperation mit AP 3 BuildingXModeling**

In enger Zusammenarbeit mit den Partnern des Arbeitspakets „**AP 3 BuildingXModeling**“ wurde die **Art und Umfang der Schnittstellen** definiert, insbesondere für das Teilprojekt „**AP 3.1 Funktions-orientiertes Gebäudemodell (Building Automation Modeling)**“. In mehreren Meetings wurden verschiedene Ansätze diskutiert, darunter die Automatisierte Erstellung von Messkonzepten aus Dokumenten wie „Datenpunktlisten“, „Automationsschemata“, „GA-Zustandsgraphen“ und „GA-Ablaufdiagrammen“.

Des Weiteren wurde der Quellcode des Updateprozesses zum Erfahrungs- und Wissensaustausch an die Hochschule München übergeben.

## Datenbank-Management

### Wachstum und Herausforderungen der Datenbanken

Während der Projektlaufzeit verzeichneten die Datenbanken ein signifikantes Wachstum:

- Die **Datenbank „Wohnungen“** erreichte eine Größe von über **120 GB**, was die Geschwindigkeit der Update-Prozesse erheblich beeinträchtigte.
- Der Zeitaufwand für ein **Datenbank-Update auf das Netzwerk** betrug bis zu **120 Minuten** für ein Datenpaket von sechs Stunden Aufzeichnungszeit.

### Optimierung der Update-Prozesse

Zur Verbesserung der Effizienz wurden die Update-Prozesse angepasst:

- **Lokale Speicherung:** Die Datenpakete werden zunächst auf einer lokalen Festplatte gespeichert, bevor sie ins Netzwerk archiviert werden. Diese Änderung reduzierte die Update-Dauer für dasselbe Datenpaket auf unter **5 Minuten**.
- **Reduzierung der Paketgröße:** Kürzere Update-Intervalle führten zu kleineren Datenpaketen, was sowohl die Geschwindigkeit der Updates als auch die Belastung der Systeme verringerte.

```
In [10]: runfile('C:/Users/j.hoess/Desktop/EQNet/c_update_data_test.py', wdir='C:/Users/j.hoess/Desktop/EQNet')

##### Update der lokalen Ablage für Datenbank: Heizung

##
### sql_data_update
##
Begin Einlesen Stand vor Update:
Anzahl an gespeicherten Datenpunkten in Liste: 319585688
Letzes Datum vor update 2023-08-30 06:34:00
Begin SQL-Abfrage: Heizung
Erstes Datum in Update-Paket: 2023-08-30 06:35:00
Letzes Datum in Update-Paket: 2023-08-30 12:03:00
Dauer nach SQL-Abfrage in Minuten: 0.29
-> Begin Speichern Resample: Heizung
##### Dauer Update für Datenbank Heizung : 3.64

In [11]: runfile('P:/BER/EE/30 0 381_EQ_Net_2/Python/EQ_Net2/data_manage/c_update_data_4.py', wdir='P:/BER/EE/30 0 381_EQ_Net_2/Python/EQ_Net2/data_manage')

##### Update der lokalen Ablage für Datenbank: Heizung

##
### sql_data_update
##
Begin Einlesen Stand vor Update:
Anzahl an gespeicherten Datenpunkten in Liste: 319585688
Letzes Datum vor update 2023-08-30 06:34:00
Begin SQL-Abfrage: Heizung
Erstes Datum in Update-Paket: 2023-08-30 06:35:00
Letzes Datum in Update-Paket: 2023-08-30 12:00:00
Dauer nach SQL-Abfrage in Minuten: 0.32
-> Begin Speichern Resample: Heizung
##### Dauer Update für Datenbank Heizung : 122.44
```

Abbildung 26 Datenbankupdate vor und nach der Optimierungsmaßnahme

### Herausforderungen durch das csv-Format

Das verwendete csv-Format war aufgrund seiner Kompatibilität und leichten Handhabbarkeit eine naheliegende Wahl für den Austausch unter den Projektbeteiligten. Allerdings traten bei großen Datenmengen folgende Herausforderungen auf:

- **Verlangsamung der Schreibgeschwindigkeit** aufgrund von Latenzen in Netzwerken.
- **Speicherprobleme** auf Geräten mit begrenztem Arbeitsspeicher, was zu einem „Memory Error“ führte.

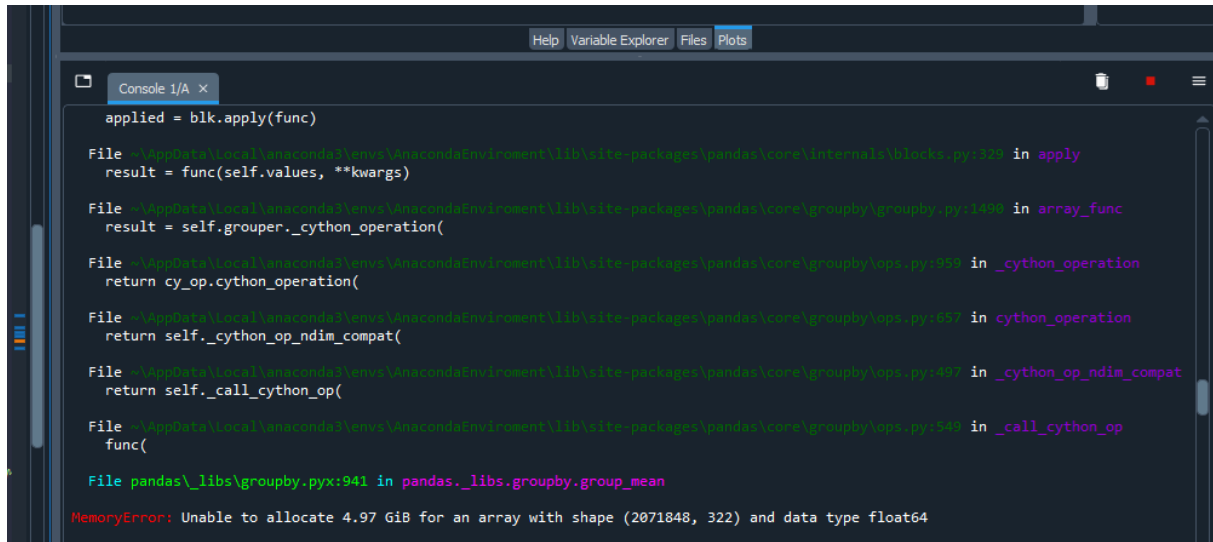


Abbildung 27 Nicht genügend zugewiesener Arbeitsspeicher führt zu einem

### Lösungsansätze und Anpassungen

Um mit den steigenden Datenmengen und den technischen Anforderungen umzugehen, wurden folgende Maßnahmen implementiert:

- **Flexible Update-Routinen:** Eine Funktion zur Begrenzung der Zeilenanzahl („rowlimit“) wurde in den Code integriert, um die Datenpaketgröße an die verfügbare Rechenleistung anzupassen.

```

Umfang SQL-Abfrage:
Maximale Anzahl der Zeitschritt in Minuten, die bei Update aus SQL-Datnebnak bezogen werden
ggf: begrenzen, wenn Probleme mit Arbeitsspeichr bei Update nach langen Zeit ohne Update
bei Heizung: rowlimit = 1 * 1000 * 1000 -> ca. 3,47 Tage (wg. 200 Variablen)
bei Gewerbe: rowlimit = 1 * 1000 * 1000 -> ca. 2,15 Tage (wg. 322 Variablen)
bei Wohnung: rowlimit = 1 * 1000 * 1000 -> ca. 1,03 Tage (wg. 676 Variablen)
rowlimit = 1 * 1000 * 1000
anztage = rowlimit / 200 / 60 / 24 # HZG 200 Variablen
rowlimit = 1000 * 1000 * 500 # quasi unendlch

```

Abbildung 28 Code zur flexiblen Anpassung der Datenpakete

**Einsatz von SQL-Clients:** SQL-Clients wurden verwendet, um die **Verfügbarkeit und Konsistenz der Datenbank** außerhalb der Python-Umgebung zu überprüfen. Diese ermöglichten eine schnelle Identifikation von Problemen, wie:

- **Indexfehler** während des Updates, die auf fehlerhafte oder nicht vorhandene Daten in der SQL-Datenbank hinweisen.

```
##
#### sql_data_update
##
Begin Einlesen Stand vor Update:
Anzahl an gespeicherten Datenpunkten in Liste: 1125523830
Letztes Datum vor update 2024-01-12 20:27:00
Begin SQL-Abfrage: Wohnungen
Traceback (most recent call last):

  File ~\AppData\Local\anaconda3\lib\site-packages\spyder_kernels\pycompat.py:356 in compat_exec
    exec(code, globals, locals)

  File d:\eqnet\data_manage\c_update_troubleshooting.py:193
    dfupdate = sql_data_update(db_name,rowlimit,test_delta)

  File d:\eqnet\data_manage\c_update_data_test.py:178 in sql_data_update
    print_date("Erstes Datum in Update-Paket: ", dfupdate.iloc[0,1],db_name)

  File ~\AppData\Local\anaconda3\lib\site-packages\pandas\core\indexing.py:1896 in __getitem__
    return self.obj._get_value(*key, takeable=self._takeable)

  File ~\AppData\Local\anaconda3\lib\site-packages\pandas\core\frame.py:3868 in _get_value
    return series._values[index]

IndexError: index 0 is out of bounds for axis 0 with size 0

In [44]:
```

Abbildung 29 Indexfehler in der Datenbank „Gewerbe“

- Echtzeitüberprüfung der Datenbankaktivität und Identifikation von Ausfällen, zum Beispiel durch den Reiter „letzte Änderung“.

| Datenbank | Größe   | Elemente | Letzte Änderung     | Tabellen | Views | Funk... | Proze... | Trigger | Erreg... | Standard Kollation |
|-----------|---------|----------|---------------------|----------|-------|---------|----------|---------|----------|--------------------|
| Gewerbe   | 38,2 GB | 21       | 2024-01-20 02:41:00 | 21       |       | 0       | 0        | 0       | 0        |                    |
| Heizung   | 17,7 GB | 21       | 2024-01-23 13:34:00 | 21       |       | 0       | 0        | 0       | 0        |                    |
| Wohnungen | 99,9 GB | 21       | 2024-01-23 13:33:00 | 21       |       | 0       | 0        | 0       | 0        |                    |

| Letzte Änderung     |
|---------------------|
| 2024-01-20 02:41:00 |
| 2024-01-23 13:34:00 |
| 2024-01-23 13:33:00 |

Abbildung 30 SQL-Client „HeidiSQL“

### **Fazit und Ausblick**

Die Erfahrungen aus dem Arbeitspaket führten zu Erkenntnissen und Anpassungen, die für zukünftige Projekte von Bedeutung sind:

- **Effiziente Datenverarbeitung:** Der Umgang mit großen Datenmengen erfordert eine frühzeitige Planung der Infrastruktur, einschließlich leistungsstarker Speicher- und Verarbeitungssysteme.
- **Flexible Update-Strategien:** Die Anpassung der Update-Intervalle und -Methoden an die verfügbaren Ressourcen erwies sich als entscheidend, um die Datenqualität zu gewährleisten und Ausfallzeiten zu minimieren.
- **Standardisierte Schnittstellen:** Die Definition klarer Schnittstellen und der Austausch von Wissen, wie z. B. die Weitergabe des Quellcodes an die Hochschule München, ermöglichen eine nachhaltige Nutzung und Weiterentwicklung der Systeme.

Das Arbeitspaket „**AP 1.4 Daten-Management und Definition Schnittstellen**“ hat durch die Bereitstellung robuster Datenstrukturen und klarer Schnittstellen einen wesentlichen Beitrag zur Effizienz des Projekts geleistet. Die Implementierung flexibler Update-Routinen und die enge Zusammenarbeit mit anderen Arbeitspaketen haben die Grundlage für eine langfristige und nachhaltige Nutzung der Daten geschaffen.

## 1.2.2 AP2 – Betriebsoptimierung

### 1.2.2.1 Vergleich Soll/Ist Anlagentechnik

(THN)

Zusammen mit dem Partner EREA konnten alle relevanten Dokumente und Pläne über Bau und Ausführung des Gebäudes puls<sup>G</sup> gesammelt werden. Ein Überblick über die verbaute Anlagentechnik mit entsprechenden Spezifikationen konnte gewonnen werden. Des Weiteren erfolgte ein Abgleich der verbauten Messsensoren mit den im Hydraulikschema eingezeichneten Sensoren. Die nach dem Hydraulikschema geplanten Messsensoren sind verbaut und geben ihre Messwerte an die wissenschaftliche Messdatenbank weiter.

#### Messdatenbank

Die wissenschaftliche Messdatenbank besteht aus drei Datenbanken: Heizung, Gewerbe und Wohnungen. In dieser speichern die im Gebäude verteilten Messsensoren in 1-minütiger Auflösung Vorlauf- (VL-) und Rücklauf (RL-)Temperaturen, Wärmemengen und -leistungen, Volumenströme sowie elektrische Energie- und Leistungsmessungen.

Die Bezeichnung der Messsensoren gruppiert sich nach den folgenden Kürzeln:

- KWHA... → Wärmemengenmessung / Elektrische Energiemengenmessung
- PW... → Wärmeleistungsmessung / Elektrische Leistungsmessung
- Tp... → Temperaturmessung

Jede Komponente als auch Gewerbe- sowie Wohneinheit wird umfangreich gemonitort. Insgesamt bestehen die Datenbanken aus der folgenden Anzahl an Messpunkten:

|             |       |            |
|-------------|-------|------------|
| • Heizung   | 198   | Messpunkte |
| • Gewerbe   | 326   | Messpunkte |
| • Wohnungen | 676   | Messpunkte |
| Summe       | 1.200 | Messpunkte |

#### Energiezentrale

Die in der Energiezentrale verbaute Anlagentechnik im Untergeschoss des Gebäudes puls<sup>G</sup> besteht aus den folgenden Abschnitten:

- Blockheizkraftwerke (BHKW)
- Wärmepumpen mit Quelle Großkollektoranlage (WP GKA)
- Wärmepumpe mit Quelle Abluftwärmerückgewinnungsanlage (WP AWRGA)
- Wärmespeicher
- Schnittstellen zu Vollsortimenter (Anschluss VT)
- Verteilerstrang zu Verbrauchern (Verteiler)

Schematisch ist die Verschaltung dieser Einheiten in der folgenden Grafik in *Abbildung 31* sinnbildlich.

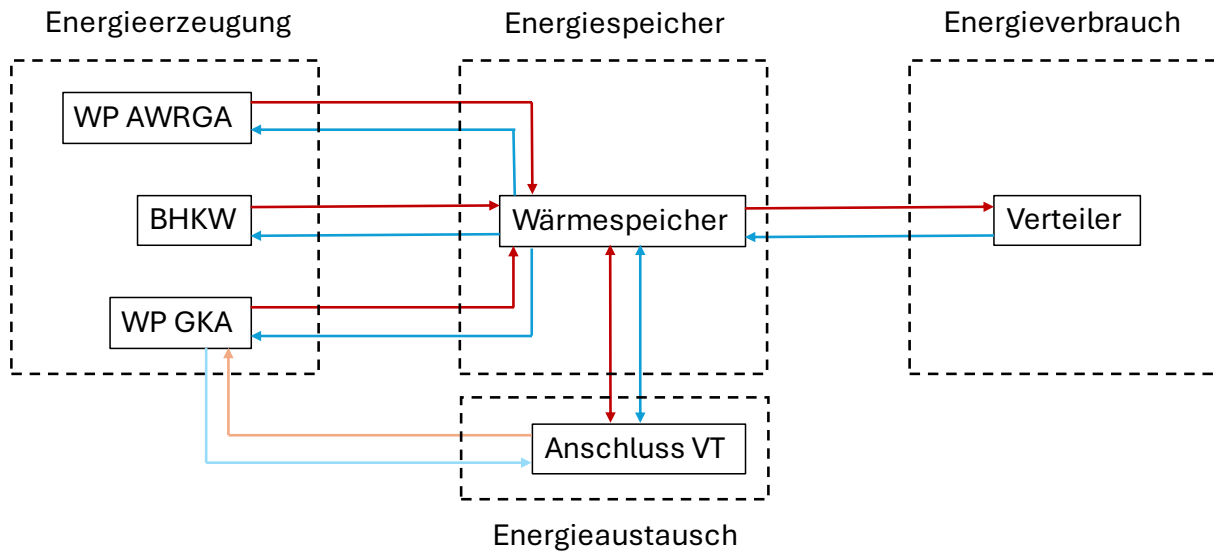


Abbildung 31 Schematischer Aufbau der Energiezentrale

Die Energieerzeugungseinheiten (BHKW, WP GKA, WP AWRGA) heben den RL der Verbraucher, gesammelt über den Verteiler und zwischengespeichert im Wärmespeicher, auf ein höheres Temperaturniveau. Die thermische Energie wird wieder im Wärmespeicher gespeichert bis die nötige Energie vom Verbraucher über den Verteiler abgefragt wird.

Über eine weitere Einheiten, dem Energieaustausch, wird thermische Energie zwischen dem zentralen Wärmespeicher und dem VT ausgetauscht.

Zum einen kann Wärme auf einem hohen Temperaturniveau bidirektional zwischen VT und Wärmespeicher ausgetauscht werden. Randbedingung für diesen Austausch ist ein Überschuss von thermischer Energie auf Seiten des vom Gesamtsystems entkoppelten Wärmespeichers des VT in Richtung des zentralen Wärmespeichers. Alternativ kann ein erheblicher Mangel beim VT für ein Wärmefluss in Richtung diesen führen, sodass die Versorgungssicherheit gewährleistet ist.

Über eine dritte Variante wird über kaskadiert angeordnete Wärmetauscher die Abwärme der vom VT eignen Kältemaschine auf verschiedenen Temperaturniveaus, auch zur Eigenversorgung, ausgekoppelt. Auf einem niedrigen Temperaturniveau kann diese Wärme in die GKA zur verbesserten Regeneration sowie zur saisonalen Verschiebung eingespeist werden.

Im Detail soll nun auf die einzelnen Einheiten aus Abbildung 32 eingegangen werden.

## Blockheizkraftwerk

In der Energiezentrale des Gebäudes sind zwei BHKW der Firma Viessmann (Modell: Vitoblock 200) verbaut, welche mithilfe von Erdgas im Nennpunkt 39 kW thermische Leistung und 20 kW elektrische Leistung bei einem Kraftstoffeinsatz von 62 kW liefern. Dies ergibt einen maximalen Brennstoffausnutzungsgrad von 94,90 %. An diesen sind jeweils ein Wärmemengenzähler (WMZ) verbaut. Ein WMZ misst sowohl die Temperaturen im VL als auch im RL. Hierbei wird gleichzeitig die Wärmeleistung bestimmt. Die BHKW sind schematisch in ihrer hydraulischen Verknüpfung in Abbildung 32 dargestellt.

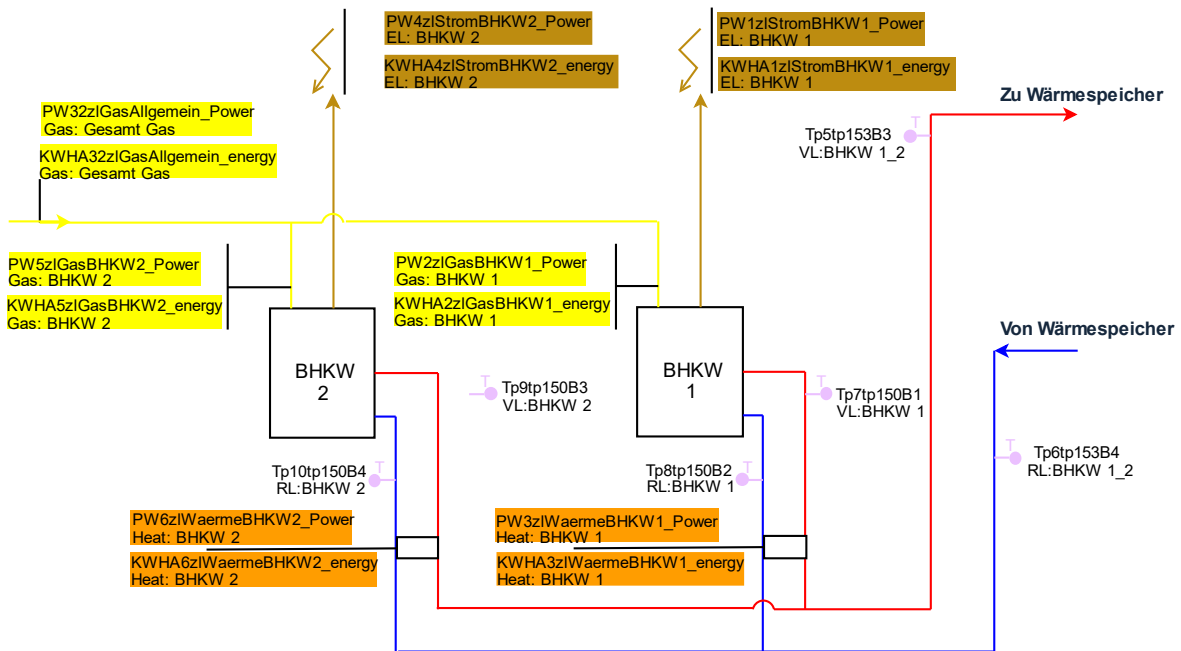


Abbildung 32 Hydraulisches Schaltbild BHKW mit Messsensoren (schematisch)

### Wärmepumpe mit Quelle Abluftwärmerückgewinnungsanlage

Es sind zwei Abluftwärmerückgewinnungsanlagen der Firma Aerco auf dem Dach des Gebäudes puls<sup>G</sup> verbaut. Das eine Modul (Modell: AWN DV – A40 BASIC 101) besitzt eine maximale thermische Leistung des eingebauten Wärmeübertragers von 5,8 kW, wohingegen das andere Modul (Modell: AWN DV – A70 BASIC 101) eine maximale thermische Leistung des Wärmeübertragers von 15,4 kW besitzt. Die von der Abluft rückgewonnene Wärme wird anschließend über einen Solekreislauf in einen 700 l Wärmespeicher (Puffer 2) gespeichert. Von dort aus wird eine Sole-Wasser-WP der Firma Stiebel Eltron (Modell: WPF-13) versorgt, welche bei B0/W35 nach EN 14511 eine Wärmeleistung von 13,21 kW erzeugt. Anschließend strömt das erwärmte Heizwasser in einen 1.000 l Wärmespeicher (Puffer 3). Über eine gesteuerte Umwälzpumpe wird das Heizwasser von Puffer 3 im zentralen Wärmespeicher gesammelt. Thermische Kennwerte werden über verbaute WMZ ermittelt. Der Ausschnitt aus dem Hydraulikschema für die Abluftwärmerückgewinnung ist in Abbildung 33 ersichtlich.

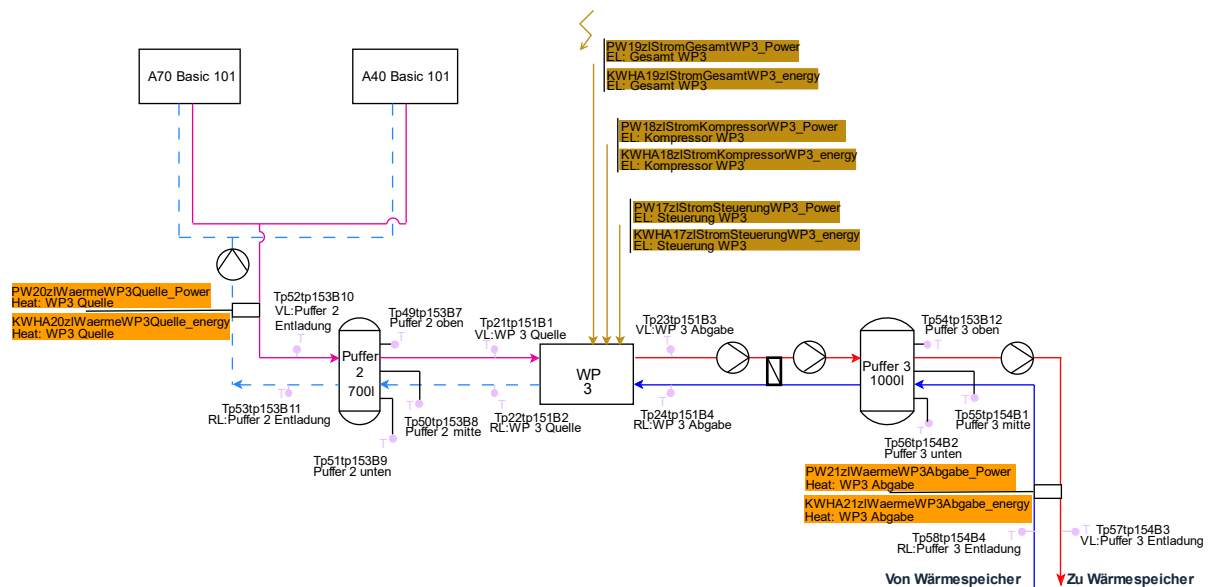
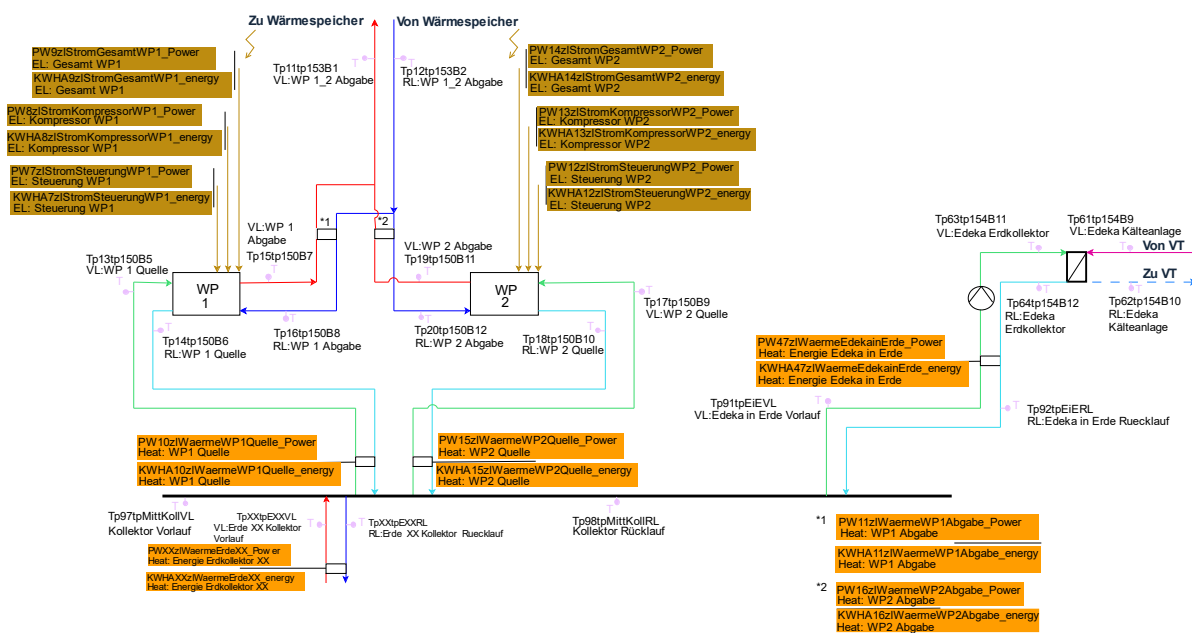


Abbildung 33 Hydraulisches Schaltbild WP AWRGA mit Messsensoren (schematisch)

## Wärmepumpen mit Quelle Großkollektoranlage

Als weiterer Wärmeerzeuger ist unterhalb des Gebäudes puls<sup>G</sup> (unterhalb der Tiefgarage) eine GKA verbaut. Über 13 EWK wird geothermische Energie aus dem Untergrund entzogen. Gesammelt wird die thermische Energie in einem Verteilerrohr, welches mit zwei Wasser-Wasser-WP der Firma Stiebel Eltron (Modell: WPF 66) verbunden ist. Diese stellen bei B0/W35 nach EN 14511 jeweils eine Wärmeleistung von 67,10 kW bereit. Diese erhöhen die Temperatur des Heizungswassers und führen es wieder in den zentralen Wärmespeicher zurück. Zudem ist an das Verteilerrohr die Passivkühlung des Gewerbes (in Richtung Beletage) als auch die Einspeisung von Abwärme des VT in die GKA angeschlossen. Über mehrere WMZ wird zum einen die Wärmeenergie der WP, die Kälteenergie für die Kühlung der Gewerbeeinheiten und die Einspeiseenergie des VT gemessen. Der Ausschnitt aus dem Hydraulikschema ist dabei in Abbildung 34 ersichtlich.



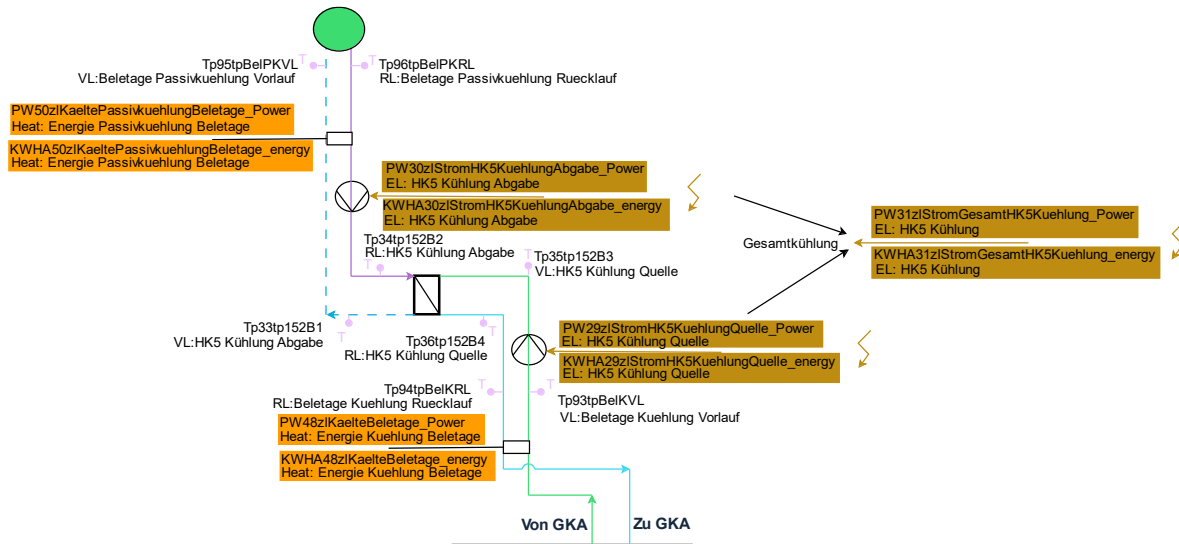


Abbildung 35 Hydraulisches Schaltbild Passivkühlung mit Messsensoren (schematisch)

### Zentraler Wärmespeicher

Alle Erzeuger speisen in den bereits erwähnten 10.000 l, zentralen Wärmespeicher ein, welcher aus vier einzelnen jeweils 2.500 l Wärmespeichern besteht. Die einzelnen Wärmespeicher sind hydraulisch gekoppelt, sodass die Reihenschaltung wiederum zu einem großen Wärmespeicher führt. Erwärmtes Heizungswasser wird dabei in den ersten („obersten“) Wärmespeicher eingeleitet. Kühles Heizungswasser wird aus dem letzten („untersten“) Wärmespeicher entnommen und in den Erzeugerkomponenten erwärmt. Die Verbraucher entnehmen aus dem ersten Wärmespeicher. Der Ausschnitt aus dem Hydraulikschema ist in Abbildung 36 verdeutlicht.

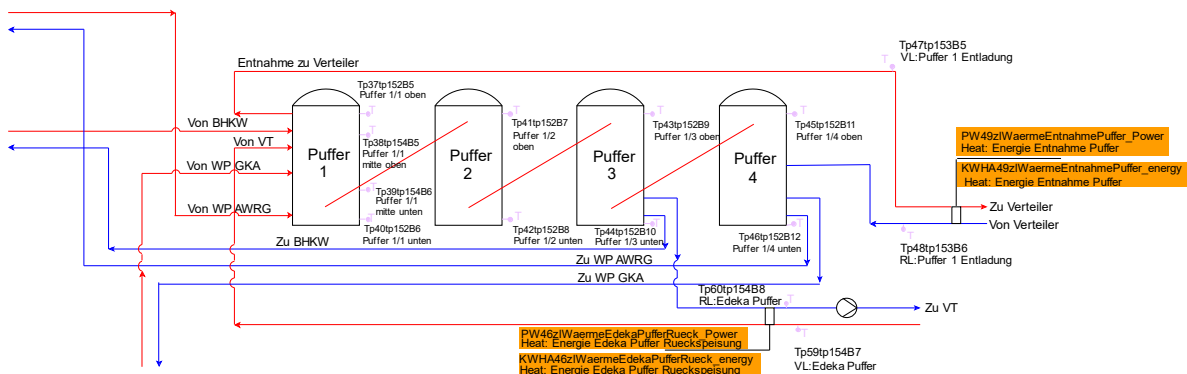


Abbildung 36 Hydraulisches Schaltbild Wärmespeicher mit Messsensoren (schematisch)

## Verteiler zu Verbrauchern

Das Verteilrohr zu den Verbrauchern verteilt das erwärmte Heizungswasser auf die Verbraucher „Heizkreis Kellertemperierung“, „Heizkreis Büroflächen+Wohnungsstationen“ und „Heizkreis Vollsortimenter“. Der Ausschnitt aus dem Hydraulikschema mit dem Verteilrohr zu den Verbrauchern ist in Abbildung 37 zu sehen. Der „Heizkreis Kellertemperierung“ sorgt für die Temperierung der Kellerabteile und der Räume mit den Waschmaschinen der Bewohnenden. Der „Heizkreis Büroflächen+Wohnungsstationen“ versorgt die in der Beletage vorhandenen 7 Gewerbeeinheiten sowie die vermieteten 66 Wohnungen, welche in den Obergeschossen 2 bis 6 des Gebäudes untergebracht sind. Mithilfe von „Heizkreis Vollsortimenter“ kann der im Erdgeschoss befindliche VT mit Wärmeenergie versorgt werden. Dieser Fall ist jedoch nur nötig, falls dieser eine Leistungsspitze in seiner Energiebereitstellung erfährt, sodass diese Spitzenlast über vorhandene Energie im zentralen, 10.000 l Wärmespeicher ausgeglichen werden kann. Abweichend zu den ursprünglichen Plänen des Forschungsvorhabens +EQ-Net befindet sich bei Heizkreis 1 („Lufterhitzer“) die Anbindung zu einer Luft-Wasser-WP, welche nachträglich am Jahresende 2020 eingebaut wurde. Diese war in den Plänen von +EQ-Net nicht vorgesehen.

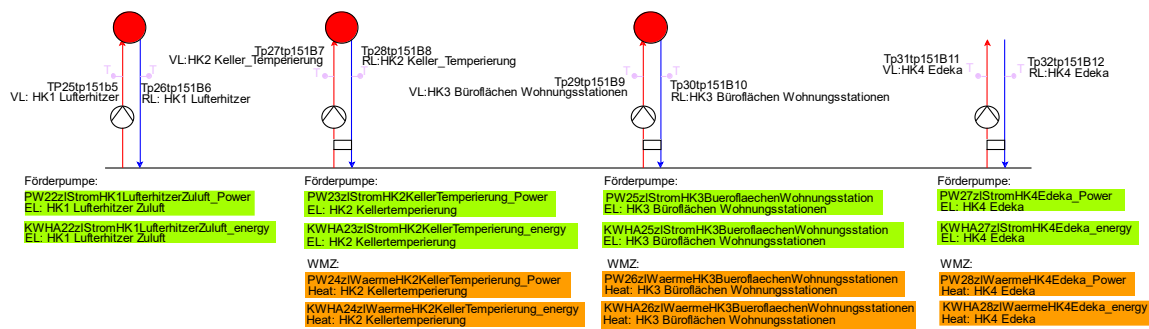


Abbildung 37 Hydraulisches Schaltbild Verteiler mit Messsensoren (schematisch)

## Luft-Wasser-Wärmepumpen

Abweichend zum Hydraulikschema aus +EQ-Net befindet sich am Verteiler eine Anbindung zu zwei Luft-Wasser-WP, welche nachträglich Ende des Jahres 2020 eingebaut wurden. Der Ausschnitt aus dem Hydraulikschema mit den nachträglich eingebauten Luft-Wasser-WP ist in Abbildung 38 dargestellt. Hintergrund dieser Maßnahme, welche außerhalb der Laufzeit des Forschungsvorhabens von +EQ-Net erfolgte, war eine unzureichende Betriebsweise der multivalenten Anlagentechnik. Infolge zu geringer Abstimmung der Komponenten befürchtete man eine Unterversorgung des Gebäudes puls<sup>G</sup> mit Wärmeenergie während des Winters 2020/2021.

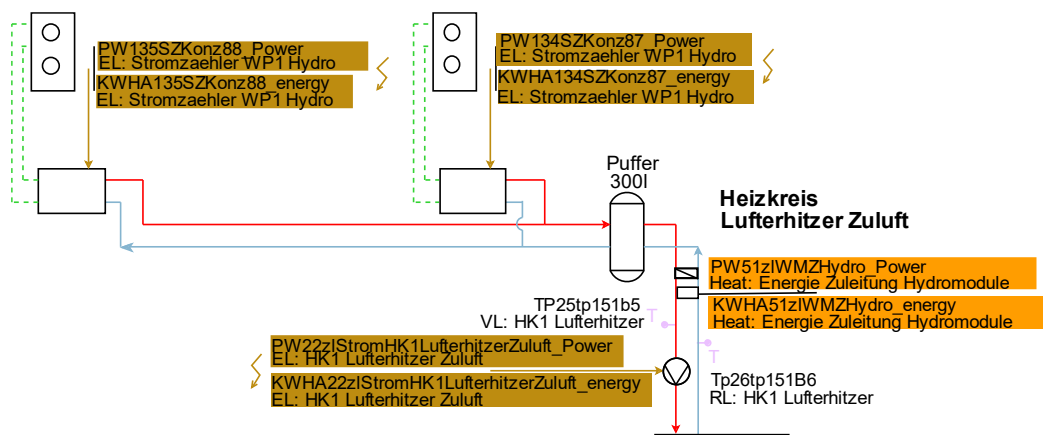


Abbildung 38 Hydraulisches Schaltbild Luft-Wasser-WP mit Messsensoren (schematisch)

Verbaut wurden zwei Außeneinheiten (Modell: PUHZ-SHW 230YKA) und zwei Luft-Wasser-WP (Modell: Hydromodul ERSE-MEC) des Herstellers Mitsubishi. Jeweils wird damit eine Wärmeleistung von 13,2 kW generiert.

Die von den WP erzeugte Wärme strömt in einen 300-Liter-Wärmespeicher (Puffer 300l) als Zwischenspeicher. Von dort aus wird über eine Förderpumpe das Heizwasser in einen Wärmetauscher geleitet, wo auf der Sekundärseite ein Teil des RL vom Hauptheizungsverteiler erwärmt wird. Das erwärmte Heizungswasser strömt anschließend wieder in den Hauptheizungsverteiler und vermischt sich mit dem Heizungswasser kommend vom 10.000 l Wärmespeicher.

Hintergrund für den zwischengeschalteten Wärmetauscher sind unterschiedliche Druckstufen zwischen Hydromodule und Hauptheizungsverteiler. Für eine Druck- und damit Systemtrennung ist ein Wärmetauscher nötig.

Die WP dienen lediglich einer Notversorgung, wenn zu besonders kalten Tagen die bereits verbaute Anlagentechnik nicht ausreicht. Im Bearbeitungszeitraum des Projektes +EQ-Net II sind diese WP nicht in Betrieb gewesen.

### **Gewerbeeinheiten**

Die 7 Gewerbeeinheiten in der Beletage setzen sich aus Mietern unterschiedlicher Branchen zusammen. So befinden sich darin Ärzte und Büros von Dienstleistungsunternehmen. In der Gewerbe-Etage wurde neben der Beheizung eine Passivkühlung über eine Kühldecke verwirklicht. Diese Kühldecke dient im Sommer dazu, eine angemessene Raumklimatisierung zu erzeugen. Die Kühldecke wird über einen Kühlwasserkreislauf versorgt, welcher über Wärmetauscher mit dem Verteilerrohr der GKA verbunden ist. Das Kühlwasser nimmt somit zur Kühlung der Innenräume während der Sommermonate Wärmeenergie auf und überträgt diese wiederum an die GKA. Die EWK der GKA können dadurch regenerieren, indem diese in den Sommermonaten verstärkt Wärme einspeichern. Diese Wärme kann in den Wintermonaten zur Beheizung des Gebäudes benutzt werden. Eine Energieverschiebung von Sommer in den Winter ist damit ermöglicht.

### **Wohnungen**

In den Obergeschossen 2 bis 6 befinden sich 66 Wohneinheiten mit 1- bis 4-Zimmer-Wohnungen. Die Wohnflächen betragen zwischen ca. 32 m<sup>2</sup> und 135 m<sup>2</sup>. Über den Heizungsstrang abgehend vom Verteiler für die Wohnungen (Heizkreis „Büroflächen+Wohnungsstationen“, vgl. hierzu Abbildung 37) werden neben den Büroflächen (die Gewerbeeinheiten) auch die dezentralen Wohnungsstationen mit Wärmeenergie versorgt. Jede Wohnung besitzt eine Übergabestation (Wohnungsstation) zur Versorgung der Fußbodenheizung als auch der Erwärmung des Trinkwassers. Die Wohnungsstation (Modell: WSG-2-Duo) des Herstellers Stiebel Eltron ist in Abbildung 39 abgebildet.



Abbildung 39 Wohnungsstation WSG-2-Duo [25]

Die Funktionsprinzip der Wohnungsstation ist zweigeteilt. In der linken Hälfte der Abbildung zeigt die graue Verkleidung die Abdeckung für einen Wärmetauscher. Dieser Wärmetauscher ist auf der Primärseite mit dem Heizkreis „Büroflächen+Wohnungsstationen“ verbunden. Sekundärseitig ist dort das aufzuwärmende Trinkwasser angeschlossen. Über einen Regler wird

eingestellt, auf welches Temperaturniveau das Trinkwasser beim Austritt aus dem Wärmetauscher angehoben werden soll. Danach richtet sich der Volumenstrom durch den Wärmetauscher auf der Primärseite vom Heizkreis „Büroflächen+Wohnungsstationen“. Je nach Nutzerverhalten kann jedoch eine noch höhere Temperatur als Zapftemperatur eingestellt werden. Dies geschieht über einen elektrischen Durchlauferhitzer (DLH), der den restlichen Temperaturhub ermöglicht. Diesen „letzten“ Temperaturhub für die gewünschte Zapftemperatur kann der Nutzende/Mietende über eine Fernbedienung in 0,5°C-Schritten selbst einstellen. Hintergrund dieser Technologie ist es, geringe Temperaturen im Heizkreis „Büroflächen+Wohnungsstationen“ zu erreichen und Verteilverluste zu reduzieren. Des Weiteren ist eine niedrige VL-Temperatur im Heizkreis vorteilhaft für die Einbindung regenerativer Energien. Gleichzeitig hat der Nutzende keine Komforteinbußen.

### **Wetterstation**

Für eine weitergehende Untersuchung des energetischen Verbraucherverhaltens sowie einer tiefergreifenden Analyse der EWK ist eine Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes puls<sup>G</sup> anzubringen. In der Ausgangssituation wird nur die Außentemperatur im Jahresverlauf erhoben. Eine Unterteilung in Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Wind ist nicht vorhanden, obwohl diese meteorologischen Gegebenheiten einen großen Einfluss auf das Verhalten des Nutzers bezüglich dessen Abfrage an elektrischer sowie thermische Energie haben. Um Korrelationen bezüglich Meteorologie und Energieverbrauchskennwerte des Gebäudes zu erzielen, wird der Einbau einer Wetterstation angestrebt und empfohlen.

Nach eingehender Marktrecherche und Angebotseinholung konnte sich auf eine Wetterstation der Firma Lambrecht über den Vertriebspartner greenap solutions verständigt werden. Diese Wetterstation besteht aus den Komponenten für die Grundeinheit:

- Windrichtungssensor
- Windgeschwindigkeitssensor
- Temperatur-Feuchte-Sensor
- Niederschlagssensor
- Luftdrucksensor
- Pyranometer

Die elektrische Versorgung der Messeinheiten mit Datenlogger erfolgt über ein integriertes Solarmodul mit Batteriespeicher.

Als Erweiterung ist ein Pyrgeometer mit einer für wissenschaftliche Zwecke genügende Auflösung angebaut, sodass die langwellige Himmelgegenstrahlung sowohl am Tag als auch in den Nachtstunden gemessen werden kann.

Aufgebaut auf dem Dach des Gebäudes puls<sup>G</sup> wurde sie nach Lieferverzögerungen Anfang Mai 2023. Anschließend wurde über Testläufen deren Funktionalität geprüft.

Die aufgebaute Wetterstation ist in Abbildung 40 zu sehen.



Abbildung 40 Aufgebaute Wetterstation auf dem Dach von puls<sup>G</sup>

### 1.2.2.2 Detailanalyse des Betriebsverhaltens

(THN)

#### Energieverbrauch in den Gewerbeeinheiten vom 01.01.2021 bis 31.07.2024

Der monatliche, thermische Energieverbrauch in den 7 Gewerbeeinheiten ist in XXXX aufgezeigt. Hierin ist sowohl der Wärme- als auch der Kälteverbrauch aufgelistet.

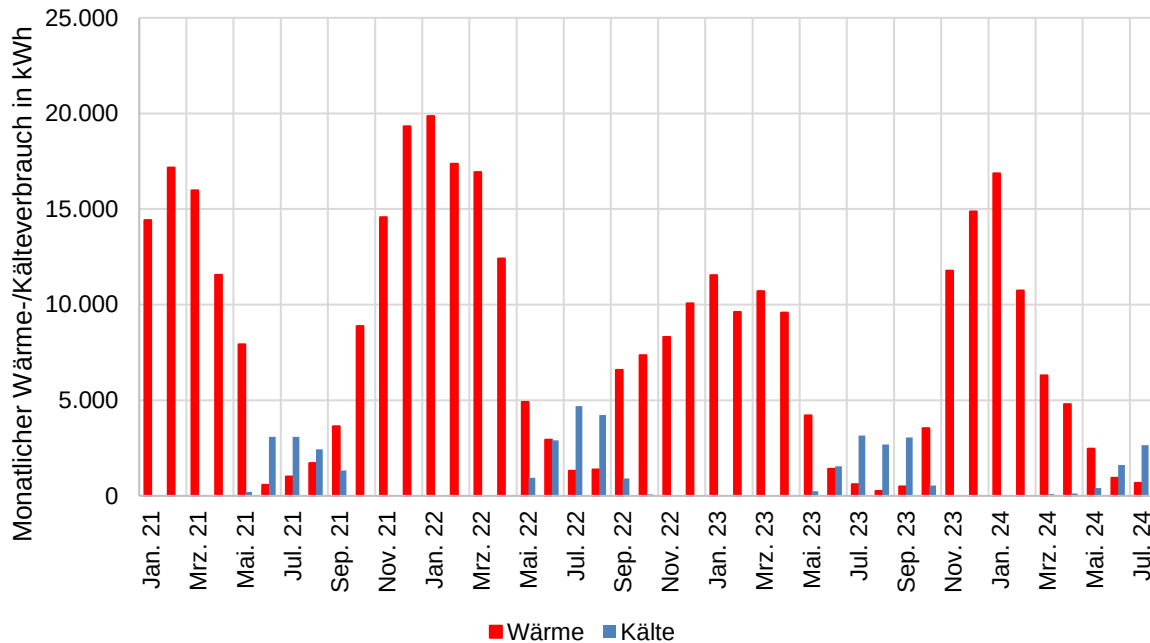


Abbildung 41 Monatlicher Wärme- und Kälteverbrauch in Gewerbeeinheiten

Offensichtlich ist der nur geringe Anteil des Kälteverbrauchs in den Gewerbeeinheiten im Vergleich zum Wärmeverbrauch während der Wintermonate. Der in den Sommermonaten weiterhin vorhandene Sockel für den Wärmeverbrauch, lässt sich der Trinkwarmwasserbereitung zuordnen. Trotz allem liegt der Anteil des thermischen Energieverbrauchs der Gewerbeeinheiten an der gesamten Energieerzeugung im Gebäude für das Jahr 2021 bei 19,5 %, im Jahr 2022 bei 25,2 % und im Jahr 2023 bei 18,4 %.

Den größeren Teil des Energieverbrauchs nimmt der Verbrauch der 66 Wohneinheiten ein, welcher im Folgenden betrachtet werden soll.

### Energieverbrauch in den Wohneinheiten vom 01.01.2021 bis 31.07.2024

Der monatliche thermische als auch elektrische Energieverbrauch bei den 66 Wohnungen ist in Abbildung 42 dargestellt. Der elektrische Energieverbrauch ist der von den Wohnungen beanspruchte Haushaltsstrom (inkl. der elektrischen Energie für den DLH der Wohnungsstationen).

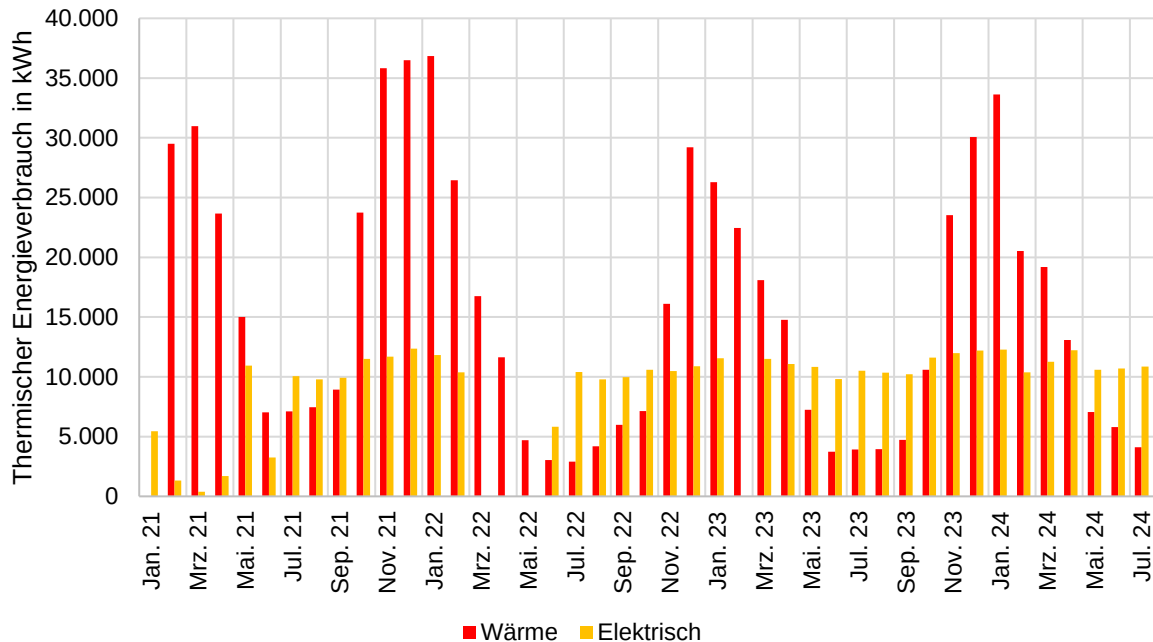


Abbildung 42 Monatlicher Energieverbrauch in Wohnungen

Wie in diesem Diagramm ersichtlich ist der monatliche thermische Energieverbrauch in den Wohnungen saisonal schwankend. In den Sommermonaten bleibt ein gewisser Anteil übrig, welcher für die Trinkwarmwasserbereitung nötig ist. Aufgrund einer Messlücke, welche aufgrund eines Netzwerkausfalls verursacht wurde, gibt es bei den Wohnungen im Januar 2021 nur unzureichende Aufzeichnungen. Ein Ausfall der Messdatenaufzeichnung für den elektrischen Verbrauch ist auch von März 2022 bis Mai 2022 zu verzeichnen. Diese Daten sind in diesem Zeitraum verloren. Dennoch zeigt sich bei Vergleich des monatlichen Verbrauchs des Wohnungsstroms in den Jahren 2021, 2022 und 2023 ein nahezu konstanter Verlauf. Lediglich während der Sommermonate ist ein leichter Rückgang des elektrischen Verbrauchs zu erkennen. Grund für diesen Trend ist vermutlich infolge längerer Sonnenstunden und der damit niedrigeren Beleuchtungszeiten in den Wohnungen zu finden.

Im Vergleich zum geringen Anteil der Gewerbeeinheiten liegt der monatliche Energieverbrauch der Wohnungsstationen in Spitze bei bis zu 60 %.

### **Kellertemperierung**

Ein weiterer Verbraucher im Gebäude puls<sup>G</sup> ist die Kellertemperierung, welche in Spitze einen Anteil von ca. 6 % inne hat. Infolge einer Anpassung der Regelung im August 2022 und September 2022 wurde die Einschaltbedingung für die Kellertemperierung zum einen abgesenkt, da bemerkt wurde, dass die Kellertemperierung auch in den Sommermonaten in Betrieb war, sobald die Außentemperatur 19°C unterschreitet. Nach weiteren Analysen wurde die Kellertemperierung im Dezember 2022 komplett abgeschaltet, da sich zeigte, dass diese für die Temperierung der Kellerbereiche nicht nötig ist.

### **Energieaustausch mit dem Vollsortimenter vom 01.01.2021 bis 31.07.2024**

Wie in vorherigen Abschnitten (vgl. hierzu Kapitel 1.2.2.1) geschildert, gibt es drei Schnittstellen in Richtung VT zum Austausch von Energie.

Da der Austausch über die Schnittstellen bzw. Übergabestationen erst im Laufe des Jahres 2020 in Betrieb genommen wurde, gibt es für die Analyse erst ab 2021 eine verlässliche Datenbasis. In Abbildung 43 sind die Energiemengen der monatlich ausgetauschten Energien von Januar 2021 bis Juli 2024 dargestellt.

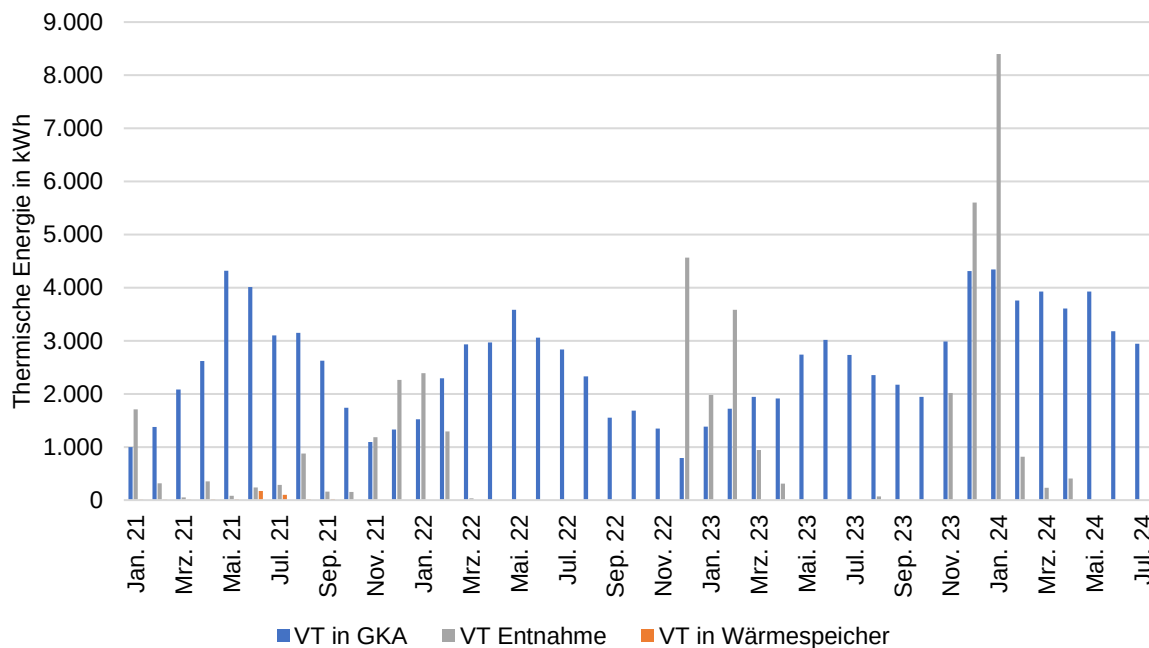


Abbildung 43 Monatlich ausgetauschte Energiemengen mit VT

Wie im Diagramm dargelegt, sind die ausgetauschten Energiemengen aufgeteilt in „VT in GKA“, „VT in Wärmespeicher“ und „VT Entnahme“. Die Kategorie „VT in GKA“ repräsentiert die Energie, die durch Abwärme von der Kälteanlage des VT in die GKA eingespeichert wird. „VT in Wärmespeicher“ ist die Energie, die bei Freigabe vom Wärmespeicher des VT direkt in den zentralen, 10.000 l Wärmespeichers des Gebäudes puls<sup>G</sup> eingespeist wird. Außerdem meint „VT Entnahme“ eine Energie, welche der VT direkt aus dem 10.000 l Wärmespeichers entnimmt, um seine Lastspitzen zu decken.

Im Diagramm ist zu erkennen, dass der Betrag der monatlich übertragenen Energie in die GKA zum Sommer hin zunimmt. Dieses Verhalten ist darin begründet, da der VT selbst einen geringeren Energiebedarf hat als in den Wintermonaten, weil die Beheizung der Verkaufsflächen nicht aktiv ist. Diese Energiemenge nimmt zum Winter hin wieder ab, wodurch der Eigenverbrauch ansteigt. Genau gegensätzlich verhält sich die Menge an Energie, die direkt aus dem 10.000 l Wärmespeicher zum Wärmespeicher des VT geleitet wird („VT Entnahme“). In den Wintermonaten steigt der Verbrauch des VT, sodass gewisse Lastspitzen wiederum vom Wärmespeicher des Gebäudes puls<sup>G</sup> gedeckt werden müssen. Der Betrag an Energie, welche direkt vom Wärmespeicher des VT in den 10.000 l Wärmespeicher eingespeist wird, ist dennoch vernachlässigbar niedrig.

Die kumulierten, ausgetauschten Energiemengen zwischen Gebäude puls<sup>G</sup> und VT über die Projektlaufzeit sind im

Abbildung 44 visualisiert.

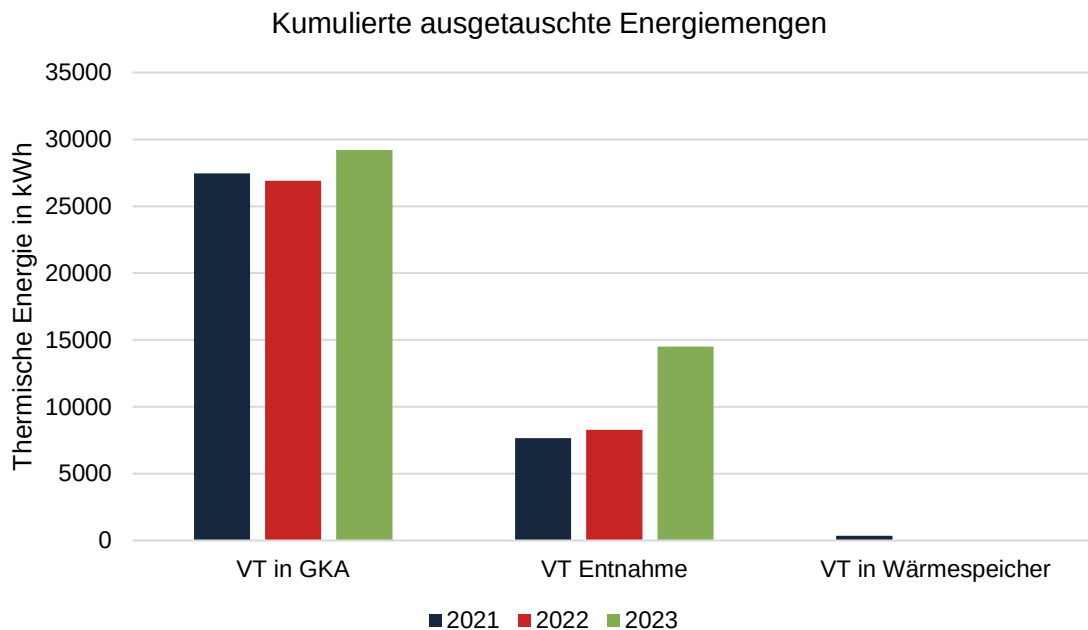


Abbildung 44 Ausgetauschte Energiemengen zwischen Gebäude puls<sup>G</sup> und VT (kumuliert)

Über eine erste Abstimmung mit dem Eigentümerkonzern des VT konnte sich im Januar 2022 auf eine verbesserte Einspeisung vom VT in die GKA verständigt werden. Aufgrund fehlender Messpunkte, welche nach Gesprächen im vorherigen Forschungsvorhaben nicht installiert wurden, konnte die Einspeisung vom Wärmespeicher des VT in den Wärmespeicher des Gebäudes nicht umgesetzt werden.

Nach erfolglosen Versuchen von Seiten der THN zur Kontaktaufnahme im Jahr 2023 mit der Eigentümergesellschaft des VT für die Besprechung des weiteren Vorgehens und Aufbau einer Kooperation zum Austausch von Messdaten sowie der Optimierung der Schnittstelle „VT in Wärmespeicher“ kann diese Schnittstelle nicht aktiv gesteuert werden.

### **Analyse der Systemvolumenströme**

Bei Analyse der verbraucherseitigen Volumenströme durch den Wärmetauscher der jeweiligen Wohnungsstationen ergeben sich große Unterschiede. Als Kenngröße zur Beurteilung der Volumenströme wird der durchschnittlich, spezifische Volumenstrom für die abgenommene Wärmeleistung der jeweiligen Wohnungsstation herangezogen. Dieser Kennwert ist der Quotient aus dem durchschnittlichen Volumenstrom durch den Wärmetauscher der Wohnungsstation zur abgenommenen, durchschnittlichen Wärmeleistung.

$$\text{Spez. Volumenstrom} = \frac{\text{Volumenstrom je Wärmetauscher}}{\text{Abgenommene Wärmeleistung}}$$

Der Untersuchungszeitraum ist über ein Jahr betrachtet vom 01.01.2021 bis 31.12.2021 in Abbildung 45 dargestellt.

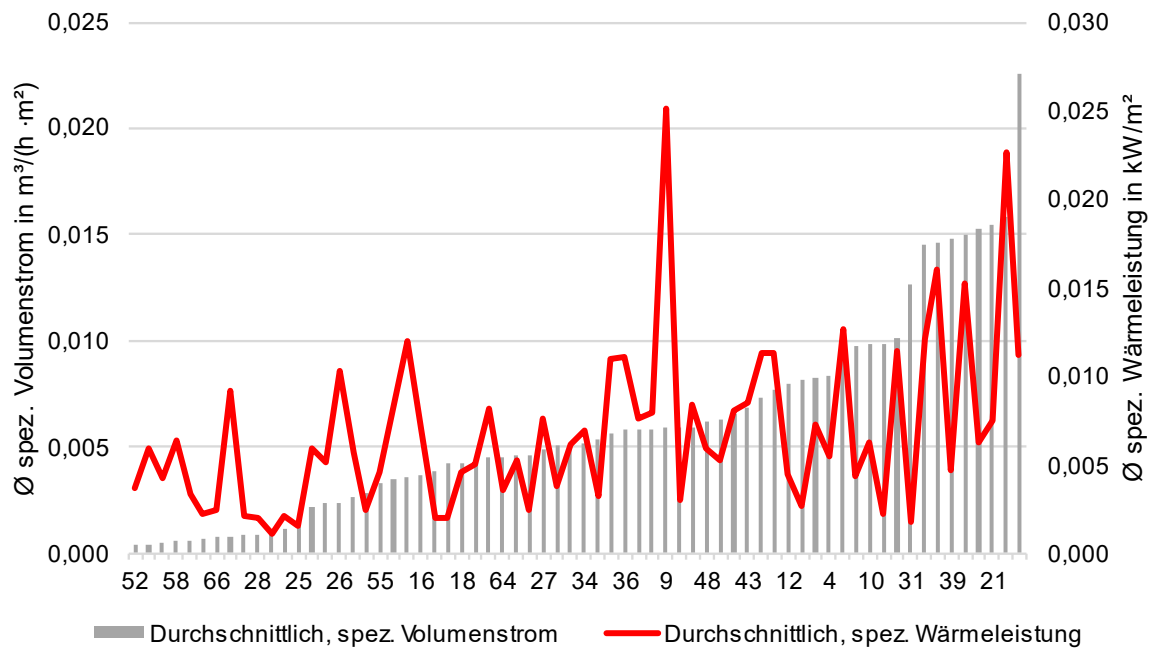


Abbildung 45 Spez. Volumenströme und spez. Wärmeleistungen über Wohnungen

Wie im Diagramm zu erkennen, gibt es eine hohe Diskrepanz zwischen Wohnungen mit niedrigen spez. Volumenströmen und solchen, die einen hohen spez. Volumenstrom aufweisen (graue Balken). Von noch höherer Bedeutung ist die abgenommene Wärmeleistung. So zeigen Wohnungen mit einer ähnlichen durchschnittlichen Wärmeleistung unterschiedlich hohe spez. Volumenströme auf. Beispielhaft seien Wohnung 58 und Wohnung 10 nebeneinander zu setzen. Beide Wohnungen zeigen im Untersuchungszeitraum einen ähnlich hohen spez. Wärmeverbrauch. Der durchschnittliche, spez. Volumenstrom liegt jedoch bei Wohnung 58 bei ca.  $0,001 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  und bei Wohnung 10 bei ca.  $0,01 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ .

Detailliert kann dieses jeweilige Verhalten in der Gegenüberstellung dieser beiden Wohnungen analysiert werden (vgl. hierzu Abbildung 46 für Wohnung 58 und Abbildung 47 für Wohnung 10).

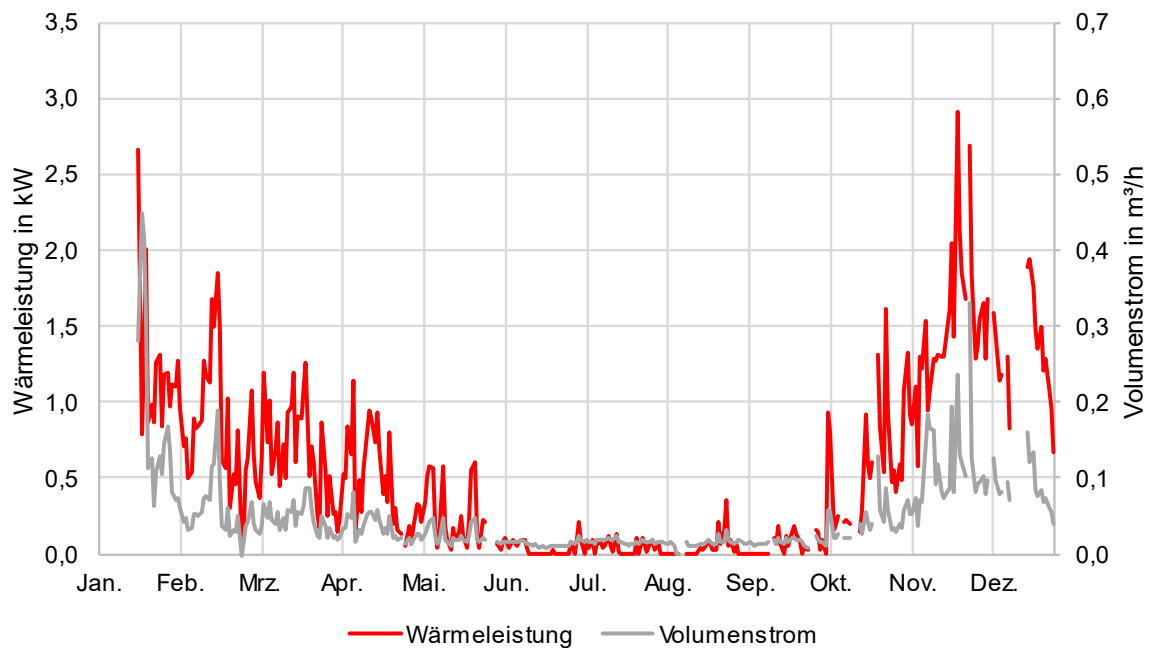


Abbildung 46 Verlauf Wärmeleistung und Volumenstrom bei Wohnung 58 im Jahr 2021

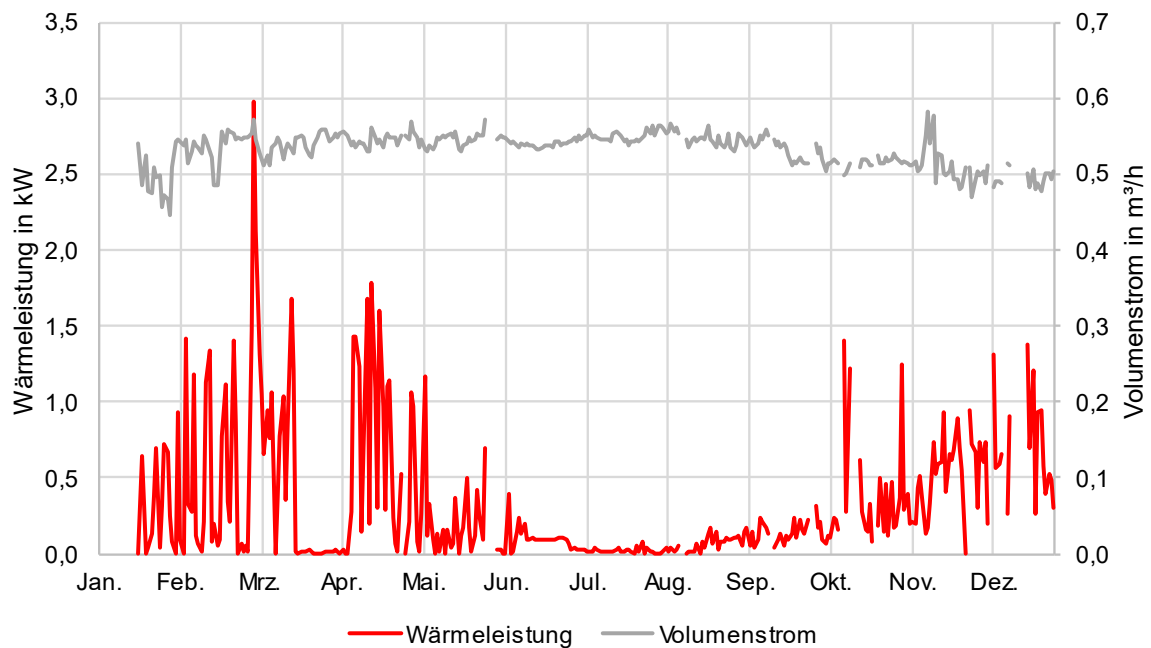


Abbildung 47 Verlauf Wärmeleistung und Volumenstrom bei Wohnung 10 im Jahr 2021

Nachdem über die Wohnungsstation auch die Fußbodenheizung gesteuert wird, zeichnet der zugehörige WMZ sowohl den Wärmestrom für die Raumbeheizung als auch für die Trinkwarmwasserbereitung auf. Die Wohnung 58 zeigt während der Wintermonate eine hohe Abnahme an Wärmeenergie, die zu den Sommermonaten stetig abnimmt. Gleichsinnig nimmt der Volumenstrom, der als Heizwasser durch die Wohnungsstation fließt, stetig ab. Lediglich ein geringer Anteil strömt auch während der Sommermonate durch die Wohnungsstation, was aber

herstellerbedingt nötig ist, um eine gewisse Grunderwärmung des Wärmetauschers der Wohnungsstation zu gewährleisten.

Wohnung 10 zeigt bezüglich der Wärmeabnahme ein ähnliches Verhalten – hohe Abnahme im Winter, geringe im Sommer. Der erhebliche Unterschied stellt sich jedoch im Volumenstrom dar, der über das Jahr hinweg nahezu auf einem konstanten Niveau verharrt. Es erfolgt keine Anpassung des Volumenstroms an Heizwasser durch die Wohnungsstation infolge einer adaptierten Ventilstellung außerhalb des Heizzeitraums.

Diese Ursache eines nahezu konstanten Volumenstroms auf sehr hohem Niveau sorgt für die hohe Diskrepanz zwischen den Wohnungen mit einem niedrigen spez. Volumenstrom zu Wohnungen mit einem sehr hohen spez. Volumenstrom bei nahezu identischer Wärmeabnahme (siehe Abbildung 45).

Aus diesen Ergebnissen heraus werden eine Überprüfung und Einstellung der Wohnungsstationen empfohlen. Diese konnte in Absprache mit EREA und dem Hersteller im nächsten Abschnitt behandelt werden.

### 1.2.2.3 Umsetzung der Optimierung

(THN, EREA)

#### Überprüfung und Einstellung der Wohnungsstationen

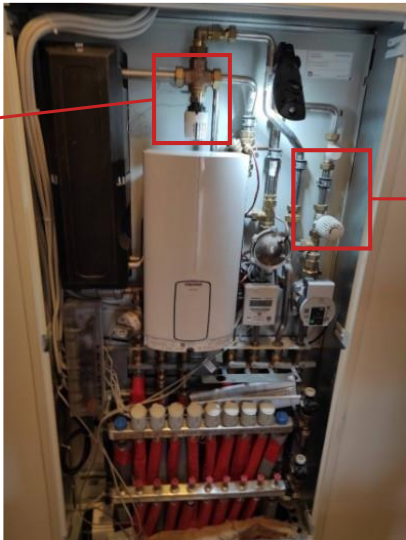
Durch mehrere Absprachen, Lösungsdiskussionen zwischen EREA, THN und dem Hersteller der Wohnungsstation und anschließender Terminvereinbarungen wurden im Januar 2022 als auch im Mai 2023 (abgeschlossen im August 2023) alle Wohnungsstationen anhand ihrer Ventilstellungen überprüft.

Die Wohnungsstationen besitzen zwei Temperaturventile, eines für die Trinkwarmwasserbereitung und eines für die Fußbodenheizungsregelung, die getrennt voneinander auf das richtige Systemtemperaturniveau eingestellt werden müssen. Die einzustellenden Ventilstufen sowohl für die Trinkwarmwasserbereitung als auch für die Fußbodenheizung mit den Vorgaben des Herstellers sind in der Abbildung 48 verdeutlicht.

**Für Trinkwarmwasser**  
Vorgefunden: Stufe > 7  
Optimal: Stufe 4,5

| Skalierung | Temperaturregler TF5<br>(Regelbereich 30-50 °C) | Bemerkungen               |
|------------|-------------------------------------------------|---------------------------|
| 1          | 30                                              |                           |
| 2          | 32                                              |                           |
| 3          | 34                                              |                           |
| 4          | 37                                              | empfohlene Einstellung:   |
| 5          | 39                                              | zwischen Position 4 und 5 |
| 6          | 41                                              |                           |
| 7          | 43                                              |                           |
| 8          | 46                                              |                           |
| 9          | 48                                              |                           |
| 10         | 50                                              |                           |

Auszug aus der Betriebsanleitung



**Für Fußbodenheizung**  
Vorgefunden: Stufe > 8  
Optimal: Stufe 6

| Skalierung | Temperaturregler<br>(Regelbereich 20-50 °C) |
|------------|---------------------------------------------|
| 1          | 20                                          |
| 2          | 23                                          |
| 3          | 27                                          |
| 4          | 30                                          |
| 5          | 33                                          |
| 6          | 37                                          |
| 7          | 40                                          |
| 8          | 43                                          |
| 9          | 47                                          |
| 10         | 50                                          |

Auszug aus der Betriebsanleitung

Abbildung 48 Einzustellende Ventile an Wohnungsstation mit optimalen Werten

Bei Prüfung hat man bei der Trinkwarmwasserbereitung eine Ventilstellung von >7 vorgefunden, obwohl Stufe ca. 4,5 optimal wäre. Dieser Missstand konnte im ersten Halbjahr 2022 behoben werden. Infolge der weiteren Maßnahme im Mai 2023 hat man am Ventil für die Fußbodenheizung eine Ventilstellung >8 vorgefunden. Bei diesem eingestellten Temperaturniveau schließt das zugehörige Ventil auch bei ausgeschalteter Fußbodenheizung nicht komplett. Auch wenn die darunter befindliche Förderpumpe zur Durchströmung der Fußbodenheizung ausgeschaltet ist, erzeugt der Systemdruck im Gebäude eine Durchströmung durch das Ventil. Erst bei richtiger Einstellung auf die Stufe 6 konnte messbar, als auch hörbar der Volumenstrom unterbunden werden.

Für Dokumentationszwecke ist von der THN in Zusammenarbeit mit EREA eine Einstell- und Betriebsanleitung für die Wohnungsstation WSG-2-Duo angefertigt worden (vgl. hierzu Anhang A.1).

Des Weiteren wurden die Bewohnenden mithilfe von Informationsflyern über die Einstellmöglichkeiten und der Handhabung der Fernbedienung des elektrischen DLH aufgeklärt (siehe Anhang A.2).

### **Einbau von Temperatursensoren in Tiefgarage und Kellerbereiche**

Nach ersten Untersuchungen ist zu vermuten, dass die Tiefgaragentemperatur einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Regeneration der GKA hat, da diese direkt unterhalb der Bodenplatte liegen. Eine Aufzeichnung dieser Messgröße ist damit essenziell für die Untersuchung der Performance der EWK, v.a. ist dies ein entscheidender Faktor für die simulative Analyse der GKA. Nachdem es bisher keine messtechnische Aufzeichnung dieser Temperaturen gibt, wurden Temperaturmessgeräte nachgerüstet.

Insgesamt wurden in der Tiefgarage als auch in den Kellerabteilen 8 Bereiche definiert, in denen Temperatursensoren abgebracht werden sollen. Die Temperatursensoren werden dabei auf eine Höhe von ca. 2,30 m montiert und mit einem Schloss versehen, um Diebstahl zu verhindern. Die Messaufzeichnungen erfolgen nach Einstellung alle 15 Minuten. Die Orte der Temperatursensoren in der Tiefgarage sind im Grundriss der Tiefgarage (siehe hierzu Anhang A.3) und in den Kellerbereichen in Anhang A.4 als Kreise markiert. Je nach baulicher Maßnahme sind die Sensoren dabei entweder an den Mauerwänden oder an den Tragsäulen montiert.

### **Ergebnisse der Temperaturaufzeichnungen in Tiefgarage und Kellerbereiche**

Die Messdaten der Temperatursensoren TEMP01 bis TEMP06 aus Anhang A.3 (angebracht in der Tiefgarage) sind in folgender Abbildung 49 visualisiert.

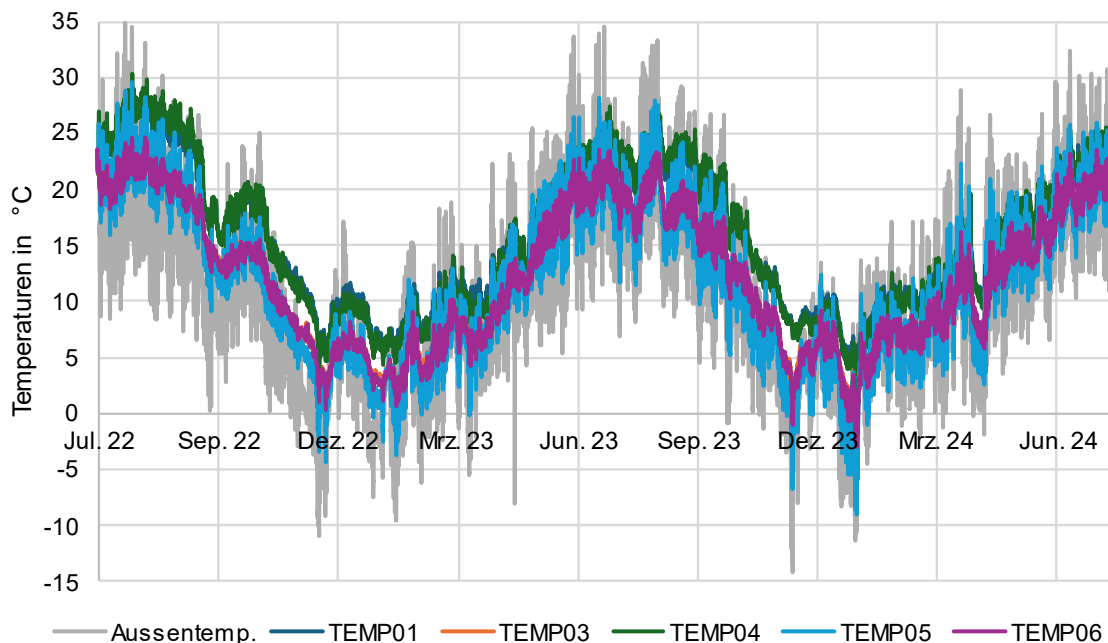


Abbildung 49 Temperaturverlauf bei TEMP01 bis TEMP06 in Tiefgarage

Es zeigt sich, dass der Verlauf der Temperatur in der Tiefgarage an den verschiedenen Stellen in der Tiefgarage ähnliche Werte annimmt. Lediglich verzeichnen TEMP01 und TEMP04 höhere Temperaturen als die anderen Sensoren. Der Unterschied, der ca. 2 bis 3 Kelvin beträgt, liegt daran, weil TEMP01 und TEMP04 im Parkplatzbereich der Bewohner verbaut sind. Dieser Bereich der Tiefgarage ist über ein Einfahrtstor abgetrennt vom öffentlichen Bereich der Tiefgarage, der für die Kunden des VT gedacht ist. Im Bewohnerbereich der Tiefgarage sind die

Außeneinheiten der Luft-Wasser-WP verbaut. Somit nutzt die Luft-Wasser-WP ein höheres Temperaturniveau als Quellwärme.

Im Vergleich zur Außentemperatur zeigen die Temperaturen in der Tiefgarage höhere, aber auch weniger schwankende Temperaturverläufe. Grund für diesen Umstand ist die speichernde Gebäudemasse, die Schwankungen abmildert. Der Temperaturverlauf der Tiefgarage folgt weiterhin der Außentemperatur.

Besonders Sensor TEMP05, welcher direkt im Einfahrbereich der Tiefgarage liegt, zeigt die niedrigsten Temperaturen ähnlich der Außentemperatur an. Je weiter nach innen in die Tiefgarage wirkt das Gebäude als Wärmespeicher und mildert die Außentemperaturschwankungen ab.

In Abbildung 50 ist der Verlauf der Außentemperatur zu den Messsensoren in den Kellerbereichen im Gebäude dargestellt (vgl. Anhang A.4). Diese Temperatursensoren sind eine Geschossebene tiefer als die Tiefgarage gelegen.

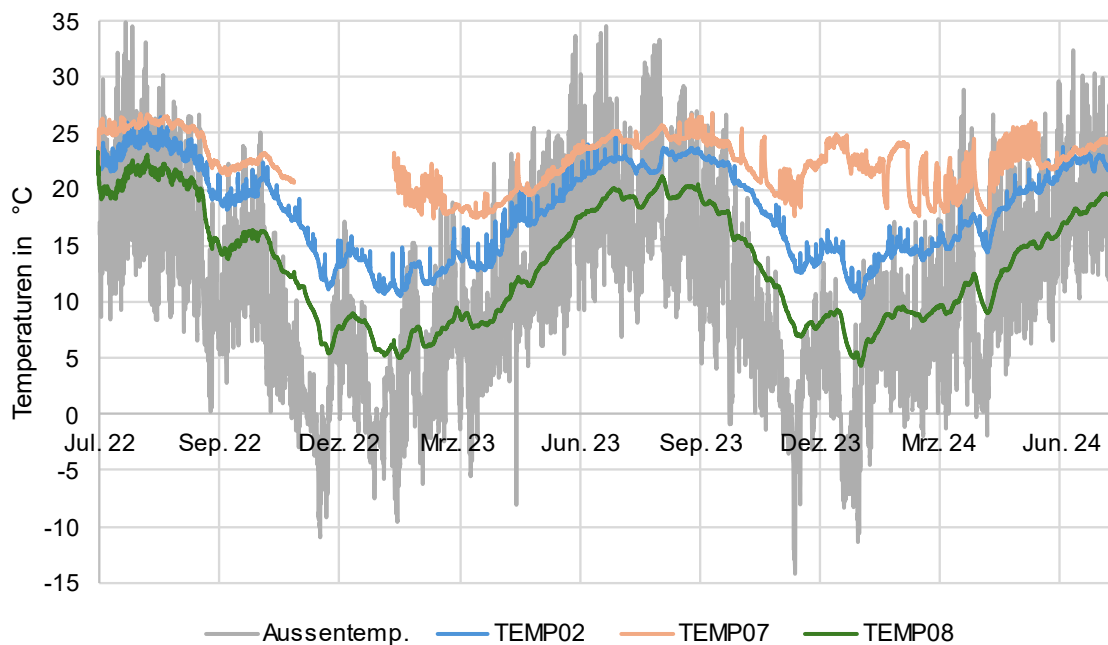


Abbildung 50 Temperaturverlauf bei TEMP02, TEMP07 und TEMP08 in Kellerbereichen

Der Verlauf der Temperaturen eine Ebene tiefer gelegen als die Tiefgarage ist im Vergleich zu Abbildung 48 noch weniger Schwankungen unterlegen. Auch ist das Niveau des Temperaturverlaufs höher als der Verlauf der Außentemperatur. Hintergrund sind das umgebene Erdreich als auch die Gebäudemasse, welche beide eine speichernde Wirkung von Wärme haben.

### Anpassung der Einstellparameter bei den Förderpumpen

Eine Analyse der Energieerzeuger in der Energiezentrale hat gezeigt, dass die verbauten WP GKA immer eine sehr hohe VL-Temperatur auf weit über 53 °C erzeugen, was bei den WP wiederum zu nur mittelmäßigen Arbeitszahlen führt. Zusätzlich ist die Temperaturschichtung im 10.000 l Wärmespeicher nur unzureichend. Nach Gesprächen mit dem Hersteller der WP hat sich ergeben, dass die WP infolge einer bestimmten Quelltemperatur eine bestimmte Wärmeleistung erzeugen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 51 für verschiedene VL-Temperatur verdeutlicht.

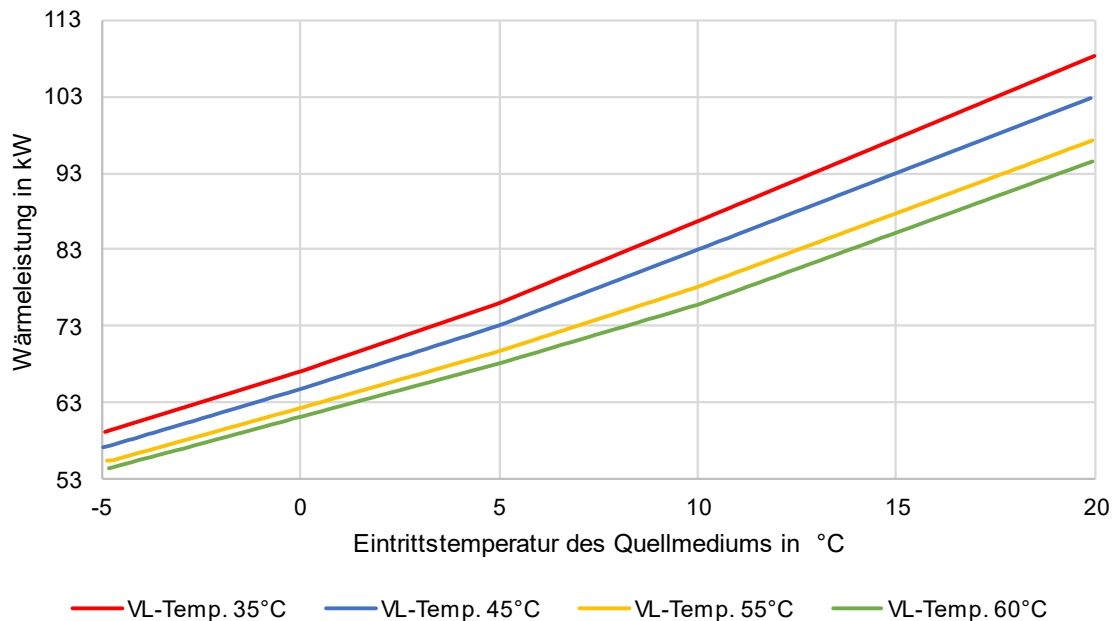


Abbildung 51 Kennlinie WPF 66 (WP GKA) zu Wärmeleistung in Abhängigkeit der Quelltemperatur

Die bereitzustellende VL-Temperatur kann an der WPF 66 nicht eingestellt werden. Hingegen wird das Heizungswasser aus dem Wärmespeicher entnommen und mit seiner RL-Temperatur in Richtung WP geführt; abhängig der Quelltemperatur wird eine Wärmeleistung generiert. Die Wärmeleistung hebt die RL-Temperatur um ein daraus resultierendes Temperaturdelta an. Folglich ist für die Erzeugung niedriger VL-Temperatur bei der WPF 66 entweder eine niedrige RL-Temperatur oder ein höherer Volumenstrom entscheidend. Nachdem die Wohnungsstationen und der Volumenstrom auf der Verbrauchseite verringert wurde, und trotzdem noch hohe VL-Temperatur der WP erzeugt wurden, mussten die Förderpumpe vom Wärmespeicher in Richtung der WPF 66 überprüft werden. Bei Begutachtung zeigte sich, dass die Förderpumpe auf eine minimale Förderhöhe (6,2 m) gestellt ist. Die Förderhöhe wurde auf 10,0 m angehoben, sodass sich auf der warmen Seite der WP das Temperaturdelta von vorher weit über 15 K auf nachher 9 K reduzierte. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Arbeitszahlen, da diese damit nur geringere VL-Temperatur erzeugen müssen. Der Zusammenhang aus VL-Temperatur, Quelltemperatur und Arbeitszahl ist in der Kennlinie des Herstellers angegeben in Abbildung 52.

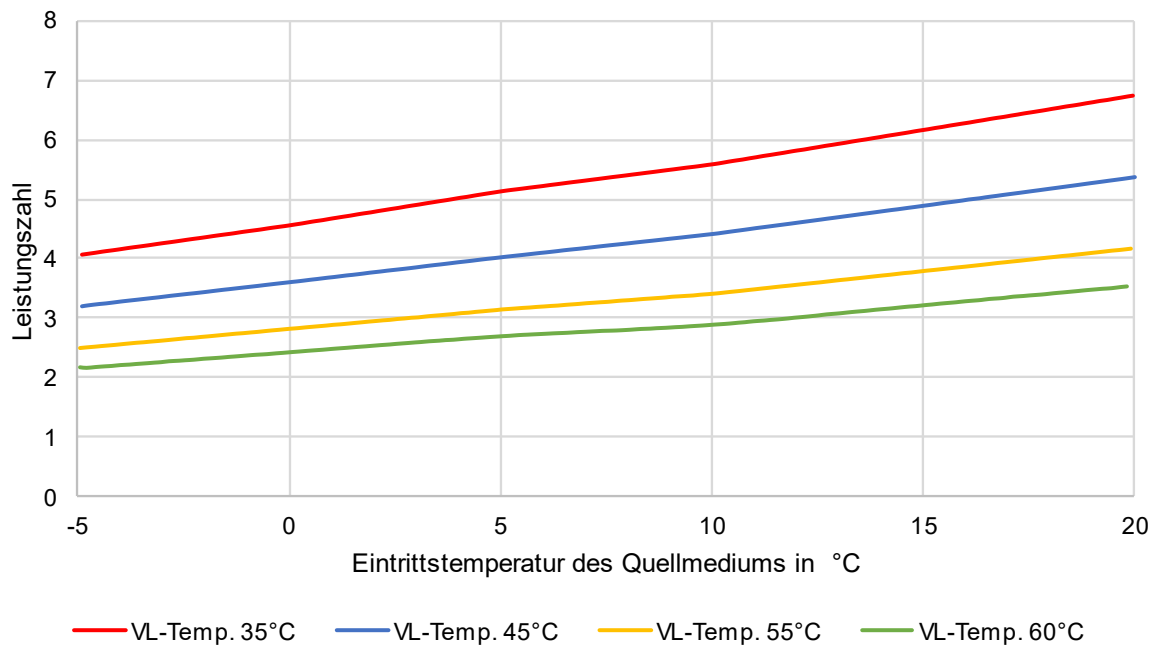


Abbildung 52 Kennlinie Arbeitszahlen WPF 66

Bei weiteren Überprüfungen wurde des Weiteren die Förderpumpe für den Heizkreis „Büroflächen+Wohnungen“ angepasst. Hintergrund für diese Maßnahme ist, da die Förderpumpe über einen konstanten Druck geregelt ist. Selbst bei geschlossenen Ventilen der Wohnungsstationen wird ein hoher Druck von der Förderpumpe in der Energiezentrale erzeugt, welcher nicht nötig ist. Die Förderhöhe wurde reduziert von 10,0 m auf 6,5 m. Der elektrische Energieverbrauch dieser Förderpumpe wird sich erheblich verringern.

Des Weiteren wurde die Förderpumpe für den Quellspeicher der WP AWRGA zur Abluftwärmerückgewinnung von einer Förderhöhe verringert von 10,0 m auf 4,0 m. Grund für diese Maßnahme ist die Generierung niedriger Volumenströme und damit die Erhöhung der Verweildauer der Sole in der AWRGA und der damit einhergehenden weiteren Temperaturerhöhung des Quellspeichers.

### 1.2.2.4 Bewertung der Optimierungsmaßnahmen

(THN)

#### Auswirkung der Optimierungsmaßnahme an den Wohnungsstationen

Zur Analyse der Auswirkung der Einstellmaßnahmen an den Wohnungsstationen seien hier über alle Wohnungen die durchschnittlichen, spezifischen (je m<sup>2</sup> Wohnfläche) Kenngrößen je Monat zu vergleichen. Nach Abbildung 53 ergibt sich der folgende auf die Wohnfläche normierte Volumenstrom von Heizungswasser durch die Wohnungsstationen von Januar 2021 bis Juli 2024.

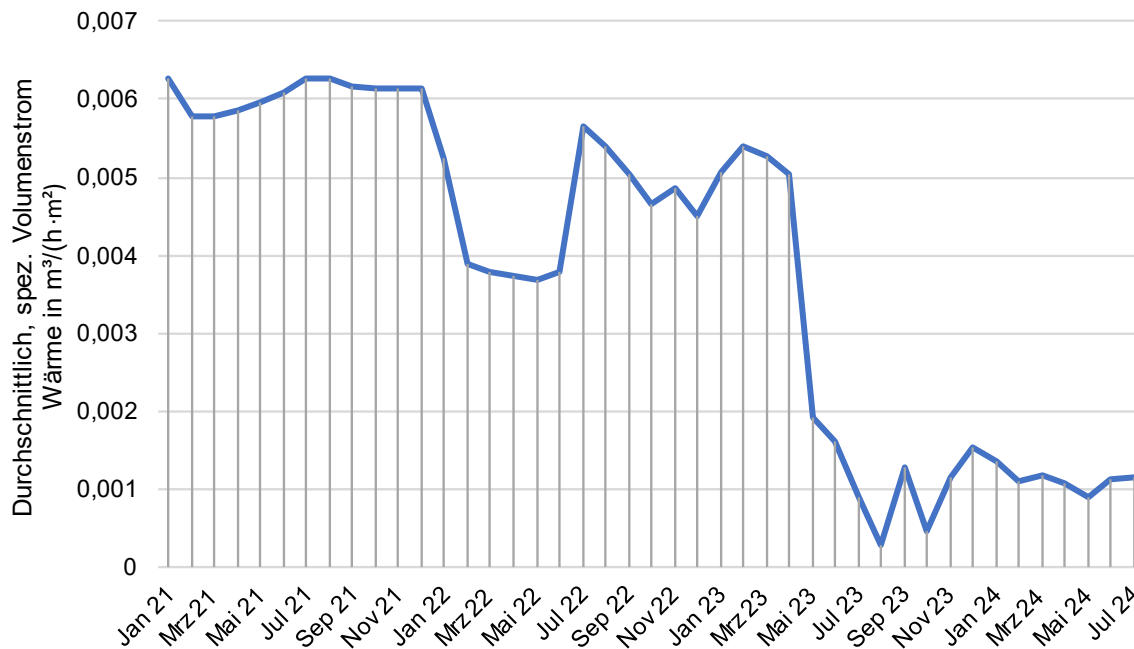


Abbildung 53 Durchschnittlich, normierter Volumenstrom durch Wohnungsstationen

Vergleicht man den Monat Mai 2021 mit Mai 2022, so ergibt sich eine durchschnittlich, normierte Volumenstromreduktion über alle Wohnungsstationen von ca. 38 %. Besonders deutlich ist in dem Diagramm der Abfall des durchschnittlich, normierten Volumenstroms nach der Optimierungsmaßnahme im Januar 2022 zu erkennen. Diese Maßnahme adressierte nur das Ventil zur Regelung der Trinkwarmwasserbereitung der Wohnungsstationen.

Weitergehend ist eine Reduktion des durchschnittlich, spez. Volumenstroms im Mai 2023 zu verzeichnen, nachdem das Ventil zur Temperatureinstellung der Fußbodenheizung eingeregelt wurde. Der Volumenstrom konnte dadurch erheblich gesenkt werden. Dies bewirkt wiederum niedrigere Verteilverluste im Gesamtsystem sowie die Ausbildung einer stabilen Temperaturschichtung im Wärmespeicher in der Energiezentrale. Zum Stand 03.07.2023 konnten 51 von 66 Wohnungen überprüft werden. Die restlichen Wohnungsstationen konnten im August 2023 eingestellt werden. Es resultiert anschließend ein auf konstantem Niveau niedriger spez. Volumenstrom im weiteren Verlauf.

Die Reduktion des Volumenstroms wirkt sich in gleicher Weise auf den durchschnittlich, normierten Wärmeverbrauch aus. Dies ist in Abbildung 54 dargestellt.

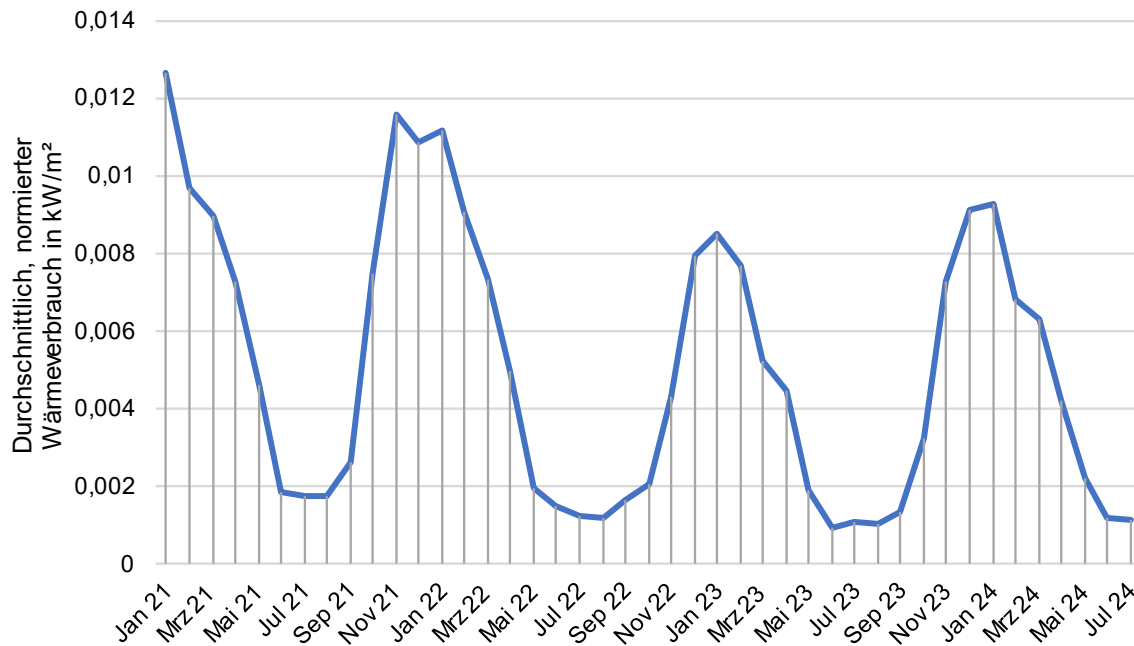


Abbildung 54 Durchschnittlich, normierter Wärmeverbrauch durch Wohnungsstationen

Hintergrund für eine gleichzeitige Reduktion des Wärmeverbrauch ist ein niedrigerer Volumenstrom durch die Wärmetauscher der Wohnungsstationen. Weiterhin wird eine Wärmeabnahme durch einen WMZ direkt am Wärmetauscher aus abrechnungstechnischen Gründen erfasst. Diese Daten werden als Wärmeleistung erhoben. Infolge einer konstanten Durchströmung des Wärmetauschers und somit einer stetigen Abnahme an Wärme wird diese erfasst und dem Mieter in Rechnung gestellt. Dies ist der sogenannte „Stand-Bye“-Modus, für dessen Bereitstellung der Mieter finanziell aufkommt. Im Diagramm zeigt sich eine Verringerung der durchschnittlich, normierten Wärmeleistung von Mai 2021 mit Mai 2022 um ca. 58 %. Dieser Umstand wird sich ebenso positiv auf die Nebenkostenabrechnung der Mieter auswirken. Infolge dieser Optimierungsmaßnahme ist damit auch eine geringere Bereitstellung an thermischer Energie in der Energiezentrale verbunden.

Besonders deutlich sind die periodisch schwankenden Wärmeverbräuche im Jahresverlauf zu erkennen mit Peak-Werten während der Winterzeit und mit einem kleinen Plateau im Sommer für die Trinkwarmwasserbereitung. Des Weiteren ist deutlich erkennbar, dass die Plateaus in den Sommermonaten von 2021 bis 2023 auf ein stetig kleineres Niveau reduziert werden konnten. Grund dafür liegt vor allem in den reduzierten Volumenströmen im System.

Betrachtet man gleichzeitig die durchschnittliche Temperaturspreizung zwischen VL und RL über alle Wohnungsstationen ergibt sich ein Verlauf wie in Abbildung 55 gezeigt.

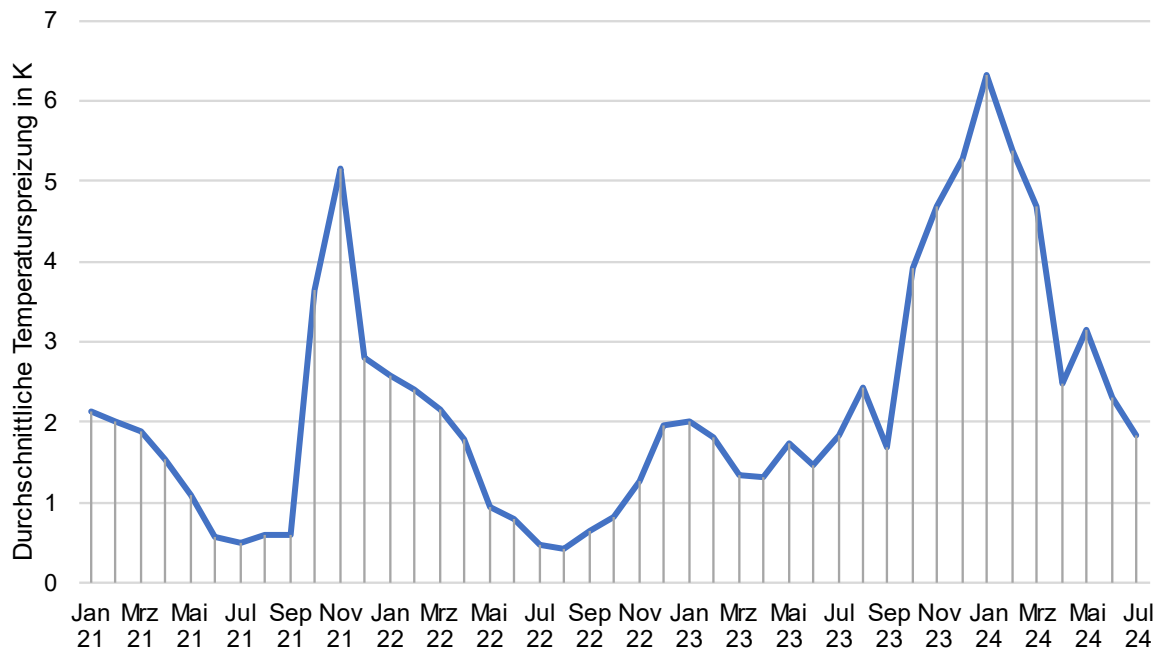


Abbildung 55 Durchschnittliche Temperatursteigerung Vorlauf und Rücklauf über alle Wohnungsstationen

Infolge der Einstellung des Temperaturreglers der Fußbodenheizung konnte bewirkt werden, dass eine bedarfsgerechte Durchströmung der Wohnungsstation erfolgt. Dies wirkt sich positiv auf die Temperatursteigerung aus, welche ab Mai 2023 stetig ansteigt. Hervorzuheben sind die hohen Temperatursteigerungen in November und Dezember 2023, die die bisherigen Messauswertungen übersteigen.

Im Detail ergibt sich der in Abbildung 56 dargestellte Verlauf beispielhaft an einer Wohnung für die Darstellung der bedarfsgerechten Regelung des Volumenstroms durch den Wärmetauscher.

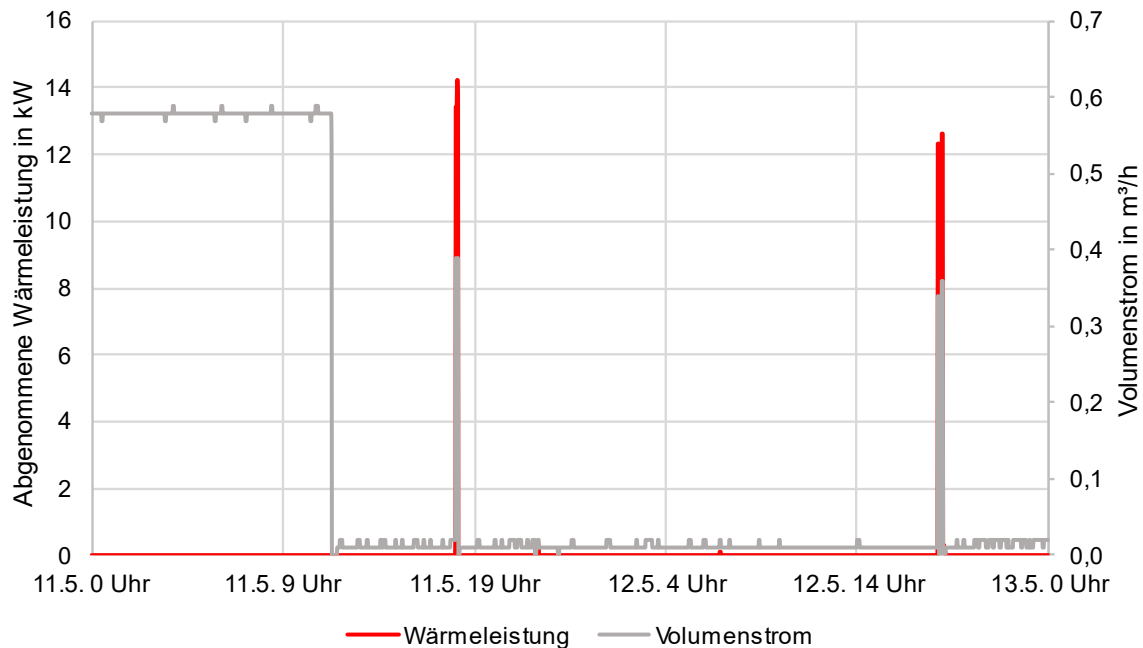


Abbildung 56 Bedarfsgerechte Regelung des Volumenstroms durch Wohnungsstation nach Optimierungsmaßnahme

Infolge der Veränderung der Einstellung am Temperaturregler der Fußbodenheizung ist der Volumenstrom durch die Wohnungsstation eingebrochen (ca. 11.05.2023 um 12 Uhr mittags). Bei einer anschließenden Abfrage nach Wärme, welche zu der Jahreszeit auf die Trinkwarmwasserbereitung zurückzuführen ist, steigt der Volumenstrom durch die Wohnungsstation gleichartig an. Nach Ende der Zapfung verringert sich der Volumenstrom wieder auf niedrigem Niveau. Bei keiner Abfrage nach Wärmeenergie erfolgt nur eine Durchströmung der Wohnungsstation auf einem nur sehr niedrigem Niveau. Dies ist der Stand-Bye-Funktion der Wohnungsstation geschuldet, welche beabsichtigt ist, um für eine schnelle Nachfrage Trinkwarmwasser gewährleisten zu können. Dieser niedrige Volumenstrom ist auf einer Höhe von ca. 10 l/h bis 20 l/h.

### **Auswirkung der Anpassung der Einstellparameter bei den Förderpumpen**

Eine weitere Auswirkung der Einstellmaßnahme zeigte sich im Betriebsverhalten der Förderpumpe, welche den Heizungsstrang für die Wohnungsstationen versorgt (Heizkreis „Büroflächen+Wohnungsstationen“ nach Abbildung 34). Die veränderten Verläufe im Betriebsverhalten sind in Abbildung 57 ersichtlich.

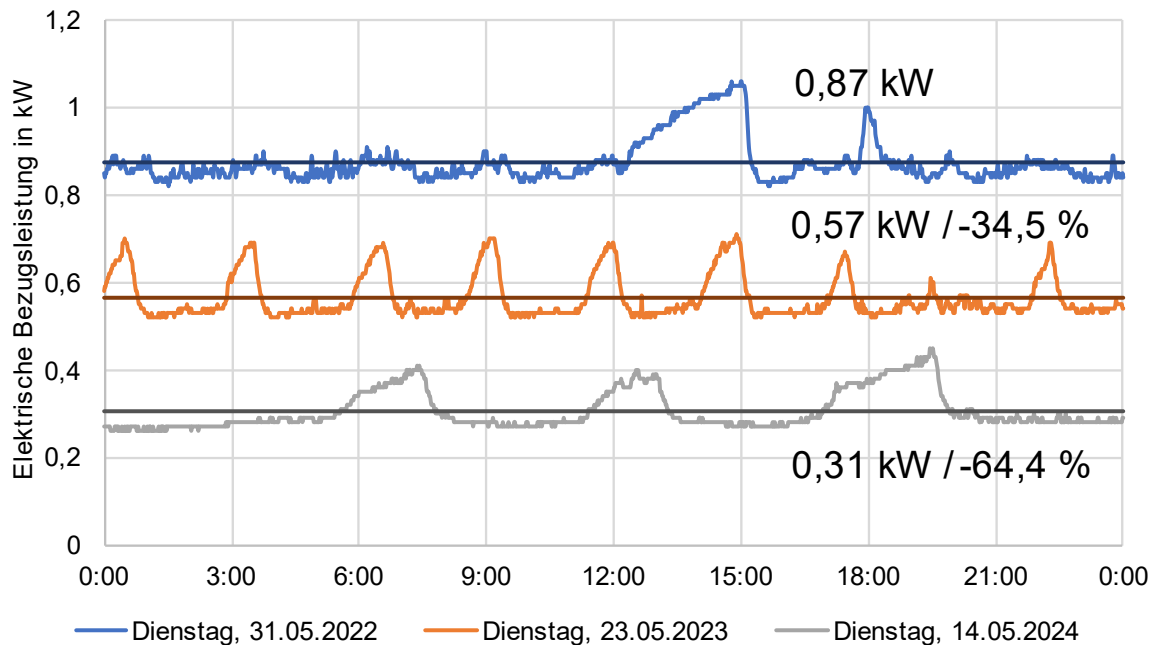


Abbildung 57 Betriebsverhalten Förderpumpe Hauptheizungsstrang vor und nach Maßnahme

Dargestellt ist die elektrische Energieaufnahme der Förderpumpe innerhalb eines ausgewählten Wochentages. Der Verlauf in blauer Farbe zeigt die elektrische Energieaufnahme vor der Maßnahme (Jahr 2022). Die Energieaufnahme ist nahezu konstant bei 0,87 kW. Nach Durchführung der Maßnahme zur Einregulierung des Ventils zur Trinkwarmwasserbereitung senkt sich die durchschnittliche Energieaufnahme ab auf 0,57 kW. Weiterhin ist zu sehen, wie sich Spitzenleistungen ausbilden, infolge einer verstärkten Durchströmung der Wohnungsstationen, da diese nun bedarfsgerecht anhand der Zapfprofile der Bewohner erfolgt. In Kombination mit der geschilderten Reduzierung der Förderhöhe bei der Förderpumpe im Heizkreis „Büroflächen+Wohnungsstationen“ zeigt sich eine erhebliche Verringerung der nötigen elektrischen Bezugsenergie.

Die Reduktion nimmt infolge der Einstellung des Ventils zur Durchströmung der Fußbodenheizung weiterhin zu auf nur noch 0,31 kW, was eine Verringerung der elektrischen Bezugsleistung von etwa 64 % im Vergleich von Mai 2024 zu Mai 2022 bewirkt.

Die Absenkungen der elektrischen Energieaufnahme lässt sich des Weiteren in der monatlichen Energieaufnahme ab dem Jahr 2023 in Abbildung 58 zeigen.

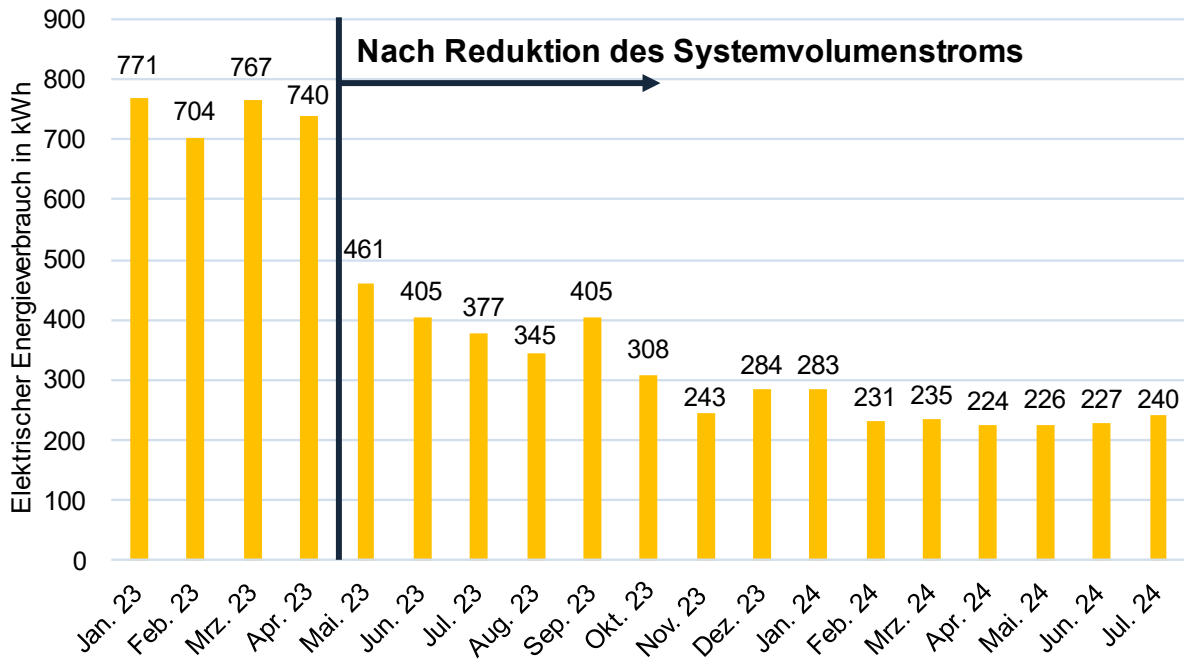


Abbildung 58 Monatliche, elektrische Energieaufnahme Förderpumpe

Die monatliche Energieaufnahme beträgt von Januar bis April 2023 durchschnittlich 745,60 kWh. Dieser Verbrauch konnte reduziert werden auf durchschnittlich 398,95 kWh (Mai bis September 2023), was einer Reduktion um ca. 46 % entspricht. Über weitergehende Anpassungen der Förderhöhe konnte die Bezugsenergie außerdem in den Monaten Oktober bis Dezember 2023 verringert werden um ca. 63 % (auf durchschnittlich 278,39 kWh) im Vergleich zu Januar bis April 2023.

Weitergehend bildet sich durch die verringerten Volumenströme eine stabile Temperaturschichtung im zentralen Wärmespeicher aus. Aufgrund der Erhöhung der Temperaturspreizung sinkt gleichzeitig die RL-Temperatur. Die RL-Temperatur ist nahezu gleichzeitig die VL-Temperatur für die WP GKA auf der Sekundärseite. Die Technologie der WP GKA bedingt, dass die Maschine einen relativ konstanten Temperaturhub von ca. 10 K auf den eintretenden Vorlauf erzeugt. Dies bedeutet, dass bei Absenkungen der RL-Temperatur aus den Wohnungsstationen gleichzeitig die Effizienz (Arbeitszahl) der WP ansteigt. Über die weitergehende Anpassung der Förderhöhe auf der warmen Seite der WP und der Erhöhung des Volumenstroms und der damit einhergehenden Reduktion der VL-Temperatur konnten hohe Arbeitszahlen erreicht werden, welche zuvor am geothermischen System nicht erreicht werden konnten. Dieser Effekt ist in Abbildung 59 dargestellt.

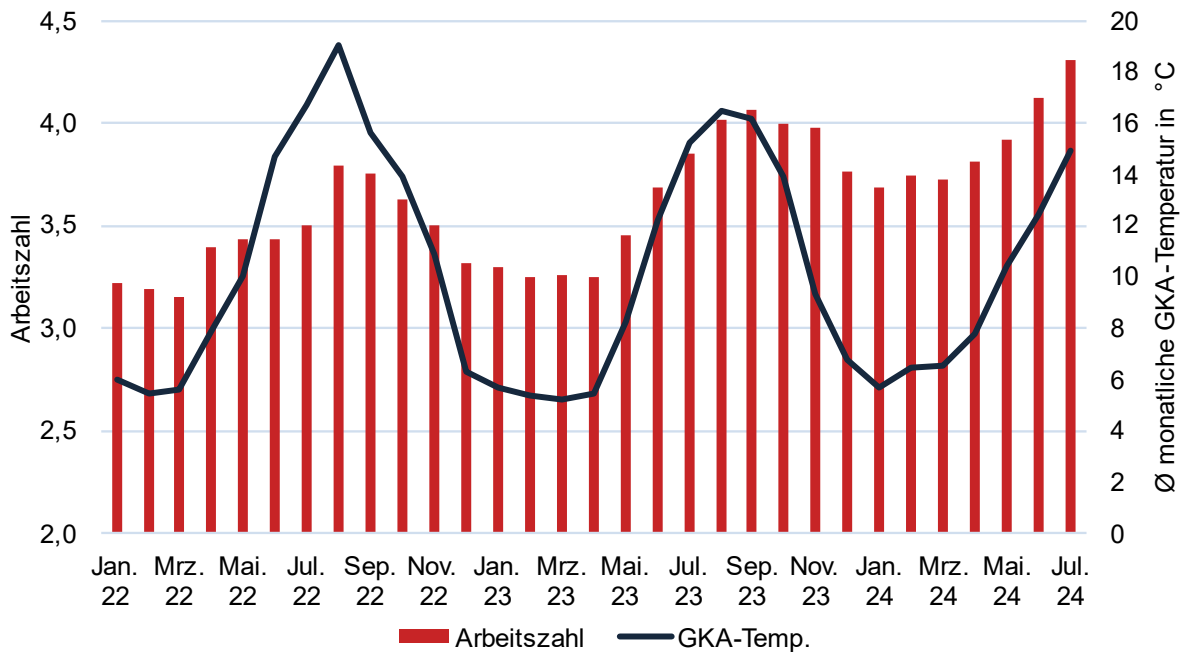


Abbildung 59 Arbeitszahlen der WP GKA zur mittleren GKA-Temperatur

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind neben den Arbeitszahlen (AZ) der WP GKA auch die mittleren GKA-Temperaturen aufgezeigt. Vergleicht man die AZ aus Juni 2023 (AZ = 3,69) und aus dem Vorjahr Juni 2022 (AZ = 3,43) ergibt sich eine Steigerung der AZ um 7,6 %, ohne dass an der Soll-Vorlauf-Temperatur der WP etwas verändert wurde. Im August 2023 konnte durch diese Anpassungen zum ersten Mal während der gesamten Messkampagne eine AZ größer 4 erreicht werden! Diese hohen AZ setzten sich bis in den November 2023 fort, obwohl die GKA-Temperaturen im November 2023 deutlich niedriger sind als im November 2022 (9,35 °C zu 10,91 °C). Dieser positive Effekt bis weit in die kalte Jahreszeit ist auf die Kombination der reduzierten Volumenströme auf der Verbraucherseite (Einstellung der Ventile der Wohnungsstationen) und der damit resultierenden niedrigeren RL-Temperaturen sowie der erhöhten Volumenströme auf der warmen Seite der WP GKA zurückzuführen. Damit ergibt sich für das Jahr 2022 eine mittlere AZ von 3,36 und für das Jahr 2023 eine mittlere AZ von 3,66, was ein Plus von 8,9 % entspricht. Dieser positive Trend setzt sich aufgrund der erst späten Anpassung der Förderpumpen auf der warmen Seite der WP GKA im Oktober 2023 für das Jahr 2024 fort. Im Zeitraum Januar 2024 bis Juli 2024 ergibt sich eine durchschnittliche AZ von 3,90 bei einer durchschnittlichen GKA-Temperatur von 9,19 °C.

### **Bewertung des elektrischen Verbrauchs der Durchlauferhitzer bei Wohnungsstationen**

Die Umstellung bzw. Einregulierung der Wohnungsstationen auf ein angepasstes Temperaturniveau führt wiederum zu höheren Betriebszeiten und damit einem höheren elektrischen Verbrauch des elektrischen DLH. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung des elektrischen Energie anteilig durch den DLH von besonderem Interesse. Aufgrund von Störungen in den Messaufzeichnungen liegen belastbare Messdaten der elektrischen Energiemengenzähler für den DLH in den Wohnungen ab Februar 2021 vor. Bei Betrachtung des elektrischen Verbrauchs vor und nach der Einstellmaßnahme stellt sich heraus, dass sich der elektrische Mehrverbrauch in einem nur geringen Umfang in den Messdaten äußert. Zum Teil kann in manchen Wohnungen keine Erhöhung festgestellt werden.

Eine Begründung für die geringe Auswirkungen der Einstellmaßnahmen liegt in der bisherigen Einstellung. Nachdem der Regler der Wohnungsstation auf der Stufe 8 bis 10 eingestellt war, wird eine Solltemperatur des Frischwassers von 46 °C bis 50 °C erwartet (vgl. hierzu Abbildung 38). Nachdem im Heizungsstrang nur eine VL-Temperatur von 48 °C ansteht, liegt damit die Temperatur des erwärmten Trinkwarmwassers weit unterhalb der Solltemperatur des Reglers. Nach Messungen während der Überprüfung der Wohnungsstationen im Januar 2022 hat sich ein Temperaturdelta von 6 Kelvin zwischen Primärseite zur Sekundärseite des Wärmetauschers an der Wohnungsstation eingestellt. Damit ist eine maximale Trinkwarmwassertemperatur von ca. 41 °C bis 42 °C zu erreichen. Infolge der Anpassung des Reglers ist eine neue Solltemperatur von 38 °C eingestellt worden, welche der Wärmetauscher erreichen kann, so dass der Regler bedarfsgerecht arbeitet. Folglich muss der elektrische DLH im Vergleich zu vor der Einstellmaßnahme „nur“ ein weiteres Temperaturdelta von 3 Kelvin überwinden, falls die vorherige Zapftemperatur vom Nutzer auch gewünscht ist. Dies zeigt sich auch in einem nur gering bis leicht erhöhten zusätzlichen elektrischen Verbrauch des DLH.

Die elektrischen Verbräuche des DLH kann man auf einzelne Wohnungsgruppen aufteilen. Hierfür werden die Wohnungen nach 1-, 2-, 3- und 4-Zimmer-Wohnungen gruppiert. Hintergrund ist, dass der Trinkwarmwasserbedarf einer Wohnung vor allem nutzerabhängig ist und somit unabhängig von der Wohnungsgröße ist. Jedoch besteht die Hypothese, dass je mehr Zimmer in einer Wohnung vorhanden sind, auch die Anzahl der Personen in dieser Wohnung tendenziell höher ist. Damit steigt auch der Trinkwarmwasserbedarf.

Insgesamt gibt es im Gebäude puls<sup>G</sup> folgende Unterteilungen nach dieser Gruppierung:

- 1-Zimmer-Wohnungen: 15 Stück
- 2-Zimmer-Wohnungen: 22 Stück
- 3-Zimmer-Wohnungen: 22 Stück
- 4-Zimmer-Wohnungen: 7 Stück

Vergleicht man nun den prozentualen Anteil des elektrischen Verbrauchs durch den elektrischen DLH zum gesamten Stromverbrauch der jeweiligen Wohnung (Haushaltsstrom) so ergibt sich die folgende Tabelle 1 für das Jahr 2022.

Tabelle 1 Anteil elektrischer Energieverbrauch DLH am elektrischen Gesamtverbrauch der Wohnungsgruppe (Zeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2022)

|                    | <b>Ø<br/>Wohnungs-<br/>strom</b> | <b>Ø<br/>Energieverbrauch<br/>DLH</b> | <b>Anteil DLH am<br/>Wohnungsstrom</b> |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|                    | In kWh/Monat                     | In kWh/Monat                          |                                        |
| 1-Zimmer-Wohnungen | 81,72                            | 22,57                                 | <b>27,6 %</b>                          |
| 2-Zimmer-Wohnungen | 138,94                           | 25,61                                 | <b>18,4 %</b>                          |
| 3-Zimmer-Wohnungen | 182,09                           | 29,02                                 | <b>15,9 %</b>                          |
| 4-Zimmer-Wohnungen | 247,18                           | 45,95                                 | <b>18,6 %</b>                          |

Wie in der Tabelle verdeutlicht, sinkt mit zunehmender Zimmeranzahl der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs durch den DLH am elektrischen Gesamtverbrauchs der Wohnungsgruppe. Durch eine steigenden Wohnungsgröße nimmt voraussichtlich der Bedarf am elektrischen Energieverbrauch für Beleuchtung, Unterhaltungsgeräte zu; damit sinkt eher der Anteil des elektrischen DLH. Lediglich bei den Wohnungen mit vier Zimmern nimmt der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs wieder zu. Dies könnte durch einen zunehmenden Komfortanspruch oder mehr Personen in der Wohnung begründet sein. Gleichzeitig nutzen 17 der 66 Wohnungsstationen weniger als 10 kWh<sub>el</sub> für die monatliche Trinkwarmwasserbereitung. Lediglich nur 5 Wohnungen nutzen den elektrischen DLH nicht. Für das Jahr 2023 ergibt sich für die unterschiedlichen Wohnungsgruppen ein ähnliches Bild wie im Jahr 2022; das ist in der Tabelle 2 verdeutlicht.

Tabelle 2 Anteil elektrischer Energieverbrauch DLH am elektrischen Gesamtverbrauch der Wohnungsgruppe (Zeitraum: 01.01.2023 – 31.12.2023)

|                    | <b>Ø<br/>Wohnungs-<br/>strom</b> | <b>Energieverbrauch<br/>DLH</b> | <b>Anteil DLH am<br/>Wohnungsstrom</b> |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
|                    | in kWh/Monat                     | in kWh/Monat                    |                                        |
| 1-Zimmer-Wohnungen | 88,83                            | 21,72                           | <b>24,5 %</b>                          |
| 2-Zimmer-Wohnungen | 170,87                           | 28,50                           | <b>16,7 %</b>                          |
| 3-Zimmer-Wohnungen | 186,48                           | 30,02                           | <b>16,1 %</b>                          |

|                    |        |       |               |
|--------------------|--------|-------|---------------|
| 4-Zimmer-Wohnungen | 249,00 | 53,59 | <b>21,5 %</b> |
|--------------------|--------|-------|---------------|

### **Hemmnisse und Verbesserungspotenzial bei verbauten Wohnungsstationen**

Durch die intensive Auseinandersetzung mit diesem Modell der Wohnungsstationen als auch in mehreren Abstimmungsrunden mit dem Hersteller haben sich Hemmnisse gezeigt, die eine Optimierung der Wohnungsstationen erschweren. Diese Hindernisse sind:

- Es gibt **keine Anbindung der Einstellparameter der Wohnungsstation** an die Gebäudeleittechnik. Änderungen an den Einstellungen müssen durch aufwendige Wohnungsbesuche erfolgen.
- Die Regelventile ähneln nach dem **Aussehen herkömmlicher Temperaturreglern von Heizkörpern**. Das verleitet Nutzende möglicherweise diese auf ein höheres Niveau zu drehen, obwohl dies zu keiner Verbesserung führt, sondern das Gesamtsystem negativ beeinflusst.
- Nutzende erhalten **keine visuelle Rückmeldung über die am elektrischen DLH eingestellte Temperatur als Zapftemperatur**, um einen niederschweligen Einfluss auf die Zapftemperatur zu ermöglichen. Die Einstellung der Zapftemperatur mithilfe der Fernbedienung erfolgt durch Abzählen in 0,5-Grad-Schritten.
- Es gibt keine **transparente Auflistung für den Nutzer, wie viel elektrische Energie zur Nacherhitzung im elektrischen DLH** aufgewendet wird. Die nötige elektrische Energie wird auf dem Stromverbrauch der Wohnung aufsummiert und wird nicht weiter unterteilt.

Aus diesen Hemmnissen ergeben sich Verbesserungspotenziale:

- Digitale **Anbindung der Wohnungsstationen an die Gebäudeleittechnik**, sodass Parameter aus der Ferne eingestellt werden können. Damit einhergehend können die vom Aussehen ähnelnden herkömmlichen Temperaturreglern von Heizkörpern eingespart werden.
- Mithilfe von **Displays an der Wohnungsstation oder besser an der Fernbedienung** wird die eingestellte Zapftemperatur angegeben. Die Zusatzheizung über den elektrischen DLH wird angezeigt, sodass der zusätzliche Komfortanspruch über die Grundtemperierung ausgegeben wird.
- Der **elektrische Energieverbrauch** über den DLH wird gesondert **in beispielsweise der Nebenkostenabrechnung aufgelistet**.

### **Bewertung des Energieverbrauchs des Gebäudes in den Jahren 2021, 2022 und 2023 mithilfe von Methoden der Witterungsbereinigung**

Für die Bewertung des Energieverbrauchs des Gebäudes puls<sup>G</sup> als auch der Vergleichbarkeit der Energiemengen über die Projektjahre ist eine Witterungsbereinigung nötig. Hierfür bietet sich das nach der VDI 3807 Blatt 1 vorgeschlagene Verfahren zur Außentemperaturbereinigung an. In der VDI-Richtlinie werden zwei Möglichkeiten angeboten:

1. Außentemperaturbereinigung anhand der Jahresenergiemengen
2. Tagesmitteltemperaturverfahren

Das erste Verfahren ist ein sehr grobes, aber einfaches Verfahren, welches die Jahresenergiemengen zu den mittleren Jahresgradtagen ins Verhältnis setzt. Beim Tagesmitteltemperaturverfahren hingegen wird ein hochaufgelöstes Monitoring und Messdatenverfügbarkeit vorausgesetzt, damit kleinteilig die jeweiligen Heizgradtage zu den Energieverbräuchen verglichen werden können. Dabei wird zwischen Heizwärme und Prozesswärme unterschieden. Unter Prozesswärme wird im Gebäudebereich die Wärme verstanden, welche für die Trinkwarmwasserbereitung nötig ist.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse beider Verfahren dargestellt werden.

#### *Außentemperaturbereinigung anhand der Jahresenergiemengen*

Bei der Außentemperaturbereinigung wird der Bedarf für die Raumheizung über die Gradtage erfasst. Hierzu sind neben dem außentemperaturabhängigen Heizenergieverbrauch  $Q_{VGH}$ , die Gradtage im Jahresverlauf  $G$  bei einer bestimmten Heizgrenztemperatur (hier 15 °C) als auch das langjährige Mittel der Jahresgradtage  $G_m$  für einen möglichst nahegelegenen Standort aus der Richtlinie entnommen.

Aus diesen Werten wird der bereinigte Heizenergieverbrauch  $Q_{VH}$  bestimmt.

$$Q_{VH} = Q_{VGH} \cdot \frac{G_m}{G}$$

Aus der Tabelle der VDI-Richtlinie bietet sich als nächstgelegenen Standort Rosenheim mit seinen mittleren Jahresgradtagen von  $G_m = 4230$ .

Die Jahresgradtage für die Projektjahre bei einer Heizgrenztemperatur von 15 °C betragen wie folgt:

|                    | <b>2021</b> | <b>2022</b> | <b>2023</b> |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Jahresgradtage $G$ | 3504        | 3532        | 2906        |

Aus den abhängigen Verbrauchswerten  $Q_{VGH}$  ergeben sich die unabhängigen Verbrauchswerte nach Tabelle 3

Tabelle 3 Auflistung Ergebnisse einfaches Verfahren

|                                              | 2021    | 2022           | 2023           |
|----------------------------------------------|---------|----------------|----------------|
| Abhängiger Energieverbrauch $Q_{VgH}$ in kWh | 482.090 | 385.316        | 346.674        |
| Spez. Energieverbrauch in kWh/m <sup>2</sup> | 37,91   | 85,50          | 61,49          |
| Bereinigter Energieverbrauch $Q_{VH}$ in kWh | 581.996 | 461.413        | 504.590        |
| Spez. Energieverbrauch in kWh/m <sup>2</sup> | 103,22  | 81,84          | 89,49          |
| <b>Veränderung zu 2021</b>                   |         | <b>-20,7 %</b> | <b>-13,3 %</b> |
| <b>Veränderung zu 2022</b>                   |         |                | <b>+9,4 %</b>  |

In Abbildung 60 ist dieser Zusammenhang des unabhängigen Energieverbrauchs über die Projektjahre grafisch verdeutlicht.

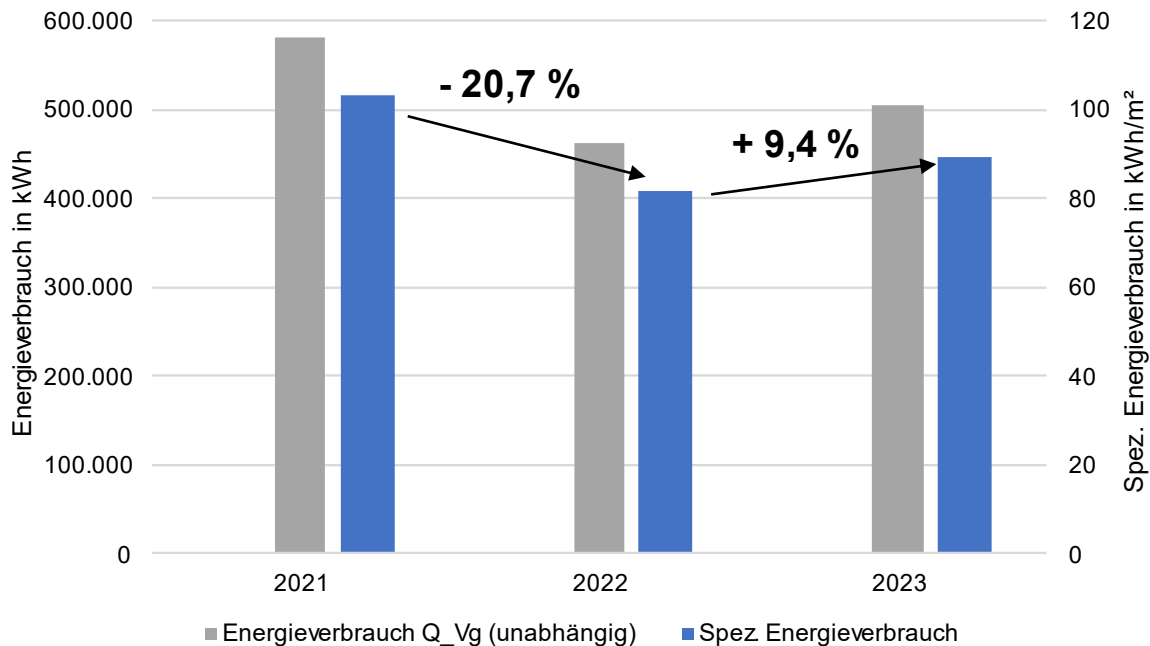


Abbildung 60 Bereinigter Energieverbrauch über die Projektjahre

Das Ergebnis nach diesem einfachen Verfahren zeigt, dass von 2021 auf 2022 ein Rückgang des bereinigten Energieverbrauchs um 20,7 % erfolgte. Der Vergleich von 2022 zu 2023 zeigt jedoch einen Anstieg des bereinigten Energieverbrauchs um 9,4 %.

Da dieses Verfahren sehr einfach und auch sehr grob ist und keine Unterscheidung zwischen Heizwärme für die Raumbeheizung und für die Trinkwarmwasserbereitung vornimmt, wird in einem zweiten Schritt das Tagesmitteltemperaturverfahren über die Projektjahre angewendet.

### *Tagesmitteltemperaturverfahren*

Bei diesem Verfahren wird eine hohe Massendatenqualität als auch -verfügbarkeit benötigt. Beides trifft auf das untersuchte Gebäude zu. Aus den Messdaten werden die jeweiligen Monatsmitteltemperaturen bestimmt. Ausgehend von den Verbrauchsdaten können die gemittelten Tagesverbrauchswerte erstellt werden. Weitergehend werden aus einer vorher festgelegten Heizgrenztemperatur die Anzahl der im jeweiligen Monat vorhandenen Heiztage ermittelt. Basierend auf den Heiztagen kann dann auch die Tagesmitteltemperatur über diese Heiztage erstellt werden. Über die Monate mit einer höheren Monatsmitteltemperatur als die Heizgrenztemperatur ist aus diesen und den zugehörigen gemittelten Tagesverbräuchen die Prozesswärme zu bestimmen. Trägt man die Daten in ein Punktdiagramm ein ergibt sich daraus eine Heizgerade mit negativer Steigung und eine horizontale Gerade für die Prozesswärme. Der Schnittpunkt beider Gerade ist die tatsächliche Heizgrenztemperatur. Dieser Schnittpunkt ist rechnerisch zu bestimmen nach der VDI-Richtlinie über:

$$t_H = \frac{Q_{VGP} - Q_{V0}}{s}$$

Hierin ist  $t_H$  die Heizgrenztemperatur,  $Q_{VGP}$  der Energieverbrauch der Prozesswärme,  $Q_{V0}$  der Energieverbrauch bei einer Temperatur von 0 °C und  $s$  die Steigung der Heizgeraden.

Weitergehend kann aus diesen Werten der mittlere Energieverbrauch für die Heizung  $Q_{VH}$  ermittelt werden über:

$$Q_{VH} = \left( s \cdot t_{Hm} + (Q_{V0} - Q_{VGP}) \right) \cdot z_{Hm}$$

Wobei  $t_{Hm}$  die durchschnittliche Tagesmitteltemperatur über die Heiztage ist und  $z_{Hm}$  die durchschnittliche Anzahl der Heiztage.

Die Ergebnisse dieses Verfahrens über die Projektjahre 2021, 2022 und 2023 sind in Abbildung 61 übereinandergelegt.

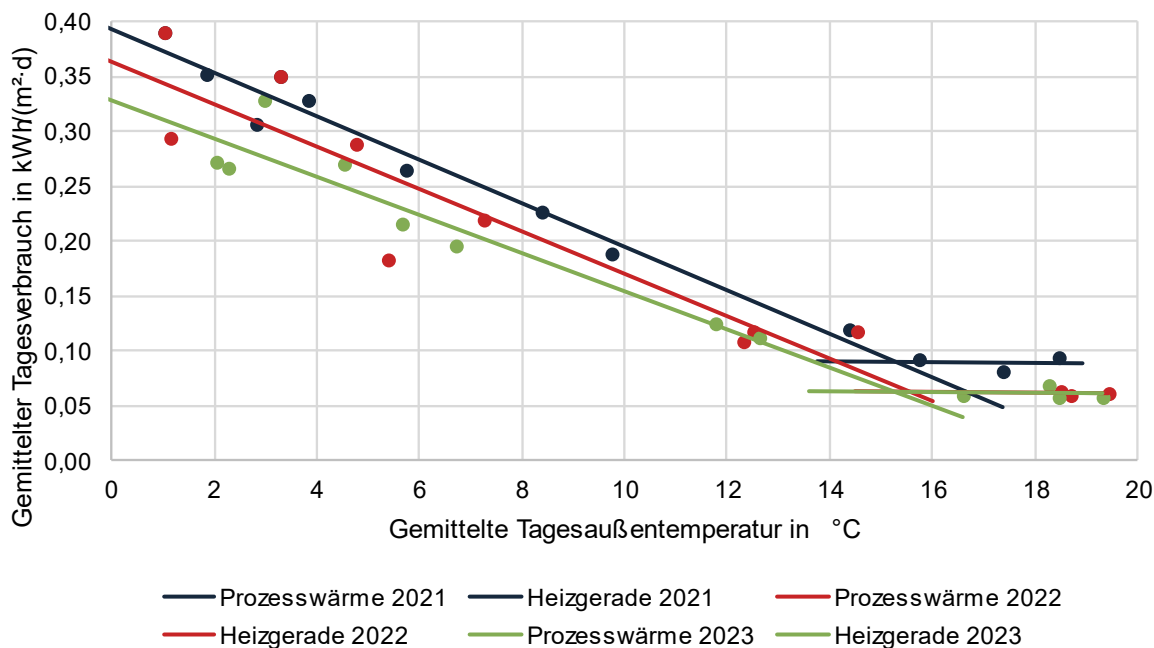


Abbildung 61 Tagesmitteltemperaturverfahren über die Jahre 2021, 2022 und 2023

Es ist ersichtlich, dass die Heizgerade mit negativer Steigung über die Betrachtungszeiträume stetig flacher wird, was wiederum bedeutet, dass die Energieverbräuche zusehends verringert wurden. Des Weiteren lässt sich bei den grün (2023) und rot (2022) gefärbten, horizontalen Geraden eine Deckungsgleichheit erkennen. Dies verdeutlicht, dass die Trinkwarmwasserbereitung, wie zu erwarten, nicht von der Außentemperatur abhängig ist. Auch sind diese nach erfolgter Einstellung der Temperaturregler auf einem niedrigeren Niveau als 2021 (schwarz).

Trägt man die Ergebnisse in tabellarischer Form auf so ergibt sich die folgende Auflistung in Tabelle 4.

Tabelle 4 Auflistung Ergebnisse Tagesmitteltemperaturverfahren

|                                             |           | 2021  | 2022           | 2023           |
|---------------------------------------------|-----------|-------|----------------|----------------|
| Heizgrenztemperatur                         | °C        | 15,18 | 15,17          | 14,93          |
| Tagesmitteltemperatur über Heiztage         | °C        | 7,43  | 8,32           | 7,61           |
| Anzahl der Heiztage                         | -         | 258   | 253            | 243            |
|                                             |           |       |                |                |
| Mittlerer Energieverbrauch für Heizung      | kWh/(m²a) | 39,59 | 33,27          | 30,93          |
| Mittlerer Energieverbrauch für Prozesswärme | kWh/(m²a) | 30,77 | 23,78          | 22,98          |
| Bereinigter Energieverbrauch                | kWh/(m²a) | 70,36 | 57,04          | 53,91          |
| <b>Veränderung zu 2021</b>                  |           |       | <b>-18,9 %</b> | <b>-23,4 %</b> |
| <b>Veränderung zu 2022</b>                  |           |       |                | <b>-5,5 %</b>  |

Wie in der Auflistung und den Veränderungen über die Jahre zu erkennen, ist der Energieverbrauch sowohl von 2021 auf 2022 um 18,9 % gesunken als auch von 2022 auf 2023 um 5,5 %. Damit ergibt sich eine gesamte Energieverbrauchsreduktion zwischen 2021 und 2023 von 23,4 %.

Dieses Ergebnis der Witterungsbereinigung und der stetig sinkenden Energieverbräuche konnte nur durch ein hochaufgelöstes Monitoring mit hoher Messdatenqualität erreicht werden. Das einfache Verfahren der VDI 3807 Blatt 1 reicht hingegen nicht aus, um ein ganzheitliches Bild zu erhalten, da die Aufteilung in Heizwärme und Prozesswärme (Trinkwarmwasserbereitung) nicht vorgenommen wird.

### Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Neben der Analyse des Energiebedarfs innerhalb des Projektzeitraums ist auch von Interesse, inwiefern sich durch die getroffenen Maßnahmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen entwickelt haben. Hierfür sind beispielhaft die monatlichen Energiemengen der Wärmeerzeugung für die Jahre 2021, 2022 und 2023 in Abbildung 62 aufgelistet.

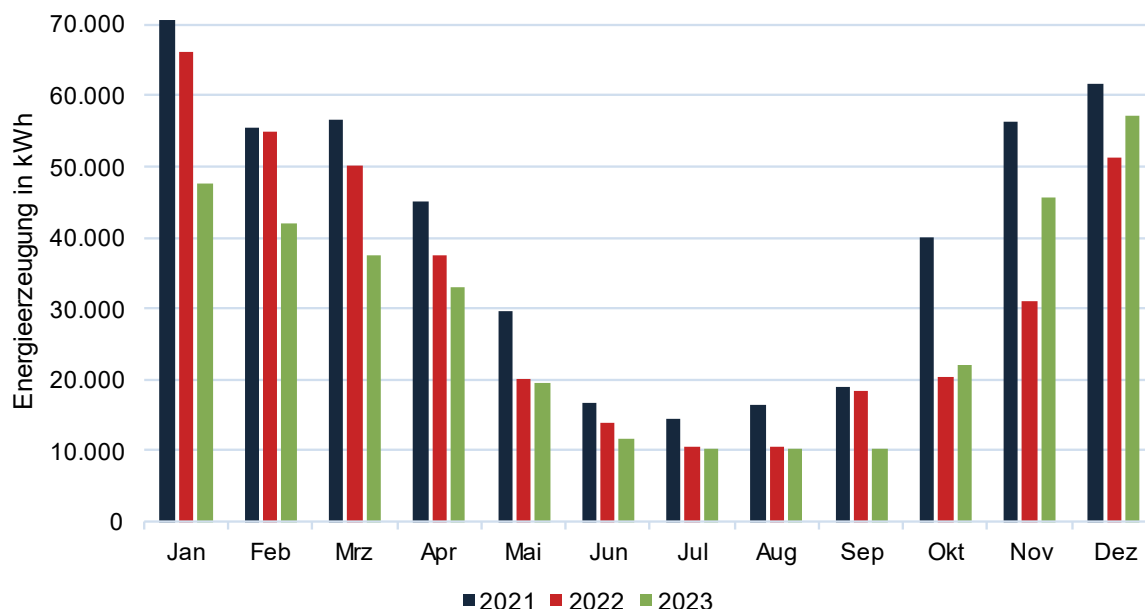


Abbildung 62 Monatliche Energieerzeugungsmengen für die Jahre 2021, 2022, 2023

Kumuliert ergeben sich die jährlichen Energiemengen für die Wärmebereitstellung wie in Abbildung 63 gezeigt.

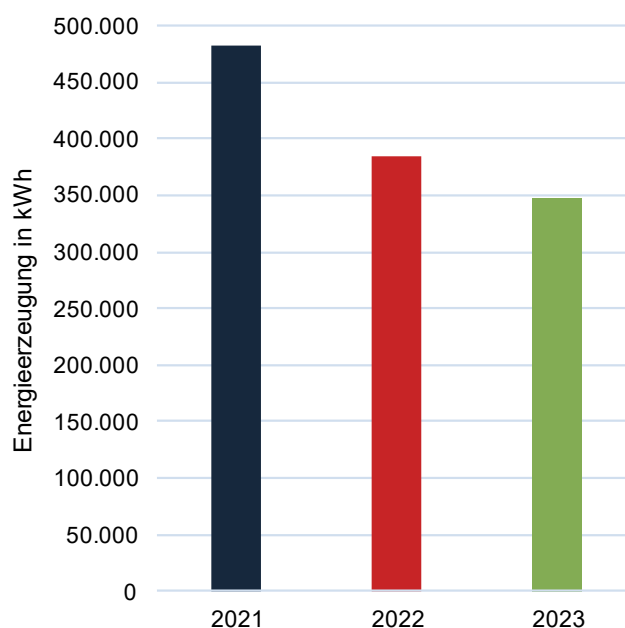


Abbildung 63 Kumulierte Energiemengen

Es zeigt sich, wie auch bereits in der Ermittlung des Energieverbrauch anhand des Tagesmitteltemperaturverfahrens erläutert, ein stetig sinkender Energieverbrauch in der Projektlaufzeit von ca. 28 % zwischen 2021 und 2023.

Die Bereitstellung der thermischen Energie im Gebäude puls<sup>G</sup> im Verlauf der Projektjahre sind in den Tortendiagrammen der Abbildung 64 dargestellt.

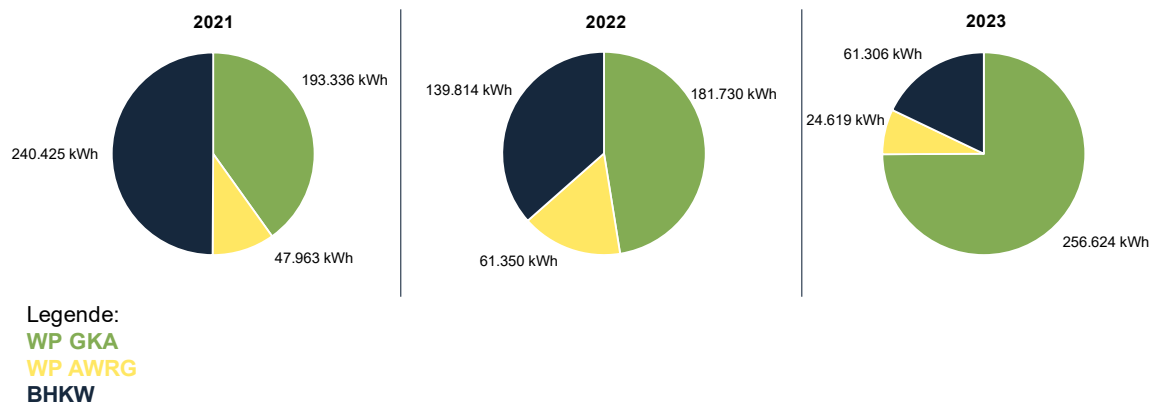


Abbildung 64 Thermische Energiebereitstellung nach Energieerzeugungsanlage

Der Anteil der thermische Energieerzeugung an der Gesamterzeugung konnte bei den WP GKA sukzessive von 40 % im Jahr 2021 auf über 75 % im Jahr 2023 gesteigert werden. Die BHKW nehmen im Vergleich zu 2021 nur noch die Rolle einer Spitzenlastabdeckung ein, wenn die GKA zu geringe VL-Temperaturen ermöglicht, was zu einer Abschaltung der zugehörigen WP führt. Die Bereitstellung der WP AWRGA wurde zugunsten besserer Arbeitszahlen verringert, nachdem die hydraulische Einbindung dieser WP dazu führt, dass aufgrund unterschiedlicher Druckstufen eine Systemtrennung mithilfe eines Wärmetauschers erfolgen muss. Diese Anpassung führt zwangsläufig zu einem geringeren Anteil der WP AWRGA an der Gesamtbereitstellung.

Anhand dieser Aufteilungen können die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt werden, welche in der Tabelle 5 aufgeführt sind.

Tabelle 5 Emittierte CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmeerzeugung

|                                                                                     |                                  | 2021                             | 2022                            | 2023                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|  | <b>Wärmeerzeugung</b>            | 482.000 kWh                      | 385.000 kWh                     | 347.000 kWh                     |
|  | <b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b> |                                  |                                 |                                 |
|                                                                                     | Ohne PV-Strom                    | 110,1 t <sub>CO2</sub>           | 77,5 t <sub>CO2</sub>           | 51,6 t <sub>CO2</sub>           |
|  | Deckung PV-Strom                 | 91,8 t <sub>CO2</sub>            | 61,0 t <sub>CO2</sub>           | 37,8 t <sub>CO2</sub>           |
|                                                                                     | - Restlicher PV-Strom            | 82,6 t <sub>CO2</sub>            | 47,9 t <sub>CO2</sub>           | 26,8 t <sub>CO2</sub>           |
|                                                                                     | - Strom aus BHKW                 | <b>63,3 t<sub>CO2</sub></b>      | <b>37,5 t<sub>CO2</sub></b>     | <b>25,3 t<sub>CO2</sub></b>     |
|                                                                                     | <b>Spez. Wärme</b>               | <b>131,3 g<sub>CO2</sub>/kWh</b> | <b>97,4 g<sub>CO2</sub>/kWh</b> | <b>72,9 g<sub>CO2</sub>/kWh</b> |

Wie in der Tabelle ersichtlich sind die in den jeweiligen Jahren erzeugten Wärmemengen in kWh angegeben. Die jeweiligen Energiemengen teilen sich in die Erzeuger WP und BHKW auf.

Für die reine Betriebsweise der BHKW und der WP mit Netzstrom werden die folgenden CO<sub>2</sub>-Emissionen zugrunde gelegt [26]:

- Erdgas: 201 g<sub>CO2</sub>/kWh
- Netzstrom 2021: 407 g<sub>CO2</sub>/kWh
- Netzstrom 2022: 429 g<sub>CO2</sub>/kWh
- Netzstrom 2023: 380 g<sub>CO2</sub>/kWh

Für den jeweiligen reinen Betrieb von WP und BHKW ergeben sich dann die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Tabelle ohne PV-Strom.

Nachdem das Gebäude eine PV-Anlage auf dem Dach hat, gibt es eine gewisse Gleichzeitigkeit zwischen WP-Betrieb und vorliegenden PV-Strom. Dadurch reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen, da zu diesen Zeitpunkten kein Netzstrom bezogen werden muss (Deckung PV-Strom). Auch bei einer nicht vorliegenden Gleichzeitigkeit oder einer Überproduktion durch die PV-Anlage kann der Stromspeicher als auch eine bilanzielle Betrachtung verwendet werden, da dieser Strom in das Netz eingespeist wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen dann von diesem restlichen PV-Strom subtrahiert werden.

Weitergehend produzieren die BHKW mit dem CO<sub>2</sub>-Koeffizienten von Erdgas Strom, welcher eine bessere CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweist als der in Deutschland vorliegende Netzstrom und für die WP genutzt werden kann. Damit reduzieren sich noch einmal die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf nur noch 25,3 t<sub>CO2</sub> für das Jahr 2023. Der restliche Sockel an Emissionen basiert vor allem auf die thermische Verwertung von Erdgas in den BHKW, welcher durch die Spitzenlastabdeckung und zur Unterstützung der WP in den Wintertagen nötig ist.

Es ist deutlich im Vergleich von 2021 mit 2022 zu erkennen, dass infolge einer Veränderung der Betriebsweise von WP und BHKW eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zugunsten emissionsfreier Wärmequellen erfolgte (GKA unterhalb der Tiefgarage und Abluft aus den Bädern der Wohnungen). Weitere Optimierungen sowie die Steigerung der Arbeitszahlen der WP, wie in Abbildung 59 gezeigt, konnten diesen positiven Trend für 2023 fortsetzen und die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf ein Minimum reduzieren.

Würde die benötigte Wärmeenergiemenge für das Jahr 2023 über ein konventionelle Gasbrennwertheizung gedeckt werden, so würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen 69,7 t betragen. Im Vergleich zu 25,3 t<sub>CO2</sub> sind damit die Emissionen um über 64 % verringert.

### **Theoretische Untersuchungen möglicher wirtschaftlicher Betriebsweisen**

In diesem Abschnitt soll anhand theoretischer Überlegungen analysiert werden, inwiefern durch verschiedene Betriebsreihenfolgen der WP und BHKW eine Deckung des Energiebedarfs erfolgen kann. Des Weiteren sind aus diesen Untersuchungen zu ermitteln, wie sich die spez. Wärmegestehungskosten als auch die Arbeitszahlen entwickeln sowie welche theoretische Entzugsleistung an der GKA nötig wären.

Als Grundlage für diese Betrachtung dienen die WP-Kennlinien des Herstellers, gezeigt in Abbildung 51 und Abbildung 52 für die WPF66, die die GKA als Wärmequelle verwenden. Analog gibt es für die WPF13 ebenso Kennlinien, die als Wärmequelle die AWRGA aus den Bädern der Wohnungen nutzt.

In dieser Untersuchung dienen die Wärmeverbrauchsdaten, die gemessenen GKA-Temperaturen sowie die Temperaturen der Quelle Abluft für das Jahr 2023 in stündlicher Auflösung als Grundlage. Ausgehend von diesen Daten werden verschiedene Betriebsreihenfolgen zur Deckung des Wärmebedarfs festgelegt. Anhand der Kennlinien der WP, den GKA-Temperaturen sowie der Vorgabe verschiedener VL-Temperaturen der WP können die zugehörigen Wärmeleistungen, Arbeitszahlen und elektrische Bezugsleistungen entnommen werden. Die BHKW sind als Erzeuger mit einer konstanten Wärme- und Stromerzeugung angenommen. Des Weiteren sind für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit Größen für den Strompreis, Gaspreis und eingespeiste elektrische Energie aus den BHKW in das Stromnetz vorgegeben. Diese Werte betragen:

- Strompreis aus Netzbezug: 0,30 €/kWh
- Erdgaspreis: 0,12 €/kWh
- Vergütung Strom aus KWK: 0,06 €/kWh

Die Deckung der benötigten elektrischen Energie aus der PV ist nicht betrachtet worden.

Die untersuchten Betriebsreihenfolgen setzen sich wie folgt zusammen:

- |          |   |       |   |       |
|----------|---|-------|---|-------|
| 1. WPF66 | → | WPF13 | → | BHKW  |
| 2. WPF66 | → | BHKW  | → | WPF13 |
| 3. BHKW  | → | WPF13 | → | WPF66 |
| 4. BHKW  | → | WPF66 | → | WPF13 |

Im Szenario 1 wird mithilfe der WPF66 (WP GKA) versucht, den Wärmebedarf zu decken. Sollte dies nicht ausreichen, schaltet sich die WPF13 (WP AWRGA) hinzu und bei Bedarf wird auch noch ein BHKW hinzugezogen. Analoges Vorgehen gilt für die Szenarien 2 bis 4.

Zugleich ist in der Untersuchung ein Wärmespeicher als Puffer einbezogen, der überschüssige Energie, die nicht benötigt wird, zwischenspeichert. Im folgenden Zeitschritt wird dann geprüft, ob mithilfe des Puffers der Bedarf gedeckt werden kann. Wenn nicht, dann greift die entsprechende Betriebsreihenfolge. Unter Einbezug gemessener Wärmeverbräuche, GKA-Temperaturen und Ablufttemperaturen verändert sich die durch die WP bereitgestellte Wärmeenergie. Außer Acht gelassen wird jedoch, dass bei erhöhtem Betrieb der WP GKA die GKA stärker ausgekühlt wird.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird einbezogen, dass sobald im selben Zeitschritt (stündlich) sowohl BHKW als auch WP in Betrieb sind, die erzeugte elektrische Energie für die WP verwendet wird. Restlicher Überschuss wird mit der Vergütungspauschale der Einspeisung in das Stromnetz berücksichtigt. Somit kann günstiger produzierte elektrische Energie für die WP verwendet werden als bei Bezug aus dem Stromnetz.

Die spezifischen Wärmegestehungskosten (in €/kWh) setzen sich bei unterschiedlichen Soll-VL-Temperaturen der WP anhand der Untersuchung für die vier Betriebsreihenfolgen wie in Abbildung 65 gezeigt zusammen.

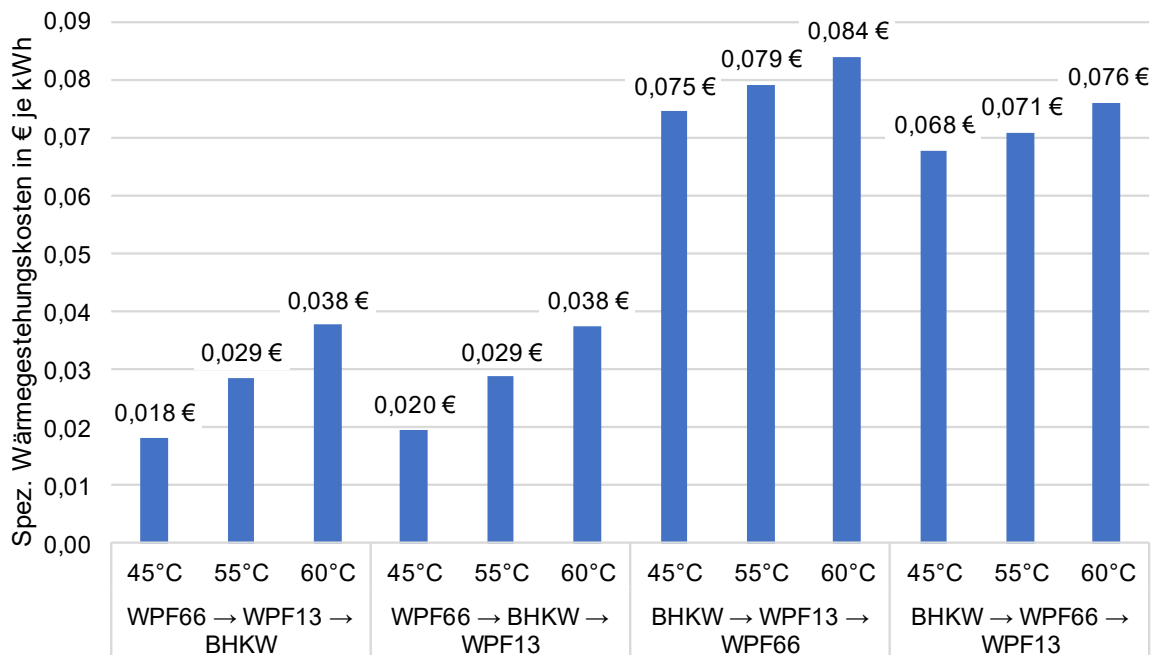


Abbildung 65 Spezifische Wärmegestehungskosten

Es wird deutlich, dass vor allem eine vorrangige Betriebsweise der WPF66 (WP GKA) besonders niedrige Wärmegestehungskosten hervorruft. Eine Veränderung der nachfolgenden Reihenfolge, ob BHKW oder WPF13, ist vernachlässigbar.

Eine vorrangige Betriebsweise der BHKW ist im Gegenzug besonders kostenintensiv, da der hinterlegte Erdgaspreis finanziell teuer ist und zugleich die Vergütungspauschale bei Einspeisung des Überschusses elektrischer Energie niedrig ist.

Aus den genannten Gründen ist es aus betriebswirtschaftlicher Sicht besonders sinnvoll, die BHKW nachgeschaltet zu betreiben. Es liegt dann eine hohe Gleichzeitigkeit vor, sodass der günstig produzierte Strom für die WP verwendet werden kann. Das verringert die Wärmegestehungskosten besonders stark.

Deutlich wird das Gefälle der Betriebskosten bei einer reinen Betrachtung der spez. Wärmegestehungskosten je Energieerzeuger, gezeigt in Abbildung 66.

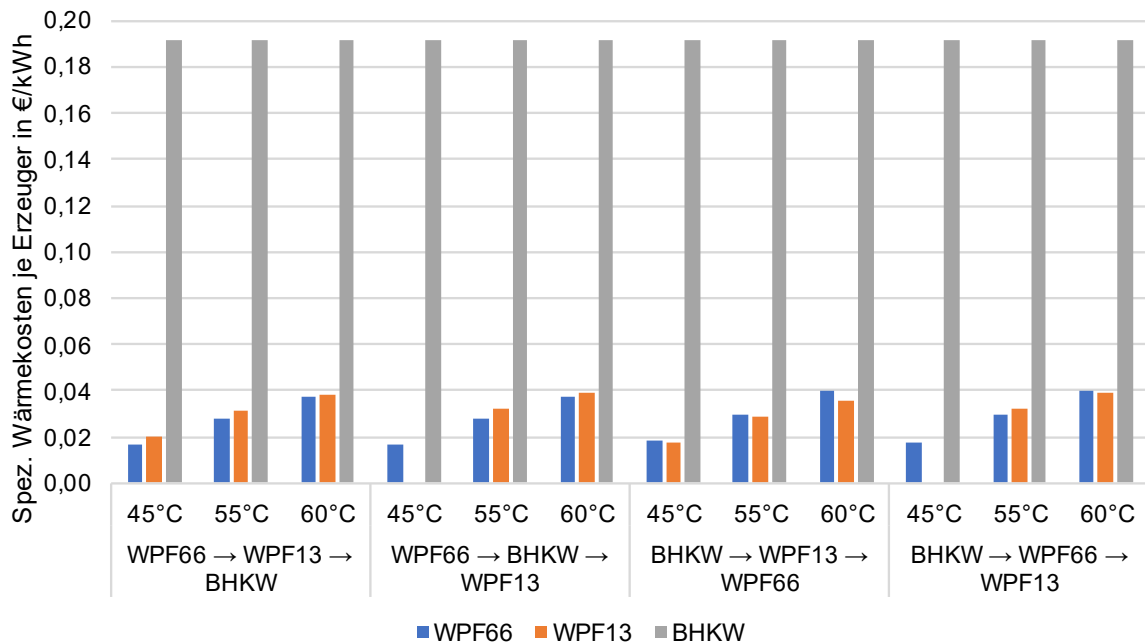


Abbildung 66 Spezifische Wärmekosten je Erzeuger

Die spez. Wärmegestehungskosten werden vor allem durch die hohen spez. Wärmekosten der BHKW bestimmt. Gleichzeitig steigen die Wärmekosten der WP mit zunehmender VL-Temperatur, da die Kosten für die elektrische Energie sich vergrößern und sich die AZ verschlechtern.

Die Betrachtung der resultierenden Jahresarbeitszahlen für die WP und die nötigen spez. Entzugsleistungen aus der GKA sind in Abbildung 67 gezeigt.

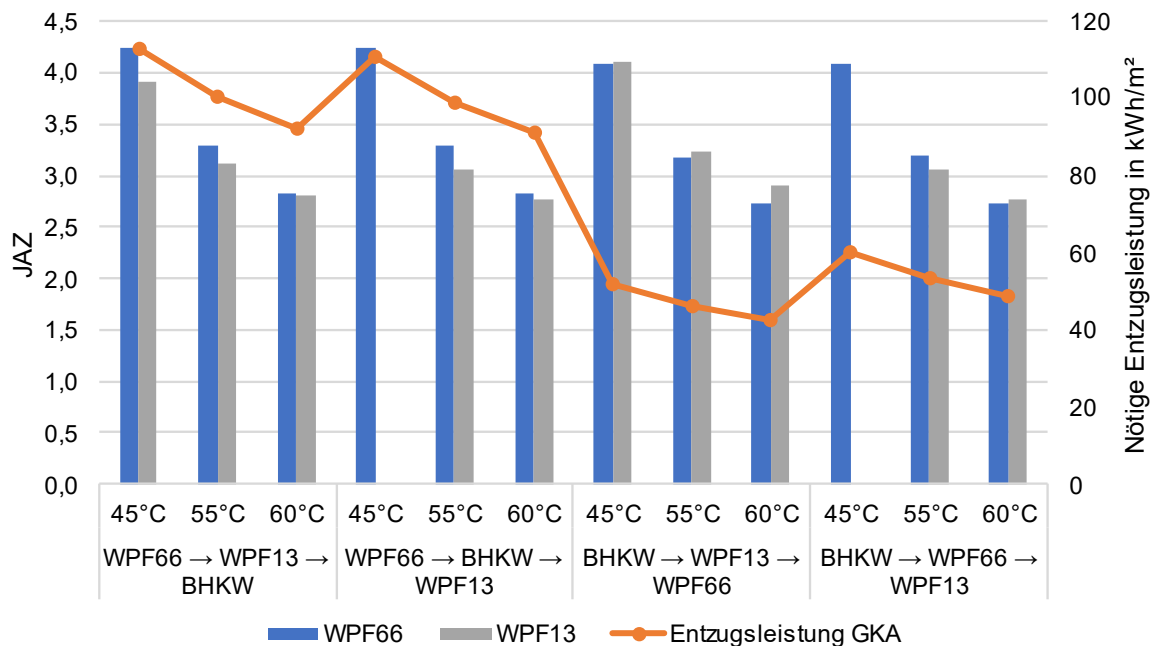


Abbildung 67 Jahresarbeitszahlen und spez. Entzugsleistungen aus der GKA

Analog zu den spez. Wärmekosten sinkt mit zunehmender VL-Temperatur die Jahresarbeitszahl der WP. Ein vorrangiger Betrieb der WPF66 zur größtmöglichen Deckung des Wärmebedarfs durch die GKA benötigt eine spez. Entzugsleistung von über 100 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Unter Berücksichtigung der sehr vereinfachten Untersuchung können dennoch erste Abschätzungen erzielt werden über eine optimale Betriebsreihenfolge.

Das Ergebnis zeigt des Weiteren, dass die theoretisch erzeugten Energiemengen sehr nahe an den messtechnisch erfassten Werten liegen. Auch sind die Kenngrößen wie Arbeitszahlen und nötige Entzugsleistungen sehr realistisch.

Zudem wird bewiesen, dass die in der Gebäudeleittechnik hinterlegte Reihenfolge mit der vorrangigen Nutzung der WP GKA mit einer Spitzenlastdeckung der BHKW sowohl aus ökologischen wie auch aus ökonomischen Gesichtspunkten die richtige Wahl ist. Die WP AWRGA nimmt eine untergeordnete Rolle im Gesamtsystem ein.

### **Entwicklung eines Ansatzes für eine regelbasierte Anlagensteuerung anhand der Fuzzy-Logik**

Im Gegensatz zu einer Steuerung auf Basis der Boole'schen Logik mit scharf umrissenen Ausgangsgrößen wie *True* oder *False* (1 bzw. 0) verwendet die Fuzzy-Logik unscharfe Mengen, die sogenannten Fuzzy-Mengen. Damit wird eine Eigenschaft nicht klar definiert einer Zugehörigkeit zugeordnet, sondern die Zugehörigkeit erfolgt abgestuft mit einem fließenden Übergang [8].

Vorteilhaft ist die Fuzzy-Logik, wenn eine mathematische Beschreibung eines Problems nicht vorliegt oder in mathematische Zusammenhänge schwierig zu übersetzen ist, was eine Automatisierung eines Systems wiederum nur sehr aufwendig und teuer bewerkstelligen lässt. Weiterer Anwendungsfall ist ein nur unzureichendes Wissen über ein Problem, was eventuell nicht alle möglichen Systemzustände beschreiben kann [27].

Die Beschreibung der Regelstrategien nach der Fuzzy-Logik, die für computergestützte Systeme ist, erfolgt in einer umgangssprachlichen Beschreibung des zu automatisierenden Systems. Damit kann aus den formulierten Sätzen ein mathematischer Zusammenhang über Zugehörigkeitsfunktionen abgeleitet werden, der jedem Element einen numerischen Wert aus einem Intervall als Zugehörigkeitsgrad zuweist.

Anwendungsgebiete der Fuzzy-Logik finden sich Vielfältig, indem Fuzzy-Regler in der Automatisierungstechnik, Medizintechnik, Fahrzeugtechnik und anderen Gebieten der Regelungstechnik genutzt werden. Auch im Bereich der künstlichen Intelligenz zum Beispiel bei der Spracherkennung leistet die Fuzzy-Logik einen wichtigen Beitrag [28].

Basierend auf der Fuzzy-Logik soll ein Regler in der Programmiersprache Python zusammen mit der speziell für Fuzzy-Anwendungen verfügbaren Python-Bibliothek *skfuzzy* entwickelt werden. Es soll ein Ansatz geliefert werden für die Erstellung eines Reglers zur Steuerung einer multivalenten Anlagentechnik. Dabei werden die jeweiligen Systemgrenzen nach Fuzzy über umgangssprachliche Begriffe definiert. Eine scharfe Bezeichnung der Systemtemperaturen wie bei einer regelbasierten Steuerung, die im Gebäude puls<sup>G</sup> über die Gebäudeleittechnik implementiert ist, ist nicht erforderlich. Damit kann eine arbeitsaufwendige Definition von scharfen Temperaturgrenzen vermieden werden.

Als Input-Größen wird dem Fuzzy-Regler die gemessene Wärmeleistung als auch die gemessene GKA-Temperatur im Jahr 2023 vorgegeben. Über die Zugehörigkeitsfunktionen werden Schaltzustände der WP GKA und der BHKW ermittelt. Mithilfe einer energetischen Modellierung des zentralen Wärmespeichers wird dessen Ladezustand ebenso berücksichtigt.

Die Definition der Zugehörigkeitsfunktion erfolgt für die GKA-VL-Temperatur nach dem in Abbildung 68 dargestellten Schema.

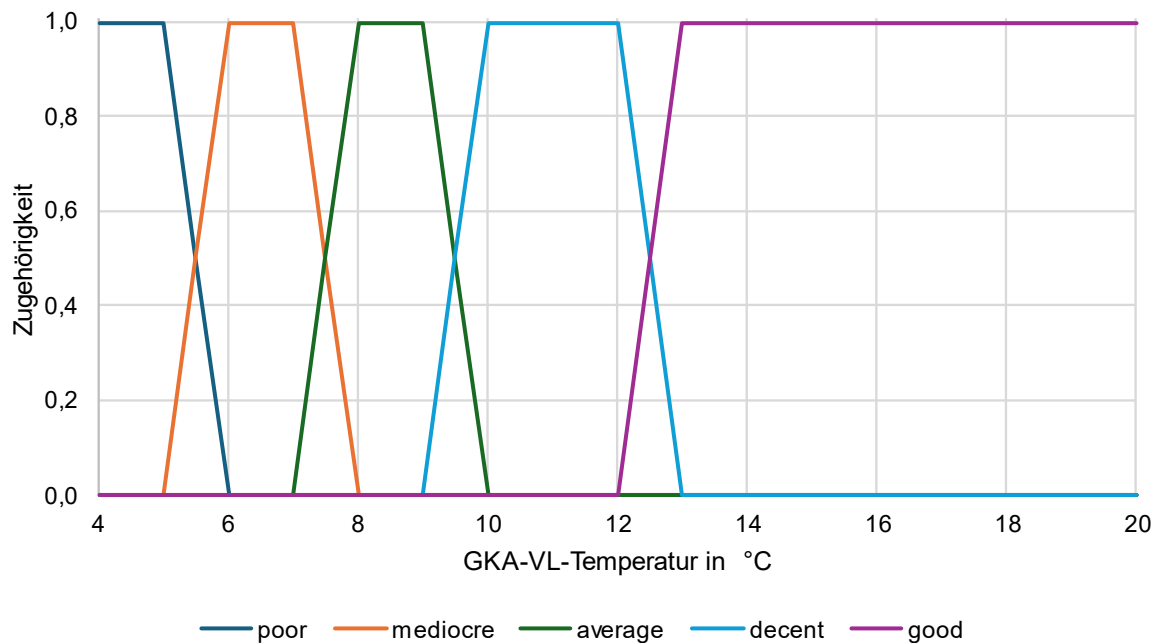


Abbildung 68 Zugehörigkeitsfunktion GKA-VL-Temperatur

Über eine selbstgewählte Trapezzuweisung wird jeder GKA-VL-Temperatur eine Zugehörigkeit zu einem Intervall zugeordnet. Die Intervalle sind mit den umgangssprachlichen Begriffen „poor“, „mediocre“, „average“, usw. bezeichnet. Beispielhaft ist eine Temperatur größer 12 °C sowohl der Menge „decent“ als auch der Menge „good“ zugeordnet. Erst ab der Temperatur größer 13 °C ist das entsprechende Element mit einer Zugehörigkeit von 1 der Menge „good“ zugeteilt. Es gibt keine scharfe Abgrenzung. Über die Mischung der Zugehörigkeitswerte aller Zuweisungen inklusive hinterlegter Regeln wird ein Endergebnis erzielt. Analog zu Abbildung 68 erfolgt die Zuweisung der Wärmeleistung als auch des Speicherzustands des Wärmespeichers.

Auch die Wärmeerzeugertechnologien erhalten eine Zugehörigkeit je nachdem, ob sie anhand eines Ratings weniger oder stärker gebraucht werden. Die Zugehörigkeitsfunktion ist sowohl für WP GKA als auch BHKW identisch definiert und ist in Abbildung 69 dargestellt.

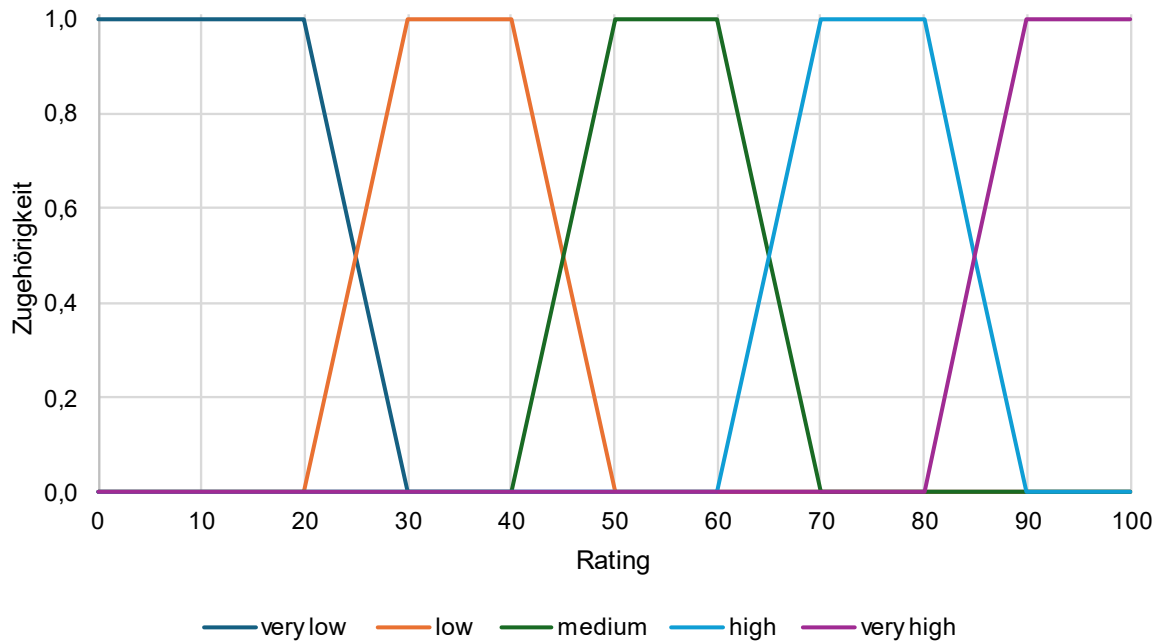


Abbildung 69 Zugehörigkeitsfunktion Rating WP GKA und BHKW

Mithilfe der Definitionen der Zugehörigkeitsfunktionen der Input-Größen (GKA-VL-Temperatur, Wärmeverbrauch, Ladezustand Wärmespeicher) können auf einer umgangssprachlichen Weise Regeln für die Ratings der Erzeugertechnologien erstellt werden.

So lautet beispielhaft eine Regel für die Zuweisung eines hohen Ratings der WP GKA bei einem niedrigen Wärmeverbrauch und niedrigen Ladezustand, aber einer hohen GKA-VL-Temperatur, wie folgt:

Wärmebedarf[„*poor*“] ODER GKA-VL-Temperatur[„*good*“] ODER Ladezustand[„*poor*“]  
 → Rating WP[„*very high*“]

Nach diesem Schema sind sowohl für die WP GKA als auch BHKW Ratings abgeleitet worden. Anhand der Ratings, die wiederum selbst ein Zuweisungswert zwischen 0 und 1 ausgeben, muss für die Steuerung der Anlagentechnik eine Übersetzungstabelle erstellt werden, die anhand gewisser Gewichtungen wiederum Boole'sche Logikwerte ausgibt.

Für die Untersuchung des Fuzzy-Reglers werden die gemessene Wärmeleistungen sowie GKA-VL-Temperatur des Jahres 2023 in 30-minütiger Aggregation verarbeitet. Somit soll alle 30 Minuten eine Neubewertung der Schaltzustände der Erzeuger erfolgen. Die Aggregation kann man beliebig feingliedrig oder gröber gestalten.

Der Wärmeverbrauch für 2023 in 30-minütiger Aggregation ist in Abbildung 70 dargestellt.

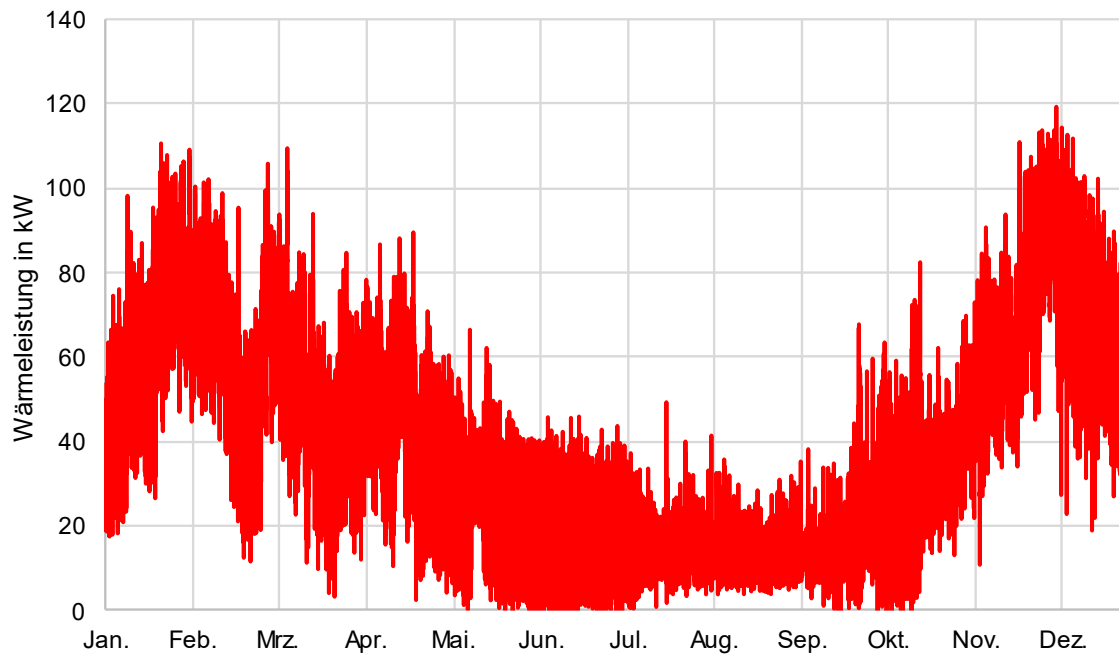


Abbildung 70 Wärmeverbrauch 2023 in 30-minütiger Aggregation

Zur Prüfung des Ergebnisses ist es vor allem entscheidend, ob eine vollständige Deckung des Wärmebedarfs im Jahresverlauf erfolgt. Dies garantiert die Versorgungssicherheit des Reglers, sodass Unterdeckungen vermieden werden.

Um dies beurteilen zu können, seien in Abbildung 71 die monatlichen Energiemengen der einzelnen Erzeuger, deren Summe sowie die nötige Wärmeleistung nach Messung dargestellt.

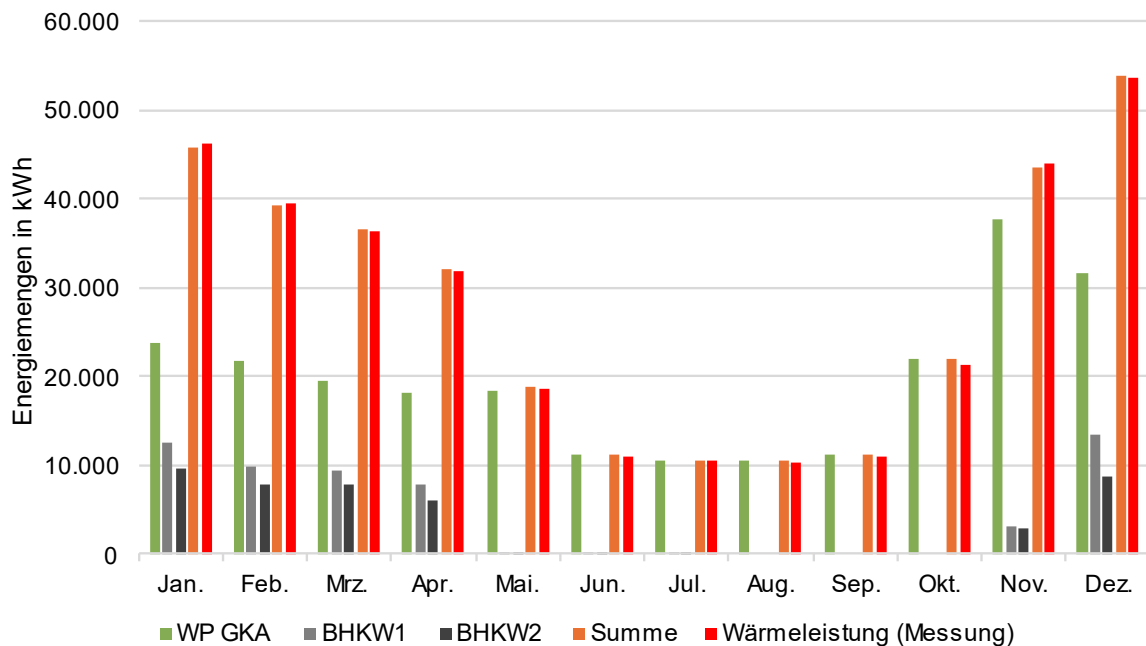


Abbildung 71 Energieversorgungssicherheit des Fuzzy-Reglers

Es zeigt sich, dass die Summe (orange Balken) der einzelnen Erzeuger nahezu identisch zum gemessenen Energieverbrauch (rote Balken) ist. Die Versorgungssicherheit ist gewährleistet. Für die Wärmebereitstellung zu Spitzenlastzeiten ist es nötig, dass zwei BHKW (BHKW1 und BHKW2) in Betrieb sind. Dieses Phänomen ist auch im Gebäude puls<sup>G</sup> zu beobachten. Hintergrund ist, dass bei sehr niedrigen Temperaturen der GKA nur eine geringe oder gar keine Deckung über die WP GKA erfolgen kann. Nachdem die BHKW in ihrer thermischen Nennleistung auch geringer sind als die WP müssen zwei BHKW geschaltet werden.

Besonders deutlich sieht man im Jahresverlauf, die ab Mai bis Oktober vollständige Deckung des Wärmebedarfs über die WP GKA.

Die prozentuale Verteilung der energetischen Erzeugungsanteile ist in Abbildung 72 hervorgehoben.

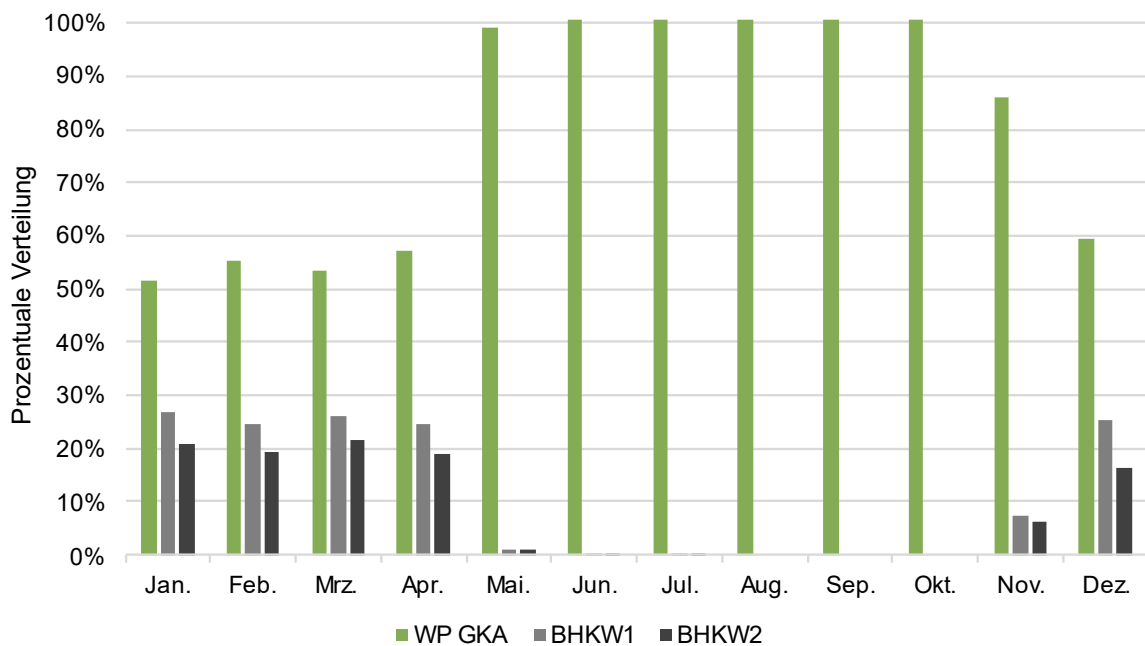


Abbildung 72 Prozentuale Verteilung der energetischen Erzeugungsanteile

Die Bereitstellung von thermischer Energie durch die WP liegt nach diesem Regelschema bei etwa 71 %. Die BHKW nehmen 29 % ein. Vergleicht man diese Werte mit den resultierenden, prozentualen Anteilen im Jahr 2023 nach Abbildung 64, so sind diese Ergebnisse sehr ähnlich. Im Jahr 2023 wurde eine Wärmebereitstellung über die WP GKA von 75 % erreicht. Der Rest teilte sich auf die WP AWRGA und BHKW.

Bei einer möglichen Integration der WP AWRGA in die Fuzzy-Regelung, die aufgrund von Vereinfachungsgründen vernachlässigt wurde, ist ein vergleichbares Ergebnis zu erwarten.

Bei Analyse der resultierenden AZ der WP nach dem Fuzzy-Regler ergibt sich für eine Soll-VL-Temperatur von 48 °C der in Abbildung 73 dargestellte Verlauf.

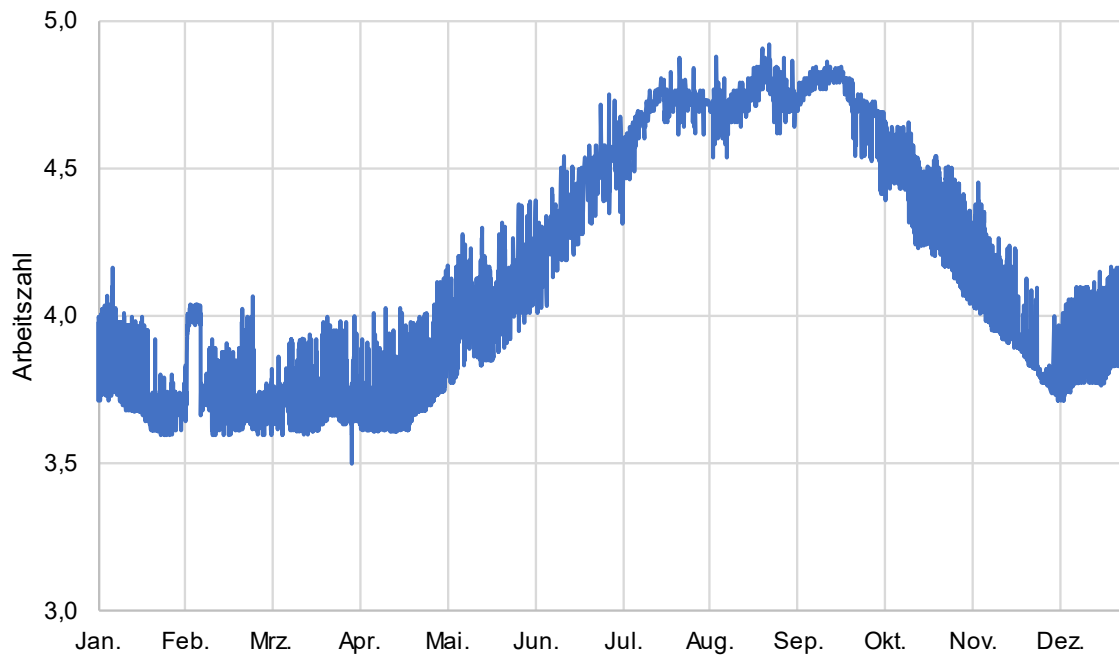


Abbildung 73 Verlauf Arbeitszahlen bei Soll-VL-Temperatur von 48°C

Nach den getroffenen Einstellungen am Fuzzy-Regler ergibt sich eine durchschnittliche AZ von 4,06. Für denselben Zeitraum ergibt sich eine gemessene durchschnittliche AZ für die WP GKA von 3,66. Dennoch ist zu beachten, dass der Messzeitraum bis Mai 2023 Monate beinhaltet, die infolge noch nicht richtig eingestellter Systemvolumenströme negativ beeinflusst wurde. Betrachtet man stattdessen den Zeitraum August 2023 bis Juli 2024, nach erfolgreicher Einstellung des Gesamtvolumenstroms im System, ergibt sich eine AZ von 3,93. Die Nähe zwischen dem Ergebnis aus der theoretischen Untersuchung am Fuzzy-Regler zu den Messwerten verdeutlicht die hohe Übereinstimmung als auch realitätstreue der Modellierung trotz verschiedener Vereinfachungen wie beispielsweise, dass der Einfluss der Betriebsweise der WP GKA auf die GKA-VL-Temperatur vernachlässigt wird. Diese Annahme ist vertretbar, da die Grundwassertemperatur als auch der Grundwasserfluss im Allgemeinen den größten Einfluss auf die GKA hat. Die GKA-Temperatur korreliert zur Grundwassertemperatur.

Zusammenfassend zeigt sich, dass ein Ansatz zur Modellierung eines Fuzzy-Reglers für eine multivalente Anlagentechnik mit GKA erfolgreich entwickelt werden konnte. Die Ergebnisse sind vergleichbar zu den Messwerten. Zudem beweist der Fuzzy-Regler, dass einer auf umgangssprachlich definierten Grenzen, die keiner scharfen Abgrenzung bedürfen, eine hohe Zuverlässigkeit und einen energieeffizienten Betrieb ermöglicht. Mithilfe der gewonnen Ergebnisse kann der Regler über die WP AWRGA erweitert werden. Auch eine Implementierung in die Gebäudeleittechnik zu Testzwecken mit einer sehr genauen Beobachtung des Verhaltens zur Sicherung der Versorgung ist möglich.

Bemerkenswert ist zudem die Einfachheit der Erstellung und Definition eines solchen Reglers im Vergleich zu einer arbeitsintensiven Definition von Temperaturgrenzen bei einer regelbasierten Steuerung.

### 1.2.2.5 Nutzerbefragung

(THN)

Aufgrund der Vielzahl an Mietenden und Nutzenden des Gebäudes ergeben sich im Arbeitspaket 2 „Betriebsoptimierung“ des Weiteren wissenschaftliche Fragestellungen, die eine reine Messdatenauswertung und Anlagenoptimierung übersteigen. Einen erheblichen Einfluss auf eine erfolgreiche Betriebsoptimierung als auch einen effizienten Gebäudebetrieb haben neben der Anlagentechnik die Nutzer des Gebäudes. Um diesen Forschungsaspekt im Forschungsvorhaben zu beleuchten und zu analysieren sowie einen verstärkten Einblick in das Nutzerverhalten als auch das energetische Bewusstsein der Nutzer zu erlangen, ist eine einjährige Kooperation mit dem Kompetenzzentrum KoSIMA der THN entstanden.

Die Erhebung von nutzerspezifischen Informationen ist aufgeteilt in zwei Befragungsrunden. Die erste Befragung fand von November 2022 bis Januar 2023 statt. Die zweite Runde erfolgte von Mai 2023 bis Juni 2023. Mithilfe standardisierter Fragebögen können bei den 66 Wohneinheiten Unterschiede als auch Entwicklungen abgeleitet werden. Über Informationsflyer und Aushänge wurden die Bewohner in einem angemessenen zeitlichen Abstand informiert. Unterstützt wurden die Ergebnisse aus den Fragebögen durch ausführliche Interviews mit freiwillig gewählten Bewohnern. Die Befragung fand Anfang 2023 statt.

Der Rücklauf ausgefüllter Fragebögen beträgt ca. 20 %, was zufriedenstellend ist. Aufgrund des Datenschutzes der Mietenden und dem daraus resultierenden Fehlen von Informationen zur Zusammensetzung aller Mietenden, sind keine Aussagen über die Grundgesamtheit ableitbar.

#### Daten bezüglich der teilnehmenden Haushalte

Die überwiegende Mehrheit (74 %) der teilnehmenden Haushalte leben in einem Paarhaushalt (inklusive Familien), gefolgt von Einpersonenhaushalten mit einem Anteil von 26 %. Es bestanden keine Wohngemeinschaften. Ein Viertel der teilnehmenden Haushalte gibt an, dass mindestens eine Person des Haushaltes als Senior gezählt werden kann. 73 % der teilnehmenden Haushalte leben in Wohnung mit 3 oder mehr Zimmern.

Die Aufteilung ist in Abbildung 74 und Abbildung 75 verdeutlicht.

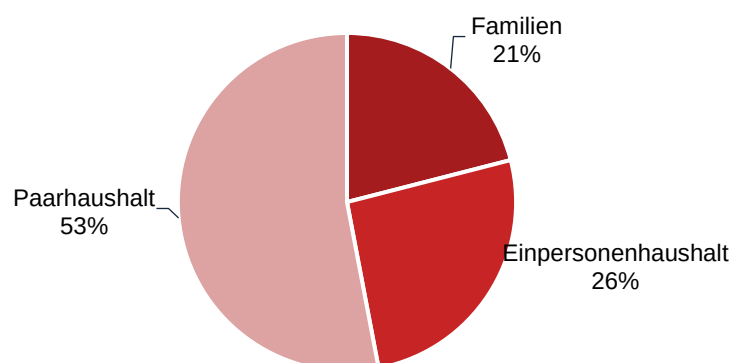


Abbildung 74 Gliederung der Haushaltsformen (n=19)

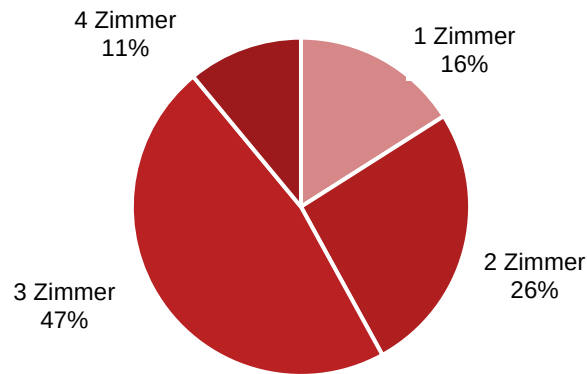


Abbildung 75 Wohnungsgröße der teilnehmenden Haushalte (n=19)

Der überwiegende Anteil der Befragten geben des Weiteren an, direkt nach Bauabschluss eingezogen zu sein. Die Einzugsgründen werden dabei vor allem bestimmt durch die Lage als auch den Neubau (69 %) sowie über das verbaute Energiekonzept (39 %).

Auch die Thematik der Wohnqualität und dem Wohlbefinden in den Wohnungen wird durchwegs als sehr positiv angegeben. Nahezu jeder ist vom Gesamtkonzept überzeugt (92 %).

### **Ergebnisse zum Energieverbrauch**

Bei Befragung der Bewohner nach ihrem Kenntnisstand zur dezentralen Wohnungsstation konnten einige Wissenslücken identifiziert werden. So wusste ein großer Teil nicht, welchen Verwendungszweck die Fernbedienung der Wohnungsstation hat. Dennoch wurde der Wunsch nach näheren Informationen geäußert. Mithilfe weiterer Informationsflyer konnte diesem Wunsch nachgekommen werden (vgl. hierzu Anhang A.2).

Auch gewisse Handlungsempfehlungen konnten über die Umfrage und nachfolgende Flyer übermittelt werden. Dies hat vor allem das Thema von Energieeinsparmaßnahmen adressiert. Über Befragungen vor der Weitergabe von Empfehlungen wurde die Anzahl an Personen abgefragt, die gewisse Maßnahmen zum Energiesparen bereits nutzen. Das Ergebnis wurde verglichen mit der ähnlichen Abfrage in der zweiten Umfrage, aber dann zuvor verteilten Informationsblättern. Es zeigt sich eine Entwicklung zu einer erhöhten Umsetzung und auch Bereitschaft von Personen, Maßnahmen umzusetzen.

Für ausgewählte Kategorien ist die Entwicklung der Haushalte, die Maßnahmen aktiv umsetzen, in Abbildung 76 dargestellt.

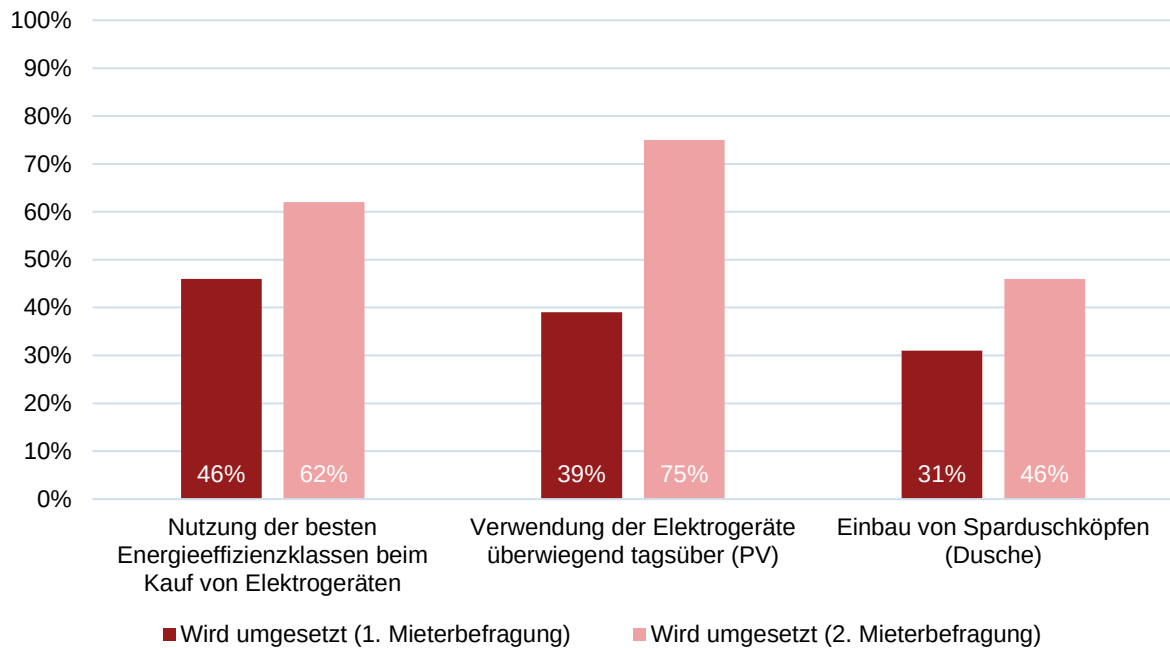


Abbildung 76 Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen im Zeitvergleich

Auch was den Aufenthalt zuhause angeht, lassen sich Unterschiede zwischen der ersten Mieterbefragung im Winter und der zweiten Mieterbefragung im Sommer feststellen. Dabei ist die Differenzierung zwischen Sommer und Winter am Wochenende deutlich erkennbarer als unter der Woche. Während die befragten Haushalte am Samstag im Winter deutlich mehr zuhause sind als im Sommer, sind sie am Sonntag im Winter deutlich weniger zuhause als im Sommer. Diese Zusammenhänge sind als prozentuale Aufteilung über die Tagesstunden in Abbildung 77 für Samstage und in Abbildung 78 für Sonntage visualisiert.

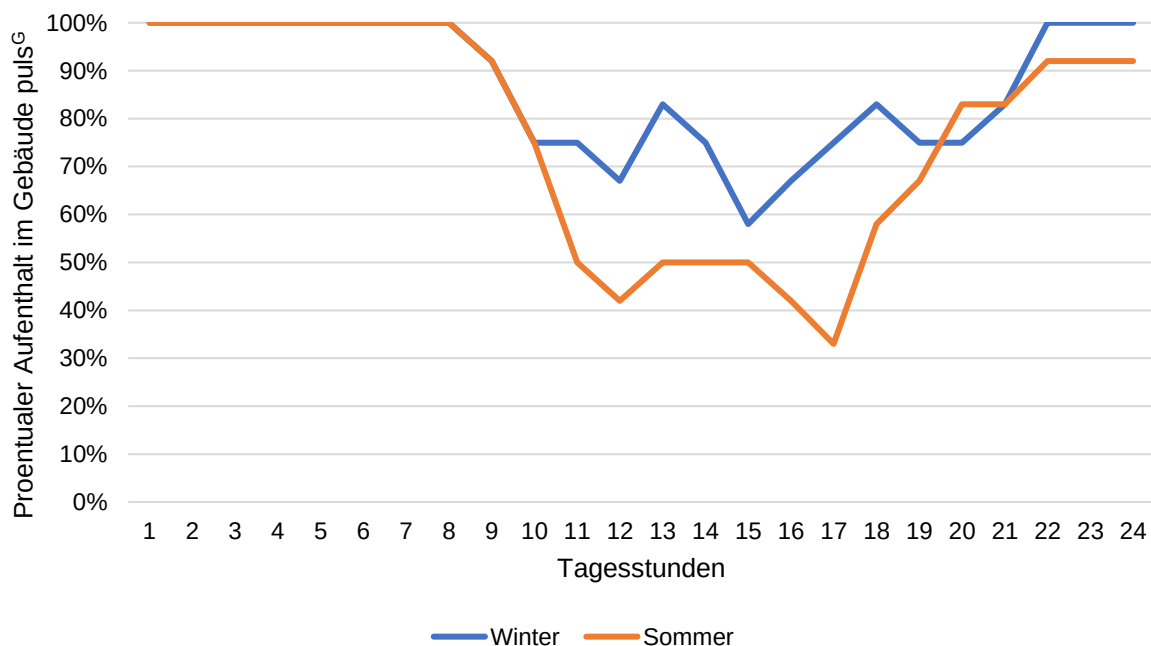


Abbildung 77 Aufenthalt im Gebäude an Samstagen (Vergleich Sommer mit Winter)

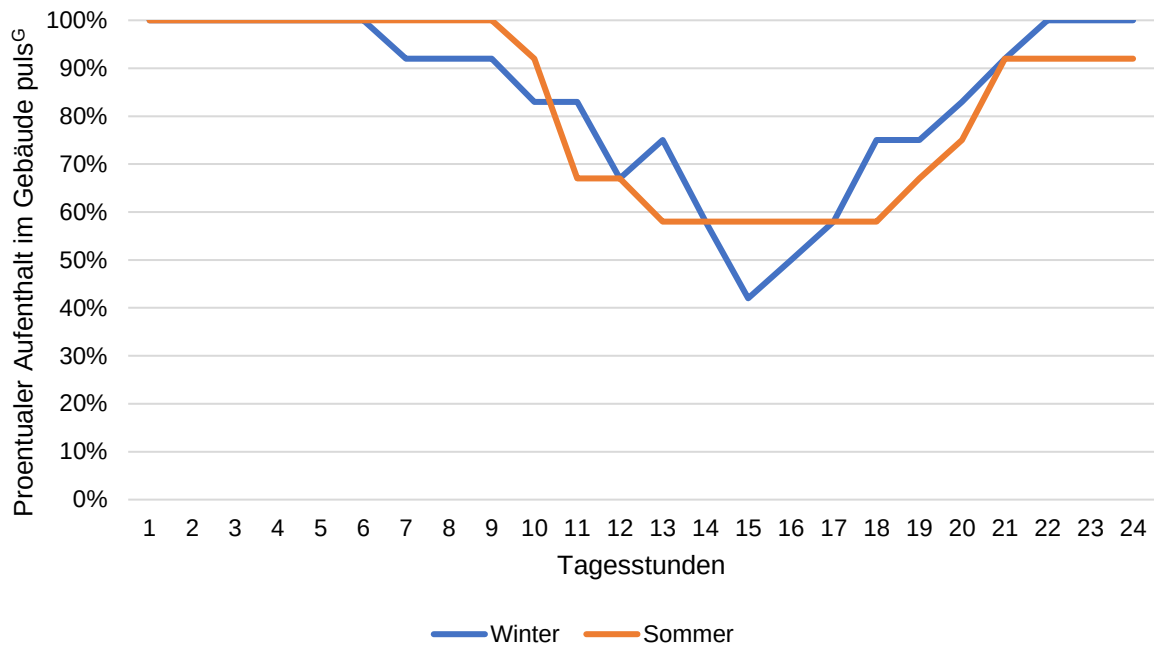


Abbildung 78 Aufenthalt im Gebäude an Sonntagen (Vergleich Sommer mit Winter)

Unter der Woche (Montag bis Freitag) zeigt sich im Sommer und im Winter ein ähnliches Bild: Mehr als die Hälfte ist von 8 Uhr (Winter)/ 9 Uhr (Sommer) bis 13 Uhr (Winter)/ 14 Uhr (Sommer) nicht zuhause. Zum Mittag halten sich die Hälfte zuhause auf. Dann sind es von 13 Uhr (Winter)/ 14 Uhr (Sommer) bis 16 Uhr (Winter und Sommer) wieder weniger als die Hälfte (vgl. hierzu Abbildung 79).

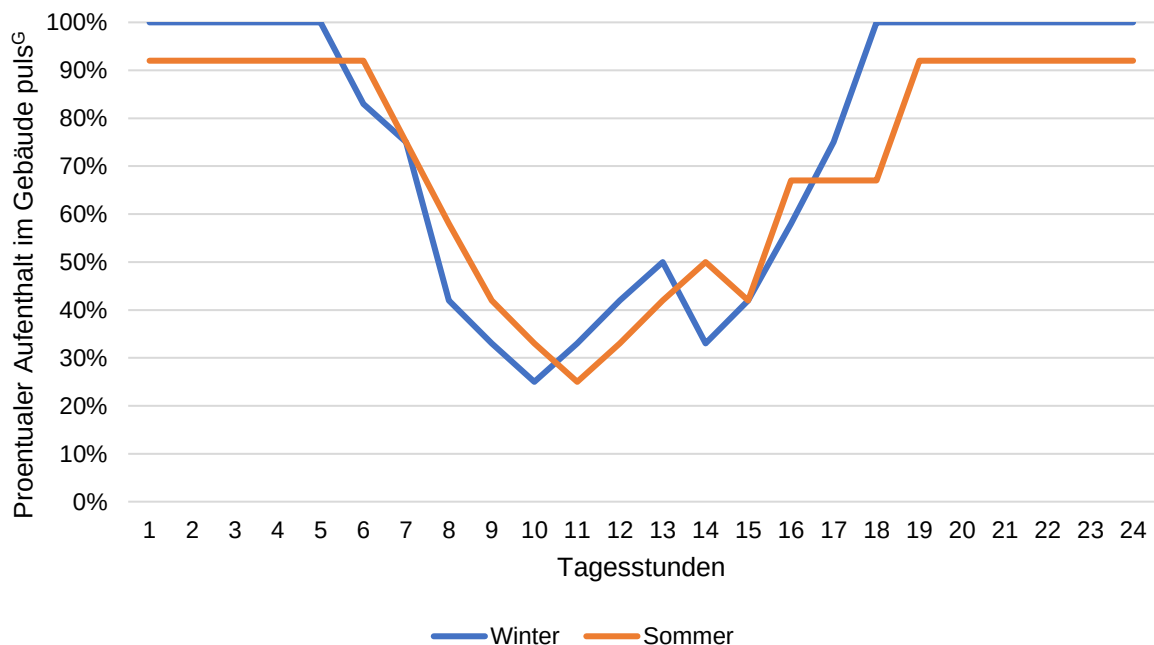


Abbildung 79 Aufenthalt im Gebäude unter der Woche (Vergleich Sommer mit Winter)

### **Ergebnisse der Interviews**

Die Mieter äußern durchgängig eine hohe Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten ihrer Wohnsituation. Die Fußbodenheizung, das Abluftsystem und die Trinkwarmwasserbereitung werden besonders hervorgehoben. Auch die positiven Elemente des Gebäudes, beispielsweise die moderne Bauweise, der Neubau, die Helligkeit und Wärme der Wohnungen, die behinderten- und altersgerechte Gestaltung, die zentrale Lage und die Ruhe innerhalb der Wohnungen, tragen zum Wohlbefinden der Mieter bei. Das soziale Miteinander wird ebenfalls positiv erwähnt, wie auch die Zufriedenheit mit der durchgeführten Informationsveranstaltung.

Die Mieter äußern positive Gefühle und Einstellungen beim Gedanken an das Energiekonzept und das eigene Sparen von Energie. Die interviewten Mieter sprechen davon, dass Energiesparen ohne besondere Schwierigkeiten für alle machbar ist und nicht zwangsläufig einen Verzicht bedeutet. Energiesparen bedeutet Solidarität und ermöglicht auch Freude bei kleinen Erfolgen mit der Hoffnung, dass das eigene Handeln positive Auswirkungen hat. Die interviewten Mieter sehen Energiesparen auch aufgrund der steigenden Preise als notwendig an.

Potenziale zur Verbesserung bieten innerhalb der technischen Ausstattung eine Temperaturanzeige bei der Trinkwarmwasserbereitung und eine Erläuterung der Energiezentrale. An dieser Stelle gilt es zu erwähnen, dass es nicht unbedingt sinnvoll ist, den Mietern die Energiezentrale zu erklären, in dem sie selbst nichts verstellen sollen, dieser aber von den Mietern ohne Aufsicht zugänglich ist. Davon abgeleitet kann aber festgehalten werden, dass manche Mieter ein Informationsbedürfnis zu technischen Abläufen innerhalb der Wohnung haben. So äußern die Mieter den Wunsch nach mehr Informationen bezüglich verschiedener Sachverhalte, darunter der Trinkwarmwasserbereitung, der Temperaturregelung, der Heizanlage, dem Energiekonzept, der GKA an sich, der Integration von GKA und PV ins Wohnkonzept sowie der Stromnutzung.

Für zukünftige Projekte kann ein verbesserter Informationsfluss von Beginn an festgehalten werden. Hierzu schlagen die interviewten Mieter Informationsveranstaltungen und die Bereitstellung von Informationsmaterial vor. Der Wunsch nach einem kurzen Überblick über alle bedienbaren Elemente, einer persönlichen Vorstellung des Projekts mit Ansprechpartnern und einem Pamphlet, das die wichtigsten Informationen zusammenfasst, wird geäußert. Die Mieter schlagen gelegentliche Befragungen zur Weiterentwicklung von Energiekonzepten vor, um den Informationsfluss aufrechtzuerhalten und damit Möglichkeiten zur Optimierung zu bieten.

## 1.2.3 AP3 – BuildingXModeling

### 1.2.3.1 Building Energy Modeling (BEM)

(HM)

Das vorliegende Simulationsmodell basiert auf einem Gebäudemodell von pulsG, das mithilfe der Simulationssoftware IDA ICE entwickelt wurde. Ziel war es, das bestehende Modell weiterzuentwickeln und an die aktuellen Gegebenheiten des Bestands anzupassen. Im ersten Schritt wurden dazu die gebäudetechnischen Anlagen detailliert ergänzt. Dieser Prozess umfasste insbesondere die Erstellung eines umfassenden und präzisen Anlagenmodells im „Advanced Level“ von IDA ICE, das auf Basis der realen technischen Ausrüstung des Gebäudes pulsG entwickelt wurde.

Zu den ergänzten Anlagen zählten die Modellierung der bestehenden Abluftanlage sowie der Photovoltaikanlage (PV-Anlage) mit integriertem Batteriespeicher. Beide Systeme wurden basierend auf den vorliegenden technischen Spezifikationen des Gebäudes realitätsnah abgebildet. Darüber hinaus wurde die vorhandene Regelung des Gebäudebetriebs in vereinfachter Form implementiert, um eine Grundlage für die weitere Optimierung der Steuerungsstrategien zu schaffen.

#### **Ausgangslage**

Im Gebäude pulsG ist zur Bereitstellung der Quellenenergie für die Geothermie Wärmepumpen ein horizontaler Erdkollektor vorhanden. In diesem Fall liegt der Erdkollektor unter der Bodenplatte der Tiefgarage (2.UG). Die dadurch entstehende tiefe Lage des Erdkollektors, hat zur Folge, dass der Erdkollektor dementsprechend in einem Grundwasser-Aquifer lokalisiert ist. Im Zuge der Bearbeitung des Projekts, wurde zuerst versucht, den Erdkollektor durch ein physikalisches Modell in IDA ICE abzubilden. Dies stellte sich jedoch als sehr schwierig heraus, da die Modellierung von horizontalen Erdkollektoren, unter normalen Umständen, in IDA ICE zum damaligen Stand (03—04/24) nicht wirklich ausgereift und hauptsächlich über Umwege verwirklicht wurde. Dementsprechend mussten mehrere physikalische Modelle zweckentfremdet werden, um eine präzise physikalische Abbildung eines wie in pulsG vorliegenden Erdkollektors bewirken zu können. Darüber hinaus wurde nach Abstimmung mit dem Support von IDA ICE klar, dass wahrscheinlich noch nie ein grundwasserdurchströmter horizontaler Erdkollektor in IDA ICE abgebildet wurde. Weitere Bemühungen zur Konsultierung von Experten über IBPSA-DACH, die bereits ähnliche Aufgabenstellungen bewältigt haben waren ebenfalls erfolglos.

Daraufhin wurde nach anderen Möglichkeiten zur Abbildung des vorliegenden Erdkollektors in IDA ICE gesucht. In Abstimmung mit dem Support von IDA ICE wurde daraufhin die Möglichkeit des Einlesens von Messdaten als Randbedingung über eine sogenannte .prn-Schnittstelle aufgezeigt. Nachdem ausführliche Datenreihen aus dem laufenden Betrieb des Gebäudes durch die Gebäudeautomation zur Verfügung standen, wurde entschieden, dass der vorhandene Erdkollektor über seine Quellentemperaturen in die Anlagensimulation als Randbedingung eingebunden wird.

### Analyse der Messdaten des Erdkollektors:

Zwischen den Jahren 2021 und 2023 wurde der Betrieb des Gebäudes pulsG umfassend über ein Gebäudeautomations-System aufgezeichnet. Im Rahmen dieser Aufzeichnungen wurden alle relevanten Messpunkte erfasst, um eine detaillierte Analyse des Betriebsverhaltens und der Energieflüsse zu ermöglichen. Zu den aufgezeichneten Messpunkten zählten unter anderem die Temperaturen, Energiemessungen sowie der Stromverbrauch der Wärmeerzeuger. Diese Daten bilden eine wichtige Grundlage für die Evaluierung der Effizienz und Performance des Systems.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Modellierung und Abbildung des Erdkollektors gelegt. Hierfür wurden die Daten des spezifischen Datenpunkts "Tp97tpMittKolIVL Kollektor Vorlauf" verwendet. Dieser Messpunkt lieferte zentrale Informationen über den Vorlauf des Erdkollektors und ermöglichte eine präzise Abbildung der thermischen Prozesse in der Modellierungssoftware IDA ICE.

Die Struktur und Zuordnung der Messdaten sind aus Abbildung 80 - einer schematischen Darstellung der Datenpunkte ersichtlich. Diese Visualisierung dient nicht nur der besseren Nachvollziehbarkeit der Datenerfassung, sondern unterstützt auch die Modellierungsarbeiten, indem sie die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Messpunkten verdeutlicht. So konnten die gesammelten Daten über die simulationstechnische Abbildung des Erdkollektors hinaus effektiv genutzt werden, um den Betrieb des Systems zu analysieren

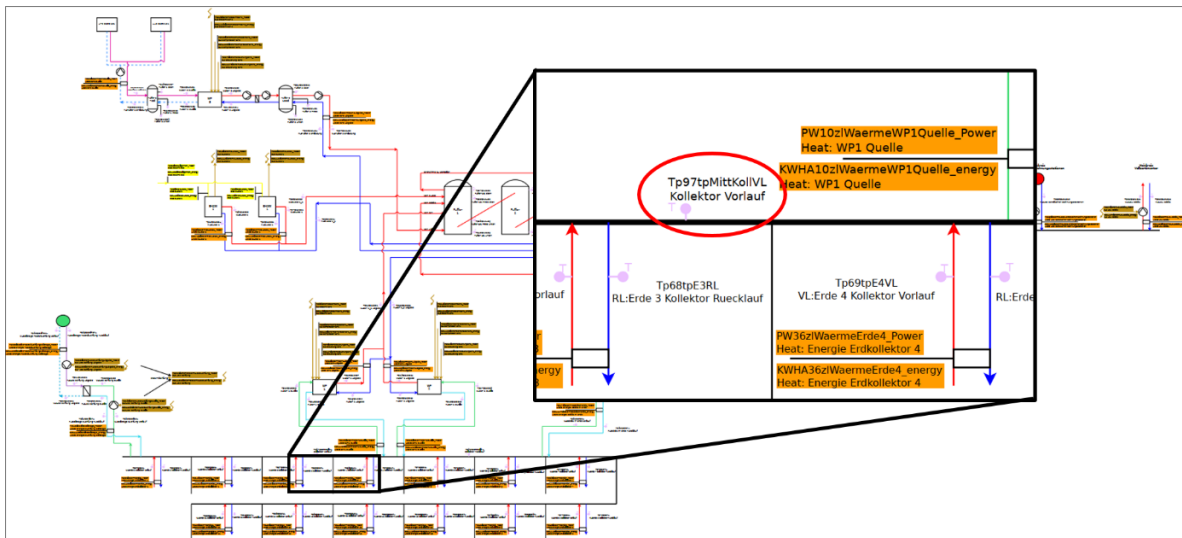


Abbildung 80 Markierung des Datenpunkts über den die verwendeten Messdaten erhoben wurden

Um aus den von der Gebäudeautomation aufgezeichneten und archivierten Messdaten einen für die Gebäudesimulation kompatiblen Datensatz zu erstellen, wurden die Daten als erstes auf ihre Vollständigkeit sowie ihre Verwertbarkeit geprüft. Die Messdaten wurden dabei in CSV-Dateien zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Wie bereits angesprochen, erstreckten sie sich über das Jahr 2021 bis 2023 und waren in monatlichen Zeitabständen untergliedert. Insgesamt handelt es sich bei den aus der Gebäudeautomation ausgelesenen Messreihen um Daten in minütlicher Auflösung von 1197 Datenpunkten.

Durch das Dateiformat und die Größe der Messreihen bot sich eine Auswertung und Bearbeitung der Daten über Python an. Dementsprechend erfolgte die Prüfung sowie die Ver- und Bearbeitung der Daten über ein Python-Skript, das über die webbasierte Anwendung Jupyter Notebooks erstellt sowie ausgeführt und visualisiert wurde. In Abbildung XX ist der Programm-Code des Python-Skripts ersichtlich. Nachfolgend soll der Programm-Code der durchgeführten Datenauswertung und -bereinigung näher erklärt werden.

#### *Erläuterung Basis-Code*

Der erste Abschnitt des Codes dient dazu, die notwendigen Bibliotheken zu importieren, die für die Verarbeitung, Bereinigung und Visualisierung der Daten erforderlich sind. Zunächst wird die Bibliothek pandas mit dem Alias pd importiert. Sie stellt leistungsstarke Datenstrukturen und Funktionen zur Verfügung, die speziell für die Verarbeitung von tabellenartigen Daten wie CSV-Dateien geeignet sind. Darüber hinaus wird numpy mit dem Alias np eingebunden. Diese Bibliothek liefert mathematische und statistische Werkzeuge, die in diesem Fall für die Berechnung des Interquartilsabstands (IQR) benötigt werden. Für die Visualisierung der Daten wird die Bibliothek matplotlib.pyplot als plt importiert. Sie ermöglicht die Erstellung von Diagrammen, die hier zur Darstellung der bereinigten Temperaturdaten verwendet werden. Schließlich wird das Modul os importiert, um mit dem Dateisystem zu interagieren. Es wird verwendet, um Dateien in einem bestimmten Verzeichnis zu durchsuchen und Dateipfade zu generieren. Durch den gezielten Import dieser Module wird die Funktionalität des Codes klar strukturiert und auf die wesentlichen Anforderungen beschränkt.

Im zweiten Abschnitt werden zentrale Variablen definiert, die den Ablauf des Programms steuern. Die Variable pfad\_datan gibt an, in welchem Verzeichnis die zu verarbeitenden CSV-Dateien gespeichert sind. Dies ist notwendig, da das Programm in diesem Verzeichnis nach geeigneten Dateien sucht. Weiterhin werden die Variablen column\_name und timestamp\_column definiert. Sie enthalten die Namen der relevanten Spalten, die aus den CSV-Dateien eingelesen werden sollen. Während column\_name die Temperaturmesswerte spezifiziert, die analysiert werden, identifiziert timestamp\_column die Spalte mit den Zeitstempeln, die zur zeitlichen Einordnung der Daten dienen. Diese zentrale Definition ermöglicht es, Änderungen an den analysierten Daten einfach vorzunehmen, ohne den gesamten Code anpassen zu müssen.

Der dritte Abschnitt dient der Vorbereitung einer Datenstruktur, in der die bereinigten Daten gesammelt werden. Hierzu wird eine leere Liste namens data\_frames initialisiert. Diese Liste fungiert als Speicher, um temporäre DataFrames aus jeder CSV-Datei zu speichern, die in den folgenden Schritten verarbeitet werden. Der Einsatz einer Liste erlaubt es, die Bereinigung der Daten schrittweise und modular vorzunehmen, bevor die Ergebnisse zusammengeführt werden. Dieser Schritt ist besonders wichtig, wenn viele Dateien verarbeitet werden, da er eine klare Trennung zwischen der Verarbeitung einzelner Dateien und der späteren Zusammenführung ermöglicht.

Der vierte Abschnitt des Codes stellt den zentralen Verarbeitungsschritt dar, in dem die CSV-Dateien aus dem angegebenen Verzeichnis systematisch bearbeitet werden. Der Prozess beginnt mit dem Durchsuchen des definierten Verzeichnisses, dessen Pfad in der Variable

pfad\_daten gespeichert ist. Mithilfe der Funktion `os.listdir(pfad_daten)` wird eine Liste aller Dateien und Ordner im Zielverzeichnis erstellt. Diese Liste wird anschließend mittels einer for-Schleife durchlaufen, wobei jede Datei durch die Variable `filename` repräsentiert wird.

Da nicht alle Dateien im Verzeichnis für die Verarbeitung relevant sind, erfolgt zunächst eine Filterung. Zwei Bedingungen müssen erfüllt sein: Erstens muss die Datei die Endung `.csv` haben, da nur CSV-Dateien verarbeitet werden sollen. Zweitens muss der Dateiname eine der Jahreszahlen 2021, 2022 oder 2023 enthalten, da lediglich Daten aus diesen Zeiträumen für die Analyse vorgesehen sind. Die Filterung erfolgt durch eine kombinierte Bedingung, die sicherstellt, dass nur Dateien, die beide Kriterien erfüllen, für die weitere Verarbeitung berücksichtigt werden. Dateien, die diese Anforderungen nicht erfüllen, werden automatisch übersprungen.

Für jede Datei, die die Kriterien erfüllt, wird der vollständige Dateipfad erzeugt. Dies geschieht mithilfe der Funktion `os.path.join(pfad_daten, filename)`. Der vollständige Pfad ist notwendig, da die Funktion `os.listdir` nur den Namen der Datei liefert, aber nicht ihren Speicherort im Verzeichnis. Mit dem generierten Pfad kann die Datei in den nächsten Schritten geöffnet und verarbeitet werden.

Nun erfolgt das Einlesen der Daten aus der Datei mit der Funktion `pd.read_csv`. Um Speicherplatz und Rechenleistung zu optimieren, werden nur die beiden relevanten Spalten eingelesen: `timestamp_column`, die Spalte mit den Zeitstempeln, und `column_name`, die die Temperaturmesswerte enthält. Dies wird durch das Argument `usecols=[timestamp_column, column_name]` sichergestellt. Alle anderen Spalten der Datei werden ignoriert, da sie für die Analyse nicht benötigt werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bereinigung der eingelesenen Daten. Dabei wird die sogenannte Interquartilsabstandsmethode (IQR-Methode) angewendet, ein statistisches Verfahren zur Identifizierung und Entfernung von Ausreißern. Zunächst werden das erste Quartil (Q1, 25. Perzentil) und das dritte Quartil (Q3, 75. Perzentil) der Werte in der Temperaturspalte berechnet. Der Interquartilsabstand (IQR) ergibt sich aus der Differenz zwischen Q3 und Q1. Mit diesen Werten werden die unteren und oberen Grenzen für gültige Daten berechnet: untere Grenze =  $Q1 - 1.5 \times IQR$  und obere Grenze =  $Q3 + 1.5 \times IQR$ . Alle Werte, die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden als Ausreißer betrachtet.

Nach der Identifikation der Ausreißer werden diese aus den Daten entfernt. Die Bereinigung erfolgt, indem das Datentabelle so gefiltert wird, dass nur die Werte, die innerhalb der berechneten Grenzen liegen, erhalten bleiben. Dies stellt sicher, dass fehlerhafte oder extreme Werte, die durch Messfehler oder ungewöhnliche Bedingungen entstanden sein könnten, aus der Analyse ausgeschlossen werden. Die bereinigte Datentabelle wird schließlich in der Liste `data_frames` gespeichert. Diese Liste dient als zentraler Speicherort für die bereinigten Daten aus allen relevanten Dateien.

Der gesamte Abschnitt ist darauf ausgelegt, große Mengen an Rohdaten systematisch zu filtern, bereinigen und zu sammeln. Durch die iterative Verarbeitung jeder Datei wird eine modulare Struktur geschaffen, die es ermöglicht, die Daten aus vielen Dateien unabhängig zu analysieren und anschließend zusammenzuführen. Dies sorgt für eine effiziente und flexible Handhabung der Daten.

Nachdem alle relevanten Dateien einzeln verarbeitet wurden, folgt die Zusammenführung der bereinigten Ergebnisse. Hierzu wird die Funktion `pd.concat` verwendet, die es ermöglicht, mehrere DataFrames zu einer einzigen Datentabelle zu kombinieren. Das Argument `ignore_index=True` stellt sicher, dass die Indizes der Zeilen neu generiert werden, sodass die finale Datentabelle eine konsistente Struktur aufweist. Die kombinierte Datentabelle enthält nun alle bereinigten Temperaturdaten aus den verschiedenen Dateien und stellt die Grundlage für die weitere Analyse dar.

Der letzte Abschnitt des Codes widmet sich der Visualisierung der Daten. Zunächst wird überprüft, ob die Spalte mit den Temperaturwerten (Kollektor Vorlauf\_°C) in der finalen Datentabelle enthalten ist. Diese Sicherheitsprüfung verhindert, dass der Code mit einer Fehlermeldung abbricht, falls die Spalte aus irgendeinem Grund fehlt. Wenn die Spalte vorhanden ist, wird ein Liniendiagramm erstellt, das den Verlauf der bereinigten Temperaturdaten über die Indizes der Datentabelle zeigt.

Das Diagramm (Abbildung 81) wird mit einer festen Größe von 20x12 erstellt, um eine klare Darstellung zu gewährleisten. Die Temperaturwerte werden in Rot geplottet, und die Linie wird mit einem Label versehen, um sie zu identifizieren. Weitere visuelle Verbesserungen wie Gitterlinien, Achsenbeschriftungen und ein Titel erhöhen die Lesbarkeit des Diagramms. Abschließend wird das Diagramm angezeigt, sodass der Nutzer den Temperaturverlauf analysieren kann. Sollte die Spalte nicht in der Datentabelle vorhanden sein, wird eine Fehlermeldung ausgegeben, die den Nutzer darauf hinweist.

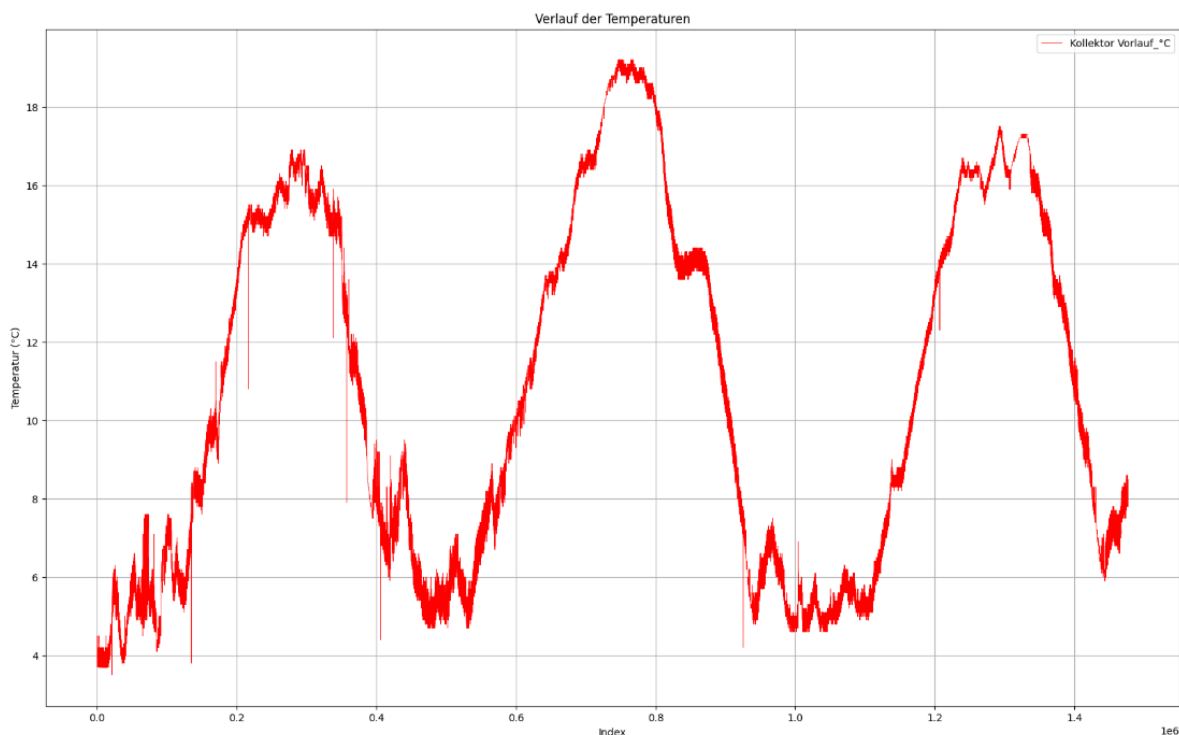


Abbildung 81 Visualisierung der Messtechnischen Basis der Grundwassertemperaturen

Der gezeigte Plot visualisiert den zeitlichen Verlauf der gemessenen Temperaturen aus der Spalte „Kollektor Vorlauf\_°C“ und bietet einen Überblick über deren Schwankungen und Muster. Auf der X-Achse wird der Index der Daten dargestellt, der die zeitliche Reihenfolge der

Messungen repräsentiert. Da die Zeitstempel nicht direkt auf der X-Achse abgebildet sind, erfolgt die Visualisierung auf Basis einer kontinuierlichen Nummerierung. Die Y-Achse zeigt die Temperaturwerte in Grad Celsius, die als Messgrößen der Kollektortemperatur dienen. Der Verlauf der Temperaturkurve zeigt klare periodische Schwankungen, die höchstwahrscheinlich durch tägliche oder wetterbedingte Einflüsse bedingt sind. Es lassen sich mehrere Hoch- und Tiefpunkte erkennen, die auf unterschiedliche Wärmeeinträge oder Kühlphasen hindeuten.

Auffällig ist, dass keine signifikanten Ausreißer in den Daten vorhanden sind, was auf eine erfolgreiche Bereinigung mittels der Interquartilsabstandsmethode (IQR-Methode) hinweist. Der Temperaturverlauf bewegt sich in einem Bereich von etwa 4 °C als Minimum bis zu etwa 18 °C als Maximum. Die Kurve zeigt einen regelmäßigen Anstieg und Abfall der Temperaturen, was auf systematische Schwankungen hindeutet, die möglicherweise durch die Sonneneinstrahlung, Außentemperaturen oder Heizungszyklen beeinflusst werden. Zudem sind die Daten durchgehend und ohne sichtbare Lücken.

Nachdem die Messdaten des Erdkollektors durch die Datenauswertung sowie die Visualisierung auf Verwertbarkeit für die Simulation validiert wurden, war der nächste Schritt die Daten so aufzubereiten, dass sie in die Simulationssoftware IDA ICE integriert werden konnten.

### **Erläuterung der Modellvarianten**

Für die Simulationsstudie wurde die Simulationssoftware IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) verwendet. Es basiert auf der IDA-Simulationsumgebung, mit der dynamische Simulationen mit Mehrzonenmodellen durchgeführt werden können. Wie der Name der Software impliziert, kann das Innenraumklima sowie die Energieflüsse eines Gebäudes untersucht werden. Speziell die Untersuchung der thermischen Behaglichkeit und des Energiebedarfs sind wichtige Punkte im Umgang mit IDA ICE. Die einzelnen Teilmodelle, wie Speichermodelle, Wärmepumpenmodelle etc. die sich in IDA ICE befinden, basieren dabei auf den Simulations und Modellierungssprachen Neutral Model Format (NMF) und Modelica.

Des Weiteren, zeichnet sich IDA ICE dadurch aus, dass die Modellierung, je nach Komplexität der Aufgabe und Kenntnissen des Nutzers über verschiedene Assistenten stattfindet. Demnach untergliedert sich die Software, in das sogenannte „Wizard Interface“, das „Standard Interface“, das „Advanced Level Interface“ sowie den sogenannten „Expert Mode“. Die beiden ersten Nutzerschnittstellen, sind für Simulationsstudien gedacht, die nicht besonders komplex sind und eine kurze Bearbeitungszeit benötigen. Hier kann über die Verwendung von vorgegebenen Bauteilen, sowie Anlagenteilen und grundlegenden Informationen, wie beispielsweise die Orientierung und dem Standort des Gebäudes in relativ kurzer Zeit eine qualitativ hochwertige Simulation erzeugt werden. Vor allem für Untersuchungen in frühen Planungsphasen von Gebäuden, sind diese Modi von Relevanz, da durch die Variierung von einzelnen Bauteilen oder Komponenten Vergleiche zwischen beispielsweise verschiedenen Wärmeerzeugern getroffen werden können. Auf dem „Advanced Level“ können die mathematischen Modelle, in ihren Bestandteilen verändert werden. Über eine graphische Benutzeroberfläche, die sich aus den Eingaben des Wizard und Standard Interface erzeugen lässt, können weitere Komponenten hinzugefügt, gelöscht und untereinander verbunden werden. Damit ist es möglich sehr komplexe Gebäude je nach Aufgabenstellung mit den technischen Anlagen von der

Wärmeerzeugung über die Kälteerzeugung und der Stromerzeugung abzubilden. Das im folgenden beschriebene Anlagenmodell basiert auf dem „Advanced Level“ von IDA ICE.

Der Hauptgrund, warum für diese Simulationsstudie IDA-ICE verwendet wurde, liegt darin begründet, dass im Zuge des Forschungsprojekts „+EQ-Net“ ein Gebäudemodell in IDA-ICE erzeugt wurde, in dem die Bauteile wie bspw. Außenwände, sowie die Orientierung und die Zonierung des Gebäudes auf Basis der Planungen und Ausführung des Gebäudes erzeugt wurde. Um dieses Gebäudemodell fortzuschreiben war die Aufgabe einerseits die technischen Gebäudeausrüstung und deren Regelung zu ergänzen und detailliert abzubilden.

Nachdem durch die Veröffentlichung der Version 5.0.0 bzw. Version 5.0.0.1 im Laufe der Bearbeitungszeit neben verbesserten Zonenmodellen, auch einige Verbesserungen bezüglich der Modellierung der Gebäudetechnik und deren Regelung sowie die Möglichkeit zur Modellierung des elektrischen Systems des Gebäudes implementiert wurden, fiel die Entscheidung des Simulationstools auf IDA ICE.

### 1.2.3.2 Beschreibung des Gebäudemodells in IDA ICE



Abbildung 82 Darstellung des Gebäudemodells in der 3D-Ansicht in IDA ICE

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass das Gebäudemodell in IDA ICE am 08.11.2022 erstellt wurde. Zu diesem Zeitpunkt war die Version 4.802 die aktuelle Version von IDA ICE, in der das Modell auch zuletzt abgespeichert wurde. Daraus kann man schließen, dass mehrere zum heutigen Zeitpunkt verfügbare Komponenten und Modellierungsmöglichkeiten zum damaligen Zeitpunkt in der Software nicht zur Auswahl standen.

## Allgemeine Daten

Abbildung 83 Screenshot des „Allgemein“ – Tabs in IDA ICE

Als Gebäudestandort wurde in IDA ICE München (Riem) (Breitengrad: 48.35, Längengrad: 11.79) ausgewählt. Es handelt sich offensichtlich um einen Wetterdatensatz aus einer Wetterstation am Münchner Flughafen, der aus den ASHRAE Fundamentals 2013 in IDA ICE ausgewählt werden kann. Dieser Standort weicht deutlich vom wirklichen Gebäudestandort ab, da die Luftlinie zwischen beiden Standorten ungefähr 60 Kilometer beträgt. Bei näherer Betrachtung der in IDA ICE verfügbaren Standortdaten wird klar, dass in unmittelbarer Nähe vom wirklichen Gebäudestandort in Geretsried keine Datensätze vorhanden sind. Die Ungenauigkeit im Gebäudestandort kann aufgrund der durch die unterschiedlichen Standorte variierenden Wetterdaten geringfügigen Einfluss auf die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den vor Ort gemessenen Daten haben, jedoch ist die Wahl eines am nächsten zum Gebäudestandort liegenden Klimadatensatzes durchaus gängige Praxis in Gebäudesimulationen. Als Windprofil wurden analog zum Wetterdatensatz auch von ASHRAE in IDA ICE eingebundene Daten für einen Stadtkern verwendet.

## Bauteilaufbauten

Die Aufbauten der architektonischen Bauteile mit den daraus resultierenden U-Werten, für Außenwände, erdberührende Bauteile oder auch Verglasungen sind im Bereich der Vorgabewerte in IDA ICE definiert. Die im übergebenen Gebäudemodell befindlichen Bauteile werden dabei in die Fortschreibung des Modells übernommen.

In Tabelle 6 sind die im Gebäudemodell angesetzten U-Werte für die Bauteilaufbauten abgebildet.

Tabelle 6 Übersicht über die im Gebäudemodell verwendeten Bauteilaufbauten und deren U-Werte

| Bauteil                           | Bezeichnung                        | Dicke [m] | U-Wert [W/m²K] |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----------|----------------|
| <b>Außenwände</b>                 | Rendered l/w concrete wall 250     | 0,27      | 0,5372         |
| <b>Innenwände</b>                 | Interior wall with insulation      | 0,146     | 0,6187         |
| <b>Zwischendecken</b>             | Concrete floor 150mm               | 0,175     | 2,385          |
| <b>Dach</b>                       | ASS_Dach                           | 0,5       | 0,3142         |
| <b>Boden gegen Außen</b>          | Concrete floor 250mm               | 0,255     | 2,9            |
| <b>Kellerwand gegen Erdreich</b>  | Rendered concrete wall 200         | 0,21      | 3,332          |
| <b>Bodenplatte gegen Erdreich</b> | Concrete floor 250mm               | 0,255     | 2,9            |
| <b>Verglasung</b>                 | 3 pane glazing, clear, 4-12-4-12-4 | -         | 1,9            |

### Zonen

Die im Gebäudemodell eingefügten Zonen, stellen die Nutzungseinheiten des Gebäudes pulsG dar. Da es sich wie bereits angesprochen um ein Multifunktionsgebäude handelt, gibt es Zonen mit unterschiedlicher Nutzung, die sich genauer in Wohneinheiten, Büroflächen, Supermarkt und zwei Untergeschosse untergliedern.

Der Geometrie der Zonen sowie der Bauteilzuordnung und der Fensterplatzierung nach zu urteilen, wurden Pläne für die Modellierung der Zonen verwendet. Damit wird die Zonenmodellierung sowie die daraus resultierenden Flächen des Gebäudes in die Fortschreibung des Modells übernommen und als korrekt angesehen.

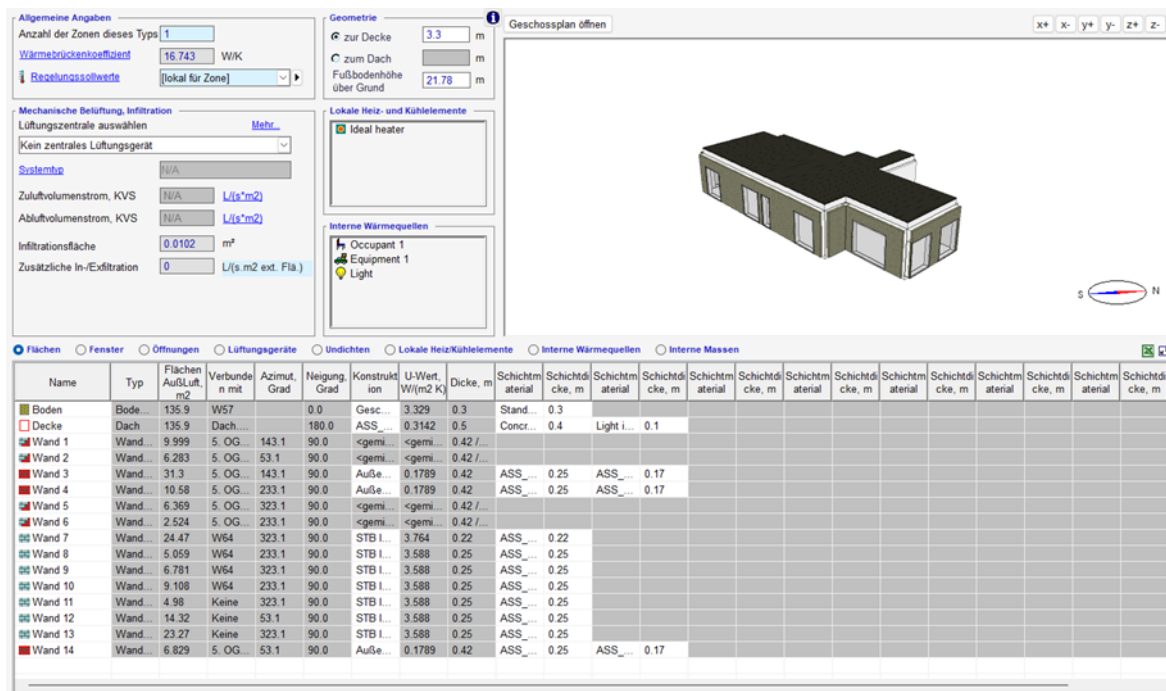


Abbildung 84 Zonendialog in IDA ICE am Beispiel der Zone W63

### Zonengruppierung

In IDA ICE gibt es zur Steigerung der Übersichtlichkeit der in einem Modell vorhandenen Zonen die Möglichkeit, Zonen in Gruppen einzuordnen. Im vorliegenden Modell wurde die Gruppierung der Zonen nach der Nutzung durchgeführt. Für jeden Nutzungstyp der Zonen wurde demnach eine Gruppe angelegt. Eine Ausnahme bilden die Wohneinheiten, die über den Nutzungstyp hinaus nach der Grundfläche gruppiert wurden, da sich die Wohneinheiten in ihren separaten Grundrissen ähnlich sind.

Aus Tabelle 7 gehen die Zonengruppen mit den jeweiligen Zonen hervor.

Tabelle 7 Gruppierung der Zonen des Gebäudemodells

| Gruppe            | Zonen                                         | Grundfläche [m²] |
|-------------------|-----------------------------------------------|------------------|
| <b>Büro</b>       | Büro 1, Büro 2, Büro 3                        | -                |
| <b>Supermarkt</b> | Supermarkt, Aufenthalt 1, Aufenthalt 2, Lager | -                |
| <b>Tiefgarage</b> | 1.UG, 2.UG                                    | -                |
| <b>Wohnung 1</b>  | W3-4, W7-8, W21-22, W25-26, W39-40, W43-44    | 33               |
| <b>Wohnung 2</b>  | W13, W31, W49                                 | 41               |
| <b>Wohnung 3</b>  | W6, W24, W48                                  | 48               |
| <b>Wohnung 4</b>  | W10, W28, W46, W56, W62                       | 54               |

|                   |                                                                     |     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Wohnung 5</b>  | W11, W14, W15, W17, W29, W32-33, W35-37, W47, W50-51, W53, W59, W65 | 62  |
| <b>Wohnung 6</b>  | W6, W24, W42                                                        | 68  |
| <b>Wohnung 7</b>  | W55, W61                                                            | 77  |
| <b>Wohnung 8</b>  | W12, W23, W27, W37, W38, W41, W45, W52                              | 84  |
| <b>Wohnung 9</b>  | W9, W19, W30, W34, W58, W64                                         | 92  |
| <b>Wohnung 10</b> | W18, W36, W54, W60, W66                                             | 107 |
| <b>Wohnung 11</b> | W57, W63                                                            | 135 |

### Regelungssollwerte

Pro Zone müssen in IDA ICE Regelungssollwerte bezüglich der Lufttemperatur, den Zu- und Abluftvolumenströmen, der Luftfeuchte, dem Kohlendioxidgehalt und der Beleuchtungsstärke definiert werden. Dies ist für die Regelung der relevanten Variablen in den Zonen durch die lokalen Heiz- und Kühlelemente von großer Bedeutung.

Diese Regelungssollwerte, sind für das gesamte Gebäudemodell für die jeweilige Zone einheitlich implementiert worden, wie aus Tabelle 8 ersichtlich wird.

Tabelle 8 Regelungssollwerte der Zonen des übergebenen Gebäudemodells

| Parameter                 | Einheit  | Minimalwert | Maximalwert |
|---------------------------|----------|-------------|-------------|
| <b>Temperatur</b>         | [°C]     | 21          | 25          |
| <b>Zuluftvolumenstrom</b> | [L/s·m²] | -           | -           |
| <b>Abluftvolumenstrom</b> | [L/s·m²] | 0.3         | 7           |
| <b>Luftfeuchtigkeit</b>   | [%]      | 20          | 80          |
| <b>Kohlendioxidgehalt</b> | [ppm]    | 700         | 1100        |
| <b>Beleuchtungsstärke</b> | [lux]    | 100         | 10000       |

### *Lokale Heiz- und Kühlelemente*

Für jede Zone müssen im Gebäudemodell in IDA ICE Lokale Heiz- und Kühlelemente definiert werden, die dafür sorgen sollen, dass das Innenraumklima, das durch die Regelungssollwerte in den gerade dargestellten Bereichen für jede Zone definiert wurde, eingehalten wird. In IDA ICE existiert dafür eine Palette, über die die gewünschten Heiz- und Kühlelemente in das Zonenformular eingefügt werden können.

Voreingestellt bei der Erstellung einer neuen Zone, sind immer die sogenannten „Idealen“ Heiz- und Kühlelemente, die in ihrer maximalen Leistung, die sie liefern können, frei einstellbar sind. Würden diese idealen Heiz- und Kühlelemente in den Zonen fehlen, kann keine Heiz- bzw. Kühlenergie in die Energiebilanz der Zone eingebracht werden und die Regelungssollwerte, für beispielsweise die Raumtemperatur, könnten nicht eingehalten werden. Durch die Idealen Heiz- und Kühlelemente kann auf Basis des Gebäudemodells eine erste Grobdimensionierung für Wärme und Kälteerzeuger und Übergabesysteme in den Zonen stattfinden. Anzumerken ist hierbei aber auch, dass es sich bei den idealen Heiz- und Kühlelementen um keine wasserführenden Systeme handelt, die mit der zentralen Anlagentechnik des Modells verbunden sind. Das bedeutet, dass ein funktionierendes Gebäudemodell auch ohne zentrale Anlagentechnik auskommen und nur durch dezentrale, ideale Heiz- und Kühlelemente simuliert werden kann.

Im übergebenen IDA ICE Gebäudemodell von pulsG sind in den jeweiligen Zonen je nach in Wirklichkeit vorhandenem Wärmeübergabesystem, ideale Heiz- und Kühlelemente in den Zonen vorhanden. Demnach sind in den Wohneinheiten, die in Wirklichkeit durch Fußbodenheizung beheizt werden, nur ideale Heizelemente vorhanden. In den Bürozone, die in der Realität mit Fußbodenheizung und Kühldecken temperiert werden, sind ideale Heiz- und Kühlelemente vorhanden. Analog dazu gestaltet sich die Zone des Supermarkts. Lagerflächen sowie die beiden Untergeschosse haben keine idealen Heizelemente im Zonenformular hinterlegt und zählen somit nicht zum beheizten Gebäudevolumen.

Bezüglich der maximalen Leistung ist festzuhalten, dass ein Wert von 100 W/m<sup>2</sup> für das ideale Heizelement und ein Wert von 200 W/m<sup>2</sup> für das ideale Kühlelement über das gesamte Gebäudemodell eingestellt wurde. Diese Werte sind relativ hoch, wichtig ist aber auch anzumerken, dass es sich um Maximalwerte handelt, die im Zuge der Simulation zur Einhaltung der Temperatur-Regelungssollwerte in den Zonen abgerufen können, aber nicht abgerufen werden müssen. So kann sichergestellt werden, dass die Differenz der Energie, die im Zuge der Simulation aus der Energiebilanz durch Transmissionswärmeverluste etc. entsteht, ausgeglichen wird. Daraus lässt sich schließen, dass vermutlich in der Gebäudemodellierung ein Leistungswert für die lokalen Heiz- und Kühlelemente angenommen wurde, der mit Sicherheit die angegebenen thermischen Behaglichkeitskriterien erfüllen kann.

Insgesamt ist somit mit Hinblick auf die lokalen Heiz- und Kühlelemente zu sagen, dass über die Voreinstellungen der Zonen hinaus lediglich die Maximalleistung der idealen Heiz- und Kühlelemente angepasst wurde. Es ergibt sich durch den Verzicht auf wassergeführte Systeme in den Zonen mit Hinblick auf die gebäudetechnischen Anlagen keine Verbindung zwischen Zonen und zentraler Gebäudetechnik.

### *Interne Wärmequellen*

Ein Weiterer wichtiger Aspekt in den Zonen des Gebäudemodells stellen die internen Wärmequellen dar. Wie bereits angesprochen wurden die Zonen der Nutzungsart entsprechend gruppiert. Aus den Gruppen ergeben sich kleinere Unterschiede für die internen Wärmequellen, die durch die verschiedenen Nutzungsformen begründet sind.

In IDA ICE sind zur Modellierung von internen Wärmequellen Personen, Geräte und Kunstlicht vorgesehen. Allgemein ist zu erkennen, dass im Gebäudemodell von pulsG die internen Wärmequellen mit der Größe der Zonen ansteigen, was damit begründet werden kann, dass sich in größeren Zonen mehr Personen aufhalten und damit auch mehr Geräte sowie Kunstlichtquellen vorhanden sein müssen.

Die Personen als interne Last können in IDA ICE über die Anzahl der Personen in der Zone und durch den Aktivitätsgrad nach [4] modelliert. Dabei wird der Aktivitätsgrad nach der metabolischen Einheit „MET“ angegeben. Über einen Zeitplan kann dann geregelt werden, wie viele Personen sich zu welcher Zeit in einer Zone aufhalten.

Die Geräte werden in Bezug zur Anzahl und dem Zeitplan analog zu der Vorgehensweise der Personen modelliert. Es wird lediglich ein Parameter in Watt definiert, der die abgegebene Wärme pro Gerät darstellt. Über den angegebenen Zeitplan wird dann angegeben wann wie viele Geräte gleichzeitig in der Zone in Betrieb sind.

Die interne Last durch das Licht wird gleich wie die Geräte modelliert, bloß, dass weitere Parameter für die Lichtausbeute definiert werden müssen. Ansonsten ergibt sich die gleiche Funktionalität bezüglich der Regelung für das Kunstlicht wie für die anderen internen Wärmequellen.

Es soll kurz veranschaulicht werden, welche internen Wärmequellen für welche Zonengruppe definiert wurden

### *Büros*

In den Büros wurde für die Personen eine entspannte sitzende Tätigkeit mit einem MET-Wert von 1,0 angenommen. Für die Geräte wurde 60 Watt Wärmeabgabe pro Gerät definiert und das Kunstlicht wurde mit einer Wärmeabgabe von 10 Watt pro Einheit angegeben.

Aus Tabelle 9 geht die Anzahl der jeweiligen internen Wärmequellen hervor.

Tabelle 9 Anzahl interne Wärmequellen Büros

| <b>Büro</b>   | <b>Personen</b> | <b>Geräte</b> | <b>Kunstlicht</b> |
|---------------|-----------------|---------------|-------------------|
| <b>Büro 1</b> | 25              | 25            | 15                |
| <b>Büro 2</b> | 85              | 85            | 40                |
| <b>Büro 3</b> | 30              | 30            | 15                |

Für die Büros wurden zur Regelung der internen Wärmequellen ein Zeitplan für die Anwesenheit der Personen und ein Zeitplan für die Geräte und das Kunstlicht erstellt. Diese Zeitpläne, sind in Abbildung 85 ersichtlich.

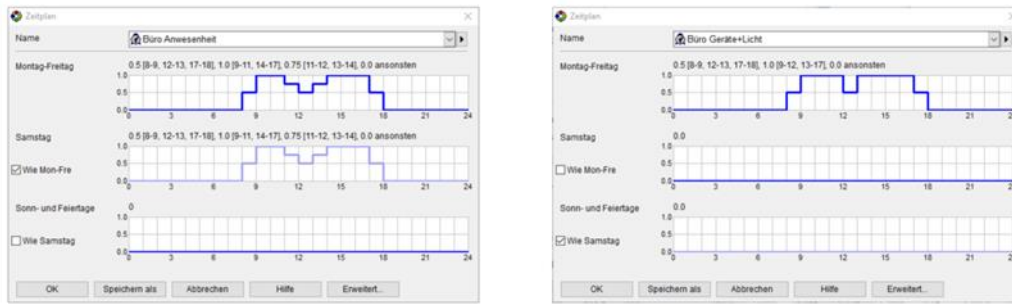


Abbildung 85 Zeitplan Anwesenheit der Personen (links) und Zeitplan Geräte und Licht der Büros (rechts)

### Supermarkt

In der Zonengruppe des Supermarkts befinden sich wie bereits angesprochen und in Tabelle 2 ersichtlich, nicht nur der Supermarkt an sich, sondern auch Zonen, die mit der Nutzungsart eines Supermarkts wenig zu tun haben. Für die Aufenthaltsräume ist deswegen eine Büronutzung mit den Werten für die Zonengruppe des Büros angenommen worden. In der Zone des Lagers sind keine internen Wärmequellen modelliert worden, deswegen ergeben sich für diese Zone keine anwesenden Personen oder Geräte. Für den Supermarkt an sich wurde eine stehende, mittelschwere Tätigkeit nach DIN EN ISO 7730 angenommen. Die Wärmeabgabe der Geräte und des Kunstlichts haben die gleichen Werte wie für die Büroflächen. Aus Tabelle 10 ist die Anzahl der jeweiligen internen Wärmequelle für die Zonen des Supermarkts ersichtlich.

Tabelle 10 Anzahl interne Wärmequellen Supermarkt

| Bereich             | Personen | Geräte | Kunstlicht |
|---------------------|----------|--------|------------|
| <b>Supermarkt</b>   | 60       | 200    | 100        |
| <b>Aufenthalt 1</b> | 85       | 85     | 40         |
| <b>Aufenthalt 2</b> | 30       | 30     | 15         |
| <b>Lager</b>        | 0        | 0      | 0          |

Die Zeitpläne zur Regelung der internen Wärmequellen für die Aufenthaltsräume sind die gleichen Zeitpläne, wie für die Zonen der Büros, deswegen werden diese Zeitpläne hier nicht mehr extra dargestellt. Für die Regelung der internen Lasten des Supermarktes wurden für Personen ein Zeitplan sowie für Geräte und Kunstlicht ein Zeitplan in das Modell integriert. Aus Abbildung 86 sind diese Zeitpläne ersichtlich.

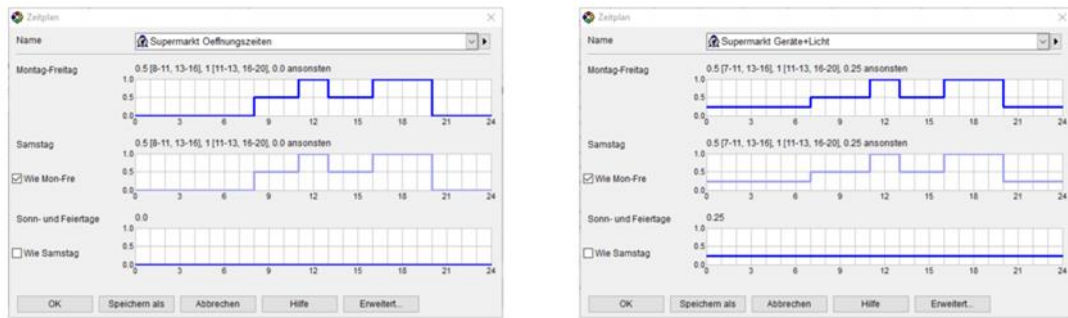


Abbildung 86 Zeitplan Anwesenheit Personen (links) und Geräte und Licht des Supermarkts (rechts)

## Wohnungen

Die Wohnungen, die wie bereits angesprochen nicht nur nach der Nutzung einer Zonengruppe zugeordnet sind, sondern auch nach der Grundfläche sortiert wurden, haben je nach Größe unterschiedliche Anzahlen an internen Wärmequellen. Für Personen wurde wie bei den Büros eine nach DIN EN ISO 7730 sitzend, entspannte Aktivität mit einem Wert von 1 MET. Die Geräte sind ebenfalls mit dem in den Büros angesprochenen Wert von 60 Watt pro Gerät veranschlagt. Das Kunstlicht wird mit 1,5 Watt pro Körper berechnet.

Aus Tabelle 11 werden die Anzahlen der internen Wärmequellen nach den unterschiedlichen Wohnungsgruppierungen ersichtlich.

Tabelle 11 Anzahl interne Wärmequellen Wohnungen nach Zonengruppen sortiert

| Wohnung    | Personen | Geräte | Kunstlicht |
|------------|----------|--------|------------|
| Wohnung 1  | 1        | 10     | 3          |
| Wohnung 2  | 1        | 10     | 3          |
| Wohnung 3  | 1,5      | 10     | 5          |
| Wohnung 4  | 1,5      | 10     | 5          |
| Wohnung 5  | 1,5      | 10     | 5          |
| Wohnung 6  | 3        | 20     | 15         |
| Wohnung 7  | 4        | 20     | 20         |
| Wohnung 8  | 4        | 20     | 20         |
| Wohnung 9  | 4        | 20     | 20         |
| Wohnung 10 | 4,5      | 20     | 30         |
| Wohnung 11 | 5        | 20     | 30         |

Bezüglich der Zeitpläne, die die internen Wärmequellen in den Wohnungen regeln, ist anzumerken, dass in diesem Fall für jede Wärmequelle ein Zeitplan erstellt wurde. Diese Zeitpläne sind in Abbildung 87 ersichtlich.

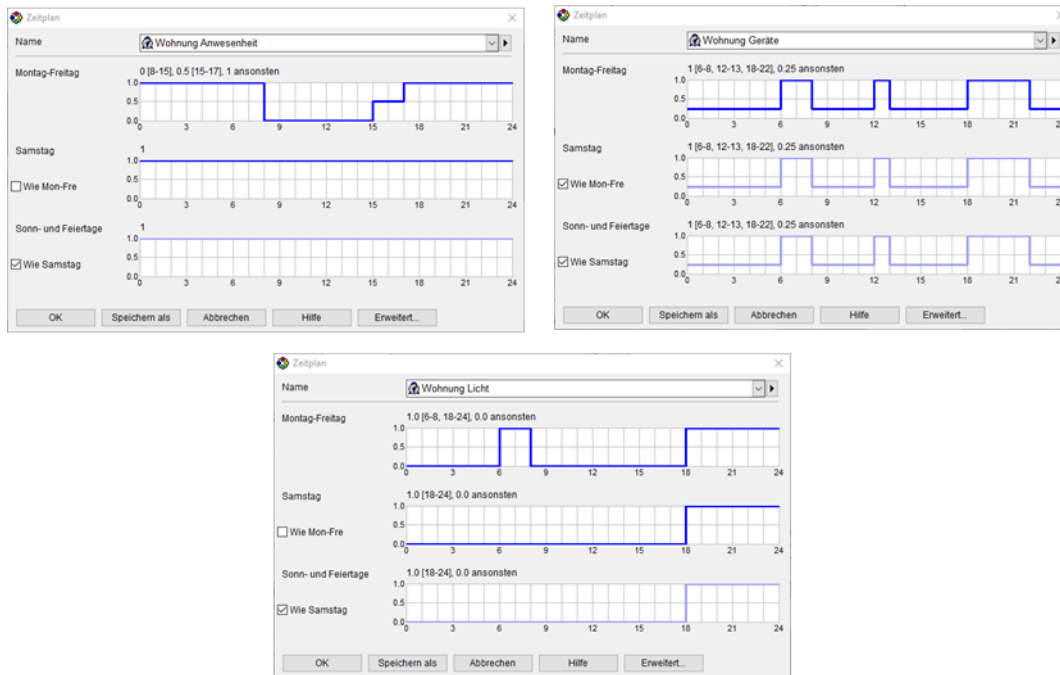


Abbildung 87 Zeitplan Anwesenheit (links oben), Geräte (rechts oben), Kunstlicht (unten) der Wohnungen

### Tiefgaragen

In der Zonengruppe der Tiefgaragen sind für die internen Wärmequellen aufgrund der Nutzung der Zone differenziertere Annahmen getroffen worden. Die Darstellung der Personen und Geräte ist an dieser Stelle hinfällig, da in der Zonengruppe weder das eine noch das andere modelliert wurde. Lediglich das Kunstlicht wurde bei den internen Wärmequellen mit 10 Watt pro Leuchtkörper berücksichtigt. Darüber hinaus wurden für die Tiefgaragen im ersten und im zweiten Untergeschoss jeweils 100 Leuchtkörper vorgesehen. Aufgrund der starken Unterschiede in den Grundflächen der beiden Zonen, ist diese Parametrierung des Kunstlichts fragwürdig, da das erste Untergeschoss deutlich größer ist als das zweite Untergeschoss, aber mit der Parametrierung des Kunstlichts die gleiche Anzahl an Leuchtkörpern hätte.

Diese Einstellung muss mithilfe der Simulationsergebnisse des Gebäudemodells auf Richtigkeit überprüft werden. Bezüglich der Regelung der Leuchtkörper ist festzuhalten, dass diese in beiden Zonen im Dauerbetrieb („Immer Ein“) betrieben werden.

### Warmwasserbereitung

Die Warmwasserbereitung kann in IDA ICE entweder zentral über die Globaldaten übergreifend für das gesamte Modell modelliert werden, oder dezentral direkt in den einzelnen Zonen. An dieser Stelle soll nur auf die Möglichkeit eingegangen werden, die Warmwasserbereitung in den Zonen zu parametrieren. In diesem Fall kann über die erweiterten Zoneneinstellungen ein durchschnittlicher Verbrauch nach unterschiedlichen Einheiten eingegeben werden.

Im übergebenen Gebäudemodell wurde in den erweiterten Einstellungen des Zonendialogs in keiner der modellierten Zonen ein Warmwasserbedarf vorgesehen.

## *Lüftung*

In IDA ICE ist es nötig im Zonendialog für jede Zone die mechanische Lüftung sowie die Infiltration zu parametrieren. Ohne Angabe eines Lüftungsgeräts, können keine Zuluft- und Abluftvolumenströme definiert werden. Dies würde zu einem Fehler des Solvers der IDA Simulationsumgebung führen. Des Weiteren muss für jede Zone im Falle einer mechanischen Belüftung ein Systemtyp definiert werden. Dabei kann entweder ein System mit konstantem Volumenstrom (KVS) oder ein System mit variablem Volumenstrom (VVS) in das Zonenmodell eingebaut werden. Im Falle des VVS-Systems werden die Zu- und Abluftvolumenströme der Zone dann nach einer Regelungseinstellung die sich nach den Eingaben der Regelungssollwerte moduliert. Die Regelungssollwerte wurden bereits angesprochen und tabellarisch veranschaulicht.

Für die Infiltrationsfläche ist wichtig anzumerken, dass diese nicht auf null gesetzt werden kann. Demnach existiert in IDA ICE, auch wie in der Realität keine komplett luftdichte Zone, da immer eine gewisse Undichtigkeit in der Gebäudehülle gegeben ist. Das Nullsetzen der Infiltrationsfläche würde zu einem numerischen Fehler im Zuge der Simulation führen.

Im übergebenen Gebäudemodell wurden für die unterschiedlichen Zonengruppen unterschiedliche Einstellungen für die mechanische Belüftung getroffen.

In der Zonengruppe der Büros wurde als Systemtyp ein variables Volumenstromsystem mit der Regelung nach einem Zeitplan eingestellt. Der Zeitplan, der dieser Regelung zu Grunde liegt, ist der Anwesenheitszeitplan der bereits in Abbildung 4.3 abgebildet wurde. Daraus resultiert, dass eine Regelung des Abluftvolumenstroms nach Anwesenheit der Personen im Büro modelliert ist. Die Infiltrationsflächen der Bürozonen wurden auf den Standardeinstellungen belassen, die durch IDA ICE implementiert werden.

Die Zonengruppen Supermarkt und Tiefgarage, wurden mit den gleichen Parametrierungen bezüglich der mechanischen Lüftung und Infiltration versehen. Hier wurde für alle Zonen der Systemtyp mit konstantem Volumenstrom ausgewählt. Die Zu- und Abluftvolumenströme sind dabei jeweils auf 2 ( $\text{L}/(\text{s m}^2)$ ) parametriert. Die Infiltrationsflächen basieren analog zu den Büroflächen auf den Standardwerten.

Die Wohnungen haben kein hinterlegtes Lüftungsgerät und dadurch keine definierten Zu- und Abluftvolumenströme. Dies bedeutet, dass die Wohnungszonen im übergebenen Gebäudemodell nicht mechanisch belüftet werden. Die Infiltrationsflächen sind analog wie zu den anderen Zonengruppen zu betrachten.

### 1.2.3.3 Zentrale Gebäudetechnik

In der zentralen Gebäudetechnik des übergebenen Gebäudemodells ist eine Lüftungsanlage und eine Anlage mit Wärme- und Kälteerzeuger vorhanden.

#### Lüftungsgerät

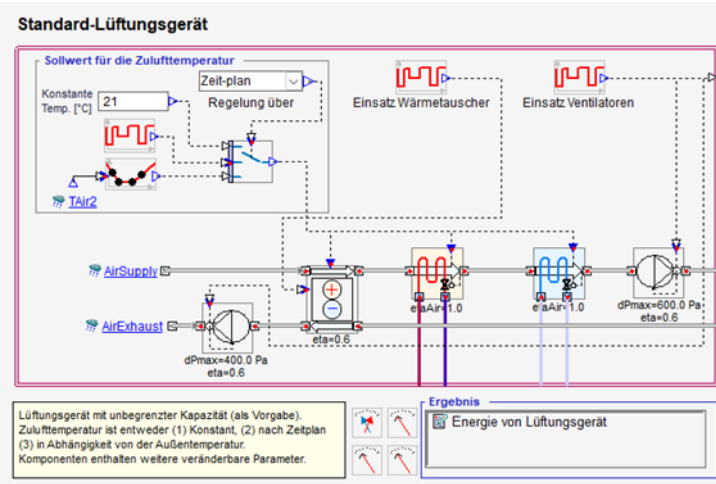


Abbildung 88 Schematische Darstellung der im Gebäudemodell vorhandenen Lüftungsanlage

Bei der Lüftungsanlage, die im Gebäudemodell vorhanden ist, handelt es sich um die Standard-Lüftungsanlage, die bei jedem neuen Projekt, das in IDA ICE erstellt wird voreingestellt ist. Dabei handelt es sich um eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, einem Heiz- und einem Kühlregister sowie 2 Ventilatoren.

Die Heiz- und Kühlregister sind mit dem im Modell definierten Wärme- und Kälteerzeuger zur Bereitstellung von Wärme und Kälte verbunden. Wäre an dieser Stelle keine Verbindung vorhanden, würde das Modell im Zuge der Simulation nicht funktionieren.

Geregelt werden die Ventilatoren dieses Lüftungsgeräts über einfache Zeitpläne, die im Fall des übergebenen Gebäudemodells auf der Standardeinstellung „Immer Ein“ gestellt sind. Analog dazu wird der Wärmetauscher geregelt. Der Sollwert für die Zulufttemperatur wird über das Heiz- beziehungsweise Kühlregister geregelt. Die Sollwertvorgabe für beide Anlagenbestandteile wird dabei auch über einen Zeitplan gesteuert, der einen Sollwert von 16°C für Heiz- und Kühlregister sowie Wärmetauscher vorgibt. Wie aus vorherigem Abschnitt klar wurde, ist die Zuordnung des Lüftungsgeräts in den Zonen selbst definiert. Demnach wird das Lüftungsgerät nur für die Zonen Büros, Supermarkt und Untergeschosse verwendet.

Aus der Betrachtung des Lüftungsgeräts wird klar, dass es sich um die Standardeinstellung von IDA ICE handelt, die, wie aus Kapitel 1.2.3.1 deutlich wird, nicht der Realität entspricht, da zwei Abluftgeräte im Gebäude pulsG verbaut sind, die lediglich aus den Nasszellen Abluft absaugen.

## Anlage

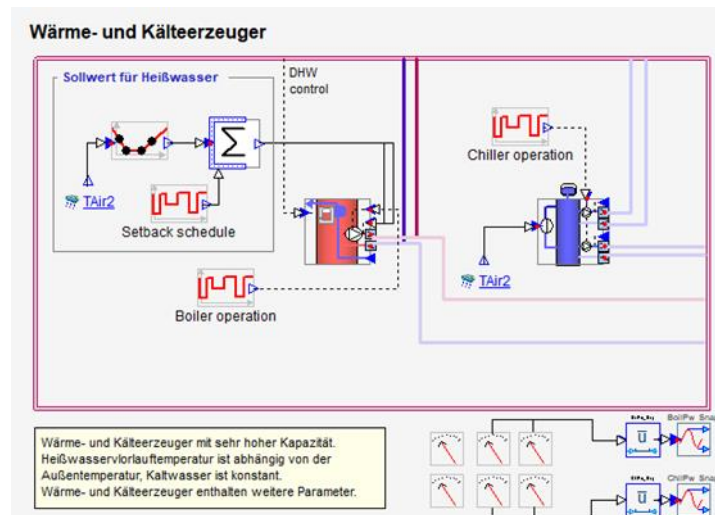


Abbildung 89 Schematische Darstellung der im Gebäudemodell vorhandenen Anlage zur Wärme- und Kälteerzeugung

In der Anlage des Gebäudemodells sind jeweils ein Wärme- und Kälteerzeuger vorhanden. Bei den Modellen dieser Erzeuger, handelt es sich um die in IDA ICE vorhandenen idealen Erzeuger für einen Heizkessel und eine Kältemaschine. Diese sind wie die idealen Heiz- und Kühlelemente in den Zonen zu betrachten. Sie sind standardmäßig mit sehr großen Leistungen (in der Regel mit 99999 kW) parametrisiert, können diese Leistung aber je nach Bedarf modulieren. Auf diese Erzeuger soll vorerst nicht näher eingegangen werden, da es sich um eine Standard-Anlagentechnik in IDA ICE handelt, die ähnlich wie die Heiz- und Kühlelemente in den Zonen zur generellen Funktion des Modells nötig sind und wie beim Lüftungsgerät augenscheinlich aus diesem Grund im Zuge der Modellierung des Gebäudemodells nicht weiter beachtet wurden.

Es ergibt sich durch diese Konfiguration, wie bereits in der Betrachtung der Zonen angesprochen, keine Verbindung zwischen Anlagentechnik und lokalen Heiz und Kühlelementen in den Zonen, da kein wasserführendes System in den Zonen definiert wurde. Lediglich zwischen dem Lüftungsgerät und der Anlagentechnik ist eine Verbindung zu den Registern vorhanden, da sonst ein Fehler in der Simulation auftreten würde. In diesem Fall würde der Solver der IDA-Simulationsumgebung einen Fehler ausgeben, da kein Volumenstrom und keine Verbindung zwischen Anlage und Lüftungsgerät definiert ist. Auch hier ist wie bei der Betrachtung des Lüftungsgeräts festzustellen, dass es sich bei der Anlage um eine Standard-Konfiguration von IDA ICE handelt. Auch hier entspricht die Anlagentechnik nicht dem in der Realität geplanten sowie gebautem Konzept.

### 1.2.3.4 Fortschreibung des Gebäudemodells

In diesem Abschnitt sollen die Änderungen, die im Gebäudemodell in den jeweiligen Zonen vorgenommen wurden, angesprochen und dokumentiert werden.

## Änderung der Lokalen Heiz- und Kühlelemente

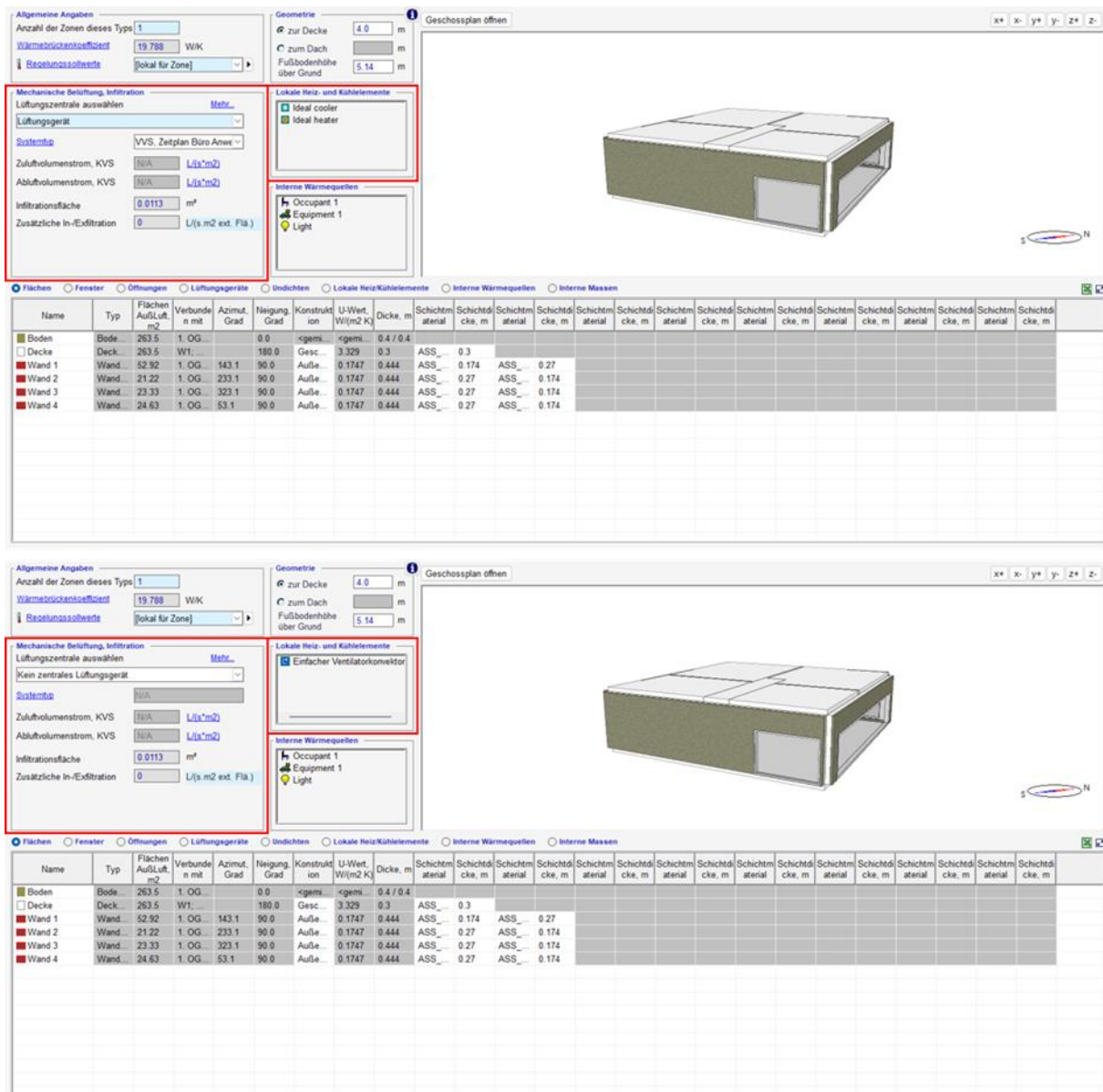


Abbildung 90 Änderung der lokalen Heiz- und Kühlelemente am Beispiel der Zone „Büro 1“. Obere Abbildung vor der Änderung; untere Abbildung nach der Änderung

Im Rahmen der Modellierung der in pulsG implementierten Gebäudetechnik war es erforderlich, eine Verknüpfung zwischen dem Gebäudemodell (Zonen) und dem Anlagenmodell herzustellen. Dies machte eine Anpassung der in den Zonen vorhandenen lokalen Heiz- und Kühlelemente notwendig. Wie bereits erläutert, enthielten die Zonen standardmäßig von IDA ICE eingefügte ideale Heiz- und Kühlelemente. Diese Komponenten bilden jedoch keine direkte Verbindung zwischen der jeweiligen Zone und dem Anlagenmodell.

Zur Realisierung dieser Verbindung wurde in sämtlichen beheizten und gekühlten Zonen ein sogenannter „Einfacher Ventilatorconvektor“ implementiert. Die vorgenommenen Änderungen sind in Abbildung 9 dargestellt. Der einfache Ventilatorconvektor ermöglicht eine direkte Kopplung zwischen der Anlagentechnik und den Zonen und kann über die Palettenfunktion in den Zonendialog integriert werden.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Parametrierung der Heiz- und Kühlleistung des Ventilatorkonvektors an die Werte der zuvor genutzten idealen Heiz- und Kühlelemente angepasst wurde. Diese Parameterwerte sind im Anhang dokumentiert. Durch diese Anpassungen konnte ein einheitliches System geschaffen werden, das das Anlagenmodell mit dem Zonen- und Gebäudemodell verbindet.

### **Einfügen von Undichten**

Im Rahmen der Umsetzung des Lüftungskonzepts von pulsG wurde eine weitere Anpassung vorgenommen, die die Integration sogenannter „Undichten“ in die Zonen der Wohnungen umfasste. Diese Maßnahme war erforderlich, um die Funktionsweise des Lüftungskonzepts im Gebäudemodell realistisch abzubilden.

Das Lüftungskonzept des Gebäudes basiert auf einer zentralen Abluftanlage mit integriertem Wärmerückgewinnungssystem, das speziell auf die Entlüftung der Bäder in den Wohnungen ausgelegt ist. In diesem Konzept wird der durch die Abluftanlage erzeugte Unterdruck in den Bädern durch den Einsatz von Außenluftdurchlässen in den Außenwänden ausgeglichen. Diese Durchlässe übernehmen die Funktion der kontrollierten Zuluftversorgung und gewährleisten eine kontinuierliche Frischluftzufuhr in die Wohnbereiche.

Die Wärmerückgewinnung erfolgt über ein integriertes Wärmetauschersystem, das Energie aus der abgeführten Abluft extrahiert. Die gewonnene Wärmeenergie wird in einem Register genutzt, um Wasser in einem Wärmespeicher aufzuwärmen. Dieses Verfahren trägt nicht nur zur effizienten Energienutzung bei, sondern bildet auch die Grundlage für die weitere thermische Nutzung der zurückgewonnenen Energie. Die daraus gespeicherte beziehungsweise zurückgewonnene Wärmeenergie dient anschließend als Wärmequelle für eine Wärmepumpe, die sie in nutzbare Heizenergie umwandelt.

Um die Funktionalität des Lüftungskonzepts innerhalb der Simulationsumgebung von IDA ICE umzusetzen, wurde im ersten Schritt eine sogenannte „Undichte“ in jeder Zone der Wohnbereiche eingefügt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Modellierung eines kontinuierlichen Luftaustauschs zwischen der Abluftanlage und den einzelnen Zonen, wodurch die spezifischen Lüftungsanforderungen realistisch abgebildet werden können.

Die Implementierung dieser Undichtheit stellt einen essenziellen Bestandteil der Simulation dar, da sie die Wechselwirkung zwischen den Volumenströmen und den zonenspezifischen Parametern berücksichtigt. Durch den Einsatz dieser Elemente können sowohl die Druckverhältnisse innerhalb des Gebäudes, die für eine stabile Simulation nötig sind, als auch die effektiven Luftwechselraten in den verschiedenen Zonen präzise und realitätsnah nachgebildet werden.

Die vorgenommenen Anpassungen und ihre Auswirkungen auf das Simulationsmodell sind in Abbildung 91 detailliert dargestellt, um die angewendete Methodik und die entsprechenden Ergebnisse nachvollziehbar zu machen.

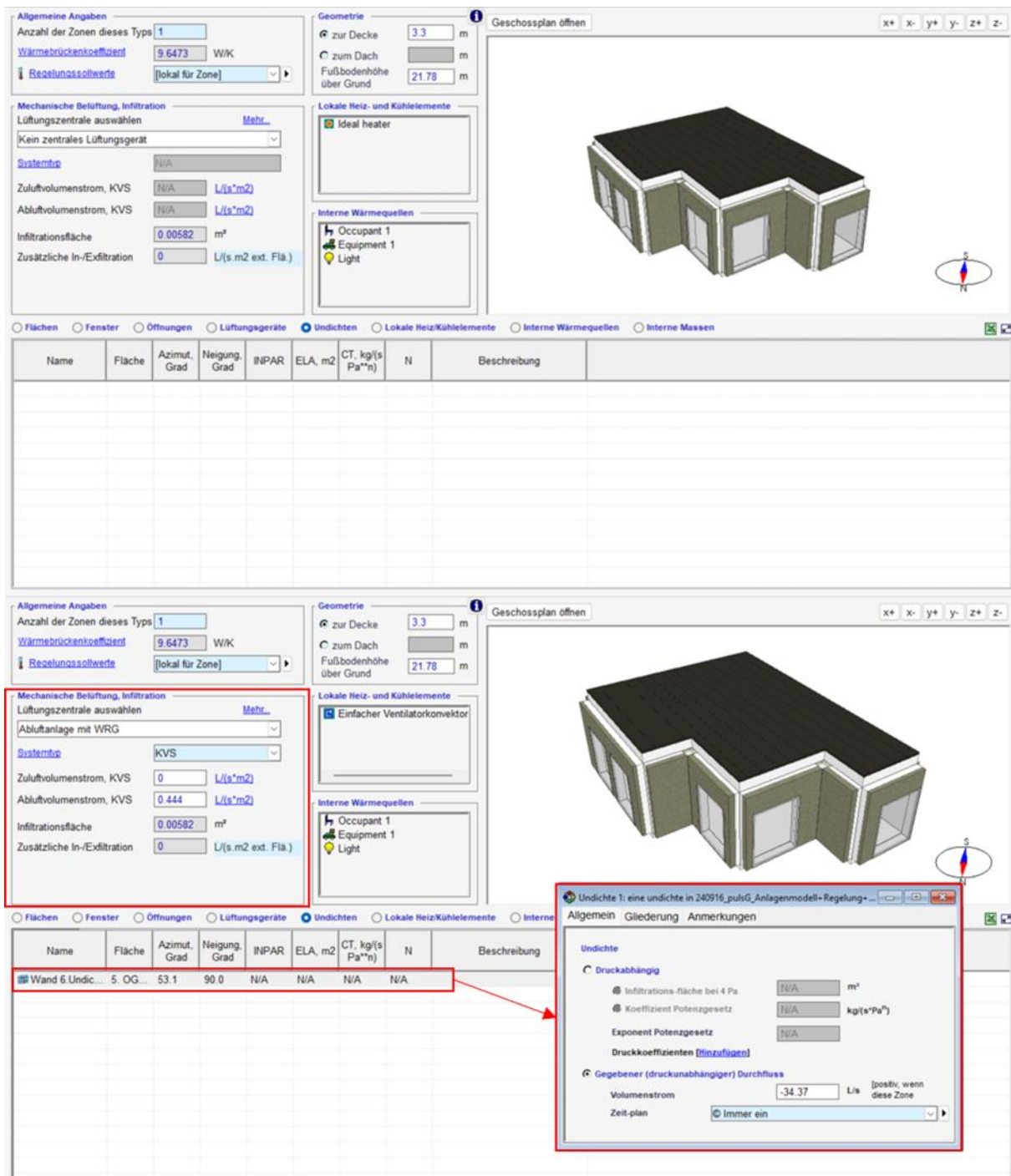


Abbildung 91 Darstellung der Änderungen bezüglich der Undichte im Gebäudemodell

Es ist von Bedeutung anzumerken, dass die Parametrierung der Undichtheit in der Simulation so vorgenommen wurde, dass bei Betrieb der Abluftanlage ein kontinuierlicher Volumenstrom in die jeweilige Zone einströmt. Dabei wurde der spezifische Volumenstrom, der für jede Zone definiert wurde, auf der Grundlage zweier wesentlicher Parameter berechnet: der Grundfläche der jeweiligen Zone und dem maximalen Abluftvolumenstrom der gesamten Abluftanlage.

Die Abluftanlage des Gebäudes ist auf einen maximalen Abluftvolumenstrom von etwa 1989 l/s (was einem Volumenstrom von 7000 m<sup>3</sup>/h entspricht) ausgelegt. Ausgehend von diesem

Wert ergibt sich ein spezifischer Abluftvolumenstrom von 0,44 l/s pro Quadratmeter Wohnfläche, der als Berechnungsgrundlage für die einzelnen Zonen dient. Mit diesem spezifischen Wert kann für jede Zonengruppe und deren Grundfläche ein entsprechender Wert für die Undichtheit ermittelt werden. Dieser Undichtheitswert ist entscheidend, da er in der Simulation so angepasst werden muss, dass sich der berechnete Gesamtvolumenstrom für das gesamte Gebäude einstellt.

Die zur Parametrierung herangezogenen Werte sind in Tabelle 12 dokumentiert, um die Berechnungsgrundlage und Ergebnisse übersichtlich darzustellen.

Tabelle 12 Parametrierungswerte (Volumenstrom) der Undichten sortiert nach Zonengruppen

| Zonengruppe | Zonenname                                                           | Grundfläche [m²] | Volumenstrom durch Undichte [l/s] |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Wohnung 1   | W3-4, W7-8, W21-22, W25-26, W39-40, W43-44                          | 33               | 15                                |
| Wohnung 2   | W13, W31, W49                                                       | 41               | 18                                |
| Wohnung 3   | W6, W24, W48                                                        | 48               | 21                                |
| Wohnung 4   | W10, W28, W46, W56, W62                                             | 54               | 24                                |
| Wohnung 5   | W11, W14, W15, W17, W29, W32-33, W35-37, W47, W50-51, W53, W59, W65 | 62               | 27                                |
| Wohnung 6   | W6, W24, W42                                                        | 68               | 30                                |
| Wohnung 7   | W55, W61                                                            | 77               | 34                                |
| Wohnung 8   | W12, W23, W27, W37, W38, W41, W45, W52                              | 84               | 37                                |
| Wohnung 9   | W9, W19, W30, W34, W58, W64                                         | 92               | 40                                |
| Wohnung 10  | W18, W36, W54, W60, W66                                             | 107              | 47                                |
| Wohnung 11  | W57, W63                                                            | 135              | 60                                |

Die Modellierung der Abluftanlage wird im folgenden Abschnitt behandelt, da das Lüftungsgerät in IDA ICE nicht als integraler Bestandteil des Gebäudemodells betrachtet wird, sondern unter der Kategorie „Zentrale Gebäudetechnik“ eingeordnet ist. Es ist anzumerken, dass bereits aus der Analyse des im Gebäudemodell integrierten Lüftungsgeräts ersichtlich war, dass ein von IDA ICE standardmäßig implementiertes Modell eines Lüftungsgeräts verwendet wurde, was nicht dem Lüftungskonzept von pulsG entspricht.

### 1.2.3.5 Modellierung der zentralen Gebäudetechnik



Abbildung 92 Darstellung der Schaltfläche „Zentrale Gebäudetechnik“

In diesem Abschnitt wird die Modellierung der zentralen Gebäudetechnik des Gebäudes pulsG detailliert beschrieben. Wie in Abbildung 11 dargestellt, befindet sich die Schaltfläche „Zentrale Gebäudetechnik“ im Allgemein-Tab der Software IDA ICE. Durch einen Doppelklick auf die jeweiligen Schaltflächen ist es möglich, zu den einzelnen Teilmodellen zu navigieren.

Die Abbildung 92 zeigt zudem, dass die zentrale Gebäudetechnik des Modells in drei Hauptkomponenten unterteilt ist: erstens die „Anlage“, zweitens die „Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG)“ und drittens das „Elektrische System“. In den folgenden Abschnitten wird eine detaillierte Analyse der Modellierung dieser drei Teilbereiche vorgenommen. Dabei werden sowohl der strukturelle Aufbau der einzelnen Teilmodelle als auch deren spezifische Parametrierungen sowie die Interaktion der Teilmodelle untereinander umfassend erläutert.

#### Elektrisches System

Das in IDA ICE abgebildete elektrische System von pulsG umfasst die Photovoltaikanlage (PV-Anlage) sowie den elektrischen Batteriespeicher. Der Aufbau des Systems ist in Abbildung 93 dargestellt.

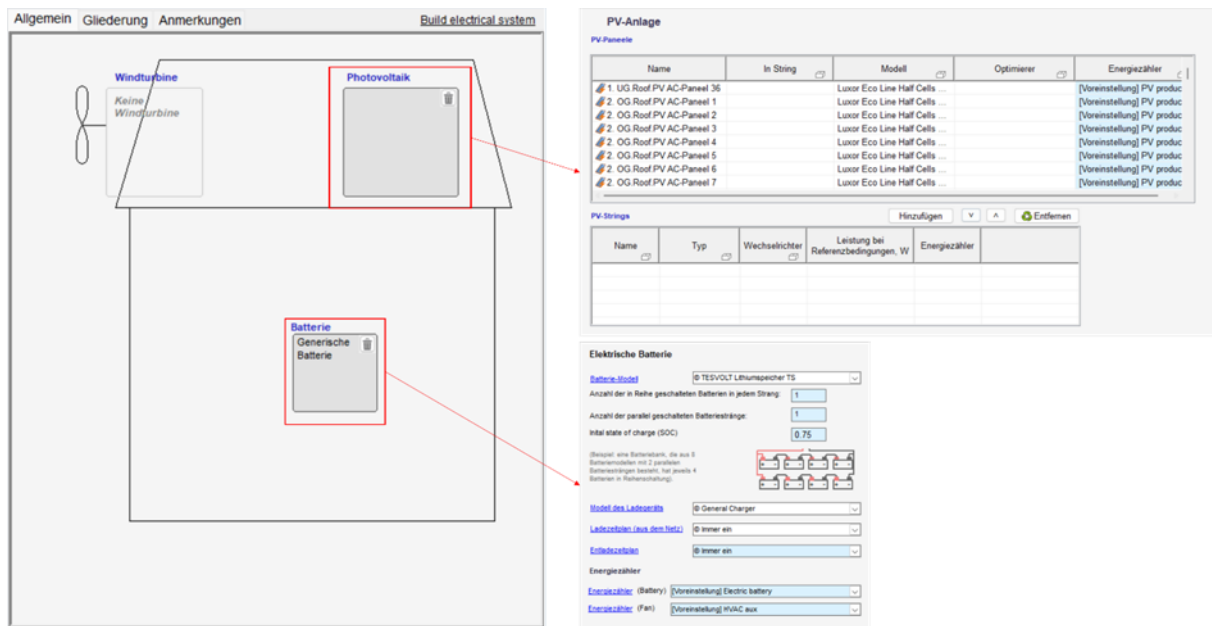


Abbildung 93 Prinzipdarstellung des elektrischen Systems in IDA ICE

Anzumerken ist allgemein, dass darauf verzichtet wurde, ein elektrisches Modell auf dem „Advanced Level“ von IDA ICE zu erstellen, da die hierfür erforderliche Expertise im Modellierungsprozess nicht vorhanden war. Zudem hätte die Umsetzung eines derart komplexen elektrischen Modells den vorgesehenen zeitlichen Rahmen deutlich überschritten.

### Photovoltaik-Anlage

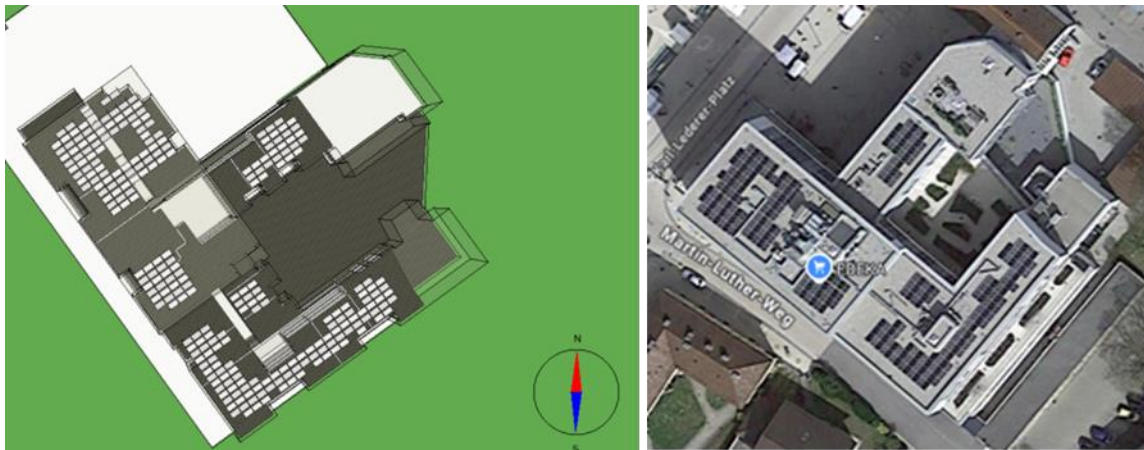


Abbildung 94 Modellerte PV-Anlage in IDA ICE (links), Satellitenbild pulsG mit ersichtlicher PV-Anlage (rechts)

Die in Abbildung 94 dargestellte Photovoltaikanlage (PV-Anlage) wurde ausschließlich in der 3D-Ansicht von IDA ICE modelliert. In der Software können PV-Module mithilfe der bereitgestellten Werkzeugpalette per Drag-and-Drop auf die Dachfläche des Gebäudemodells platziert werden. Durch einen Doppelklick auf die dreidimensionale Darstellung eines Moduls lassen sich dessen Orientierung, Position sowie der Neigungswinkel individuell anpassen. Alle Photovoltaikmodule wurden im Modell mit einem einheitlichen Neigungswinkel von  $10^\circ$  parametrisiert. Hinsichtlich des Azimutwinkels wurden die Module in zwei Gruppen unterteilt: Ein Teil

der Module wurde mit einem Azimutwinkel von  $-36,9^\circ$  ausgerichtet, was einer Abweichung von  $36,9^\circ$  in östlicher Richtung relativ zur Südausrichtung entspricht. Der andere Teil der Module wurde mit einem Azimutwinkel von  $143,1^\circ$  parametrisiert, was einer Abweichung von  $143,1^\circ$  in westlicher Richtung relativ zur Südausrichtung entspricht.

Die Konfiguration der Modulbelegung auf der Dachfläche basiert auf einer visuellen Analyse des Satellitenbildes von pulsG (ebenfalls ersichtlich aus Abbildung 13). Insgesamt wurden 259 Module mit einer Gesamtnennleistung von ca. 81 kWp bei einer Modulfläche von 430 Quadratmetern modelliert. Aufgrund der genutzten Annäherungsmethodik kann es zu Abweichungen zwischen der im Modell abgebildeten und der tatsächlichen PV-Anlage kommen. Die modellierte Darstellung dient somit primär der Annäherung an die reale Gegebenheit und erhebt keinen Anspruch auf vollständige Übereinstimmung mit der tatsächlichen Installation.

Aus Tabelle 13 sind die technischen Daten der modellierten PV-Anlage ersichtlich.

Tabelle 13 Daten der modellierten PV-Anlage

| <b>Merkmale von PV-Anlagen</b> |                                                                                  |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Modell                         | Luxor Eco Line Half Cells M120/310-330W mit Inverter 310 W (nominal panel power) |
| Anzahl der Module              | 259                                                                              |
| Anzahl der Strings             | 259                                                                              |
| Nennleistung                   | 80420 W                                                                          |
| Gesamtfläche Modul             | 430.5 m <sup>2</sup>                                                             |
| <b>Wechselrichter</b>          |                                                                                  |
| Modell                         | MI-300                                                                           |
| Anzahl von Wechselrichtern     | 259                                                                              |
| Einheit Nennleistung           | 300 W                                                                            |
| Gesamtleistung                 | 77700 W                                                                          |
| MPPT pro Wechselrichter        | 1                                                                                |

Das Modell des Photovoltaikmoduls wurde in IDA ICE basierend auf den technischen Spezifikationen des vom Modulhersteller vorhandenen Datenblatts parametrisiert. Bei der PV-Anlage von pulsG wurden Module des Herstellers Luxor mit einer Nennleistung von etwa 300 Watt Peak (WP) installiert. Wie aus Tabelle 8 hervorgeht, ist im verwendeten IDA ICE-Modell des Moduls (Pv\_Panel\_Ac) ein integrierter Wechselrichter für jedes einzelne Modul vorgesehen. Daraus ergibt sich im Modell eine Gesamtanzahl von 259 Wechselrichtern, entsprechend der Anzahl der verbauten Module.

Diese Modellierung weicht jedoch wahrscheinlich von der realen Anlage ab, da in der Praxis üblicherweise mehrere Module zu sogenannten PV-Strings zusammengeschaltet werden, die

gemeinsam von einem zentralen Wechselrichter oder einem String-Wechselrichter bedient werden.

Aufgrund begrenzter Expertise hinsichtlich der Modellierung von PV-Anlagen in IDA ICE wurde auf die Berücksichtigung und Definition von PV-Strings in der Simulation verzichtet. Diese vereinfachte Annahme ermöglicht eine grundlegende Abbildung der PV-Anlage, berücksichtigt jedoch nicht die tatsächlich gängige Verschaltungsweise in realen Photovoltaikanlagen.

### *Batteriespeicher*

Der in Abbildung 93 dargestellte Batteriespeicher wurde, ebenso wie die Photovoltaikanlage, nicht auf dem „Advanced Level“ von IDA ICE modelliert. Stattdessen wurde eine vereinfachte Modellierungsstrategie angewandt, die auf die im Modellierungsprozess verfügbaren Ressourcen und Kenntnisse abgestimmt war.

Wie bereits bei der Parametrierung der PV-Module wurde auch beim Batteriespeicher besonderer Wert daraufgelegt, dass das Modell möglichst präzise auf Grundlage der vom Hersteller vorliegenden technischen Daten konfiguriert wird. Diese Informationen wurden dem zugehörigen Datenblatt entnommen und dienten als Basis für die Eingabe der relevanten Parameter in IDA ICE.

Die spezifischen Eingabewerte, die für die Konfiguration des Batteriespeichers verwendet wurden, sind in Tabelle 14 detailliert aufgeführt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine realitätsnahe, wenn auch vereinfachte Abbildung des Systems, um die Funktionalität des Speichers im Gesamtsystem hinreichend darzustellen.

Tabelle 14 Daten des modellierten Batteriespeichers

| <b>Batterie</b>           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| Modell                    | TESVOLT Lithiumspeicher TS |
| Typ                       | Li-ion                     |
| Batteriekapazität         | 1040 Ah                    |
| Nennspannung              | 58.1 V                     |
| Max. Strom                | 900 A                      |
| Anzahl Batterien in Serie | 1                          |
| Anzahl Batterien parallel | 1                          |
| Gesamtspannung            | 58.1 V                     |
| Gesamt Max. Strom         | 900 A                      |
| <b>Ladegerät</b>          |                            |
| Modell                    | General Charger            |
| Ladeleistung              | 6000 W                     |

|                     |        |
|---------------------|--------|
| Entladeleistung     | 6370 W |
| Max. Strom          | 900 A  |
| Ladestopspannung    | 58.8 V |
| Entladestopspannung | 33 V   |

### Lüftungstechnik

Im folgenden Abschnitt wird das in IDA ICE entwickelte Modell der Abluftanlage ausführlich beschrieben. Diese Anlage gewährleistet in Kombination mit den Lüftungselementen in den Nasszellen der Wohneinheiten die Versorgung der Bäder mit Frischluft. Die Lüftungselemente wurden bereits in einem früheren Abschnitt behandelt, da sie integraler Bestandteil des Gebäudemodells sind. Es ist jedoch zu beachten, dass das in IDA ICE abgebildete Modell der Abluftanlage eine vereinfachte Darstellung der tatsächlich verbauten Systeme darstellt.

In der realen Ausführung des Projekts pulsG wurden zwei separate Abluftanlagen installiert, die unabhängig voneinander arbeiten, jedoch denselben Zweck erfüllen: die Belüftung der Bäder der Wohneinheiten sicherzustellen. Im vorliegenden Modell wurden diese beiden Anlagen jedoch zusammengefasst und als eine einzige Anlage dargestellt. Diese Vereinfachung wurde vorgenommen, um die Simulationszeiten zu verkürzen, da die Modellierung zweier identischer Abluftanlagen mit lediglich unterschiedlichen Volumenströmen der Abluft einen erhöhten Rechenaufwand verursacht hätte.

Das Modell der Abluftanlage kann über die Schaltfläche „Zentrale Gebäudetechnik“ mit einem Doppelklick auf „Abluftanlage mit WRG“ geöffnet werden. Der Aufbau des Modells mit seinen einzelnen Teilkomponenten ist aus Abbildung 95 ersichtlich.

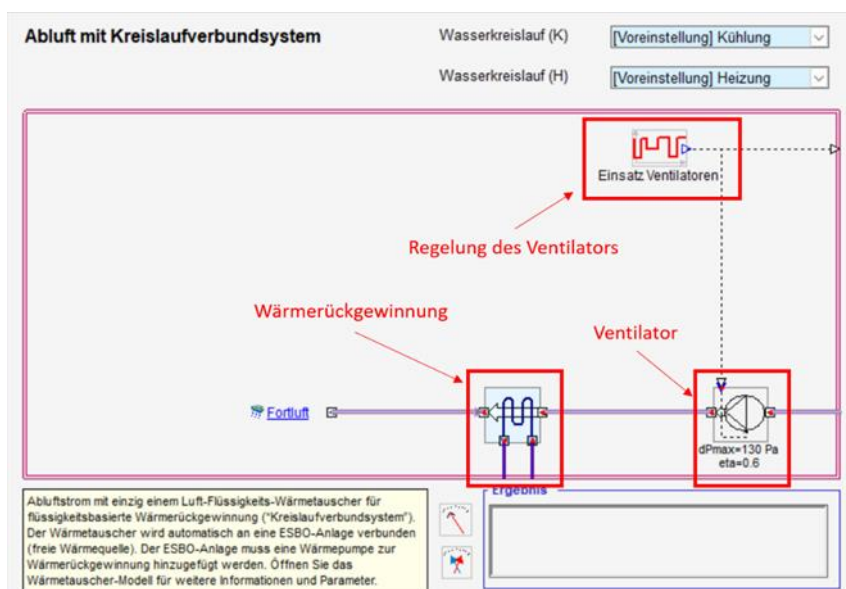


Abbildung 95    Abbildung des Modells der Modellierten Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung

Das in Abbildung 95 dargestellte Modell der Abluftanlage besteht, wie den Beschriftungen zu entnehmen ist, aus lediglich drei Teilmodellen: einem Ventilator (rf), einem Luft-Wasser-Wärmetauscher (EAHX), der als Wärmerückgewinnungseinheit fungiert, sowie einer Regelung, die in diesem Fall durch einen Zeitplan (Sched\_AHU) umgesetzt wurde. Die Parametrierung der Teilmodelle erfolgte, soweit möglich, basierend auf den vorliegenden Herstellerdatenblättern.

Die spezifischen Parameter des Ventilators sind in Abbildung 96 aufgeführt. Anpassungen wurden lediglich hinsichtlich des Druckanstiegs und der Effizienz vorgenommen, wobei die Angaben aus dem Datenblatt des Herstellers AERECO berücksichtigt wurden. Darüber hinaus wurde der Volumenstrom gemäß den Angaben des Herstellerdatenblatts konfiguriert.

Eine Besonderheit ergibt sich bei der Berechnung des Volumenstroms, da es sich im Fall von pulsG um zwei unabhängige, parallel betriebene Abluftanlagen handelt. Die Volumenströme der beiden Teilsysteme (AWN DV-A70 BASIC 101 mit 4.800 m³/h und AWN DV-A40 BASIC 101 mit 2.200 m³/h) wurden addiert und in die für IDA ICE erforderliche Einheit, Liter pro Sekunde, umgerechnet.

Abbildung 96 Parameter des Ventilators (rf)

Der Luft-Wasser-Wärmetauscher (EAHX), der als Einheit zur Wärmerückgewinnung dient, wurde auch auf Grundlage der Herstellerangaben aus dem Datenblatt von AERECO sowie den Temperaturwerten aus dem hydraulischen Wärmeschaltbild der Ausführungsplanung parametrisiert. Die entsprechenden Parameter sind detailliert in Abbildung 97 dargestellt.

### Heat recovery coil

**At design conditions**

|                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| Entering air temperature    | 21 °C         |
| Air flow                    | 1989 L/s      |
| Exhaust air temperature     | 12 °C         |
| Entering air humidity ratio | 0.01048 kg/kg |
| Brine in temperature        | 9 °C          |
| Brine out temperature       | 20 °C         |

Type of Brine: Ethylene\_Glycol

Freezing point of brine: -25 °C

Brine mass flow\*: 0.61432 kg/s

Approximate power extracted\*: 23427.0 W

\* Add a Liquid circuit for AHU heat recovery to the Plant. Set this flow as parameter for this object

\*\* Add a Brine to water heat pump or similar to the Plant. The heat pump power is not automatically limited to attain the target exhaust air temperature. Select heat pump power to match target extracted power. Check resulting exhaust air and brine temperatures.

Abbildung 97 Parameter der Wärmerückgewinnung

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass das zuvor beschriebene Modell des Luft-Wasser-Wärmetauschers (EAHX) über eine Schnittstelle mit dem Teilmodell der Abluft-Wärmepumpe gekoppelt ist, wodurch die zurückgewonnene Wärme innerhalb der Simulation als Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt werden kann. Auf das Teilmodell der Abluft-Wärmepumpe wird zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen.

Die Regelung des Ventilators erfolgt, wie bereits erwähnt, über einen Zeitplan, der an das typische Anwesenheitsprofil einer Wohnung angelehnt ist. Dabei wurde angenommen, dass die Abluftanlage an Wochentagen lediglich während der Nachtstunden und am Nachmittag sowie an Wochenenden ganztägig betrieben wird. Diese Annahme stellt eine weitere Vereinfachung dar, da in der Realität die Steuerung der Abluftanlage vermutlich auf der Anwesenheit einer Person im jeweiligen Bad basiert.

Da das individuelle Nutzerverhalten im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt wurde, war diese Vereinfachung erforderlich, um dennoch eine realitätsnahe Darstellung der Betriebszeiten der Abluftanlage zu ermöglichen. Der in diesem Zusammenhang verwendete Zeitplan, der die Regelung des Ventilators bestimmt, ist in Abbildung 98 dargestellt.

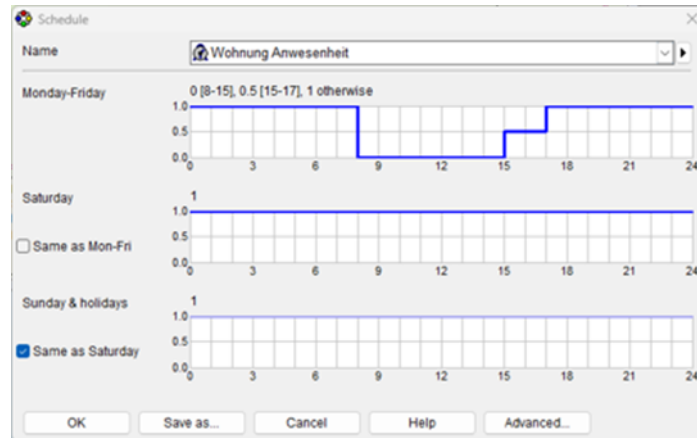


Abbildung 98 Zeitplan der Regelung des Ventilators

## Anlagentechnik

Im folgenden Abschnitt wird der dritte und zugleich umfassendste Teil der zentralen Gebäudetechnik des Simulationsmodells vorgestellt und detailliert erläutert. Dieser Teil beschreibt die Modellierung der in pulsG implementierten Anlage, die der Versorgung des Gebäudes mit Wärme und Kälte dient.

Das in Abbildung 99 dargestellte Anlagenmodell kann innerhalb des Simulationsprogramms im Bereich „Zentrale Gebäudetechnik“ durch einen Doppelklick auf die Option „Anlage“ aufgerufen werden. Hierbei wird eine detaillierte Darstellung der technischen Komponenten und ihrer Funktionsweise zugänglich gemacht, die für die thermische Versorgung des Gebäudes entscheidend sind.

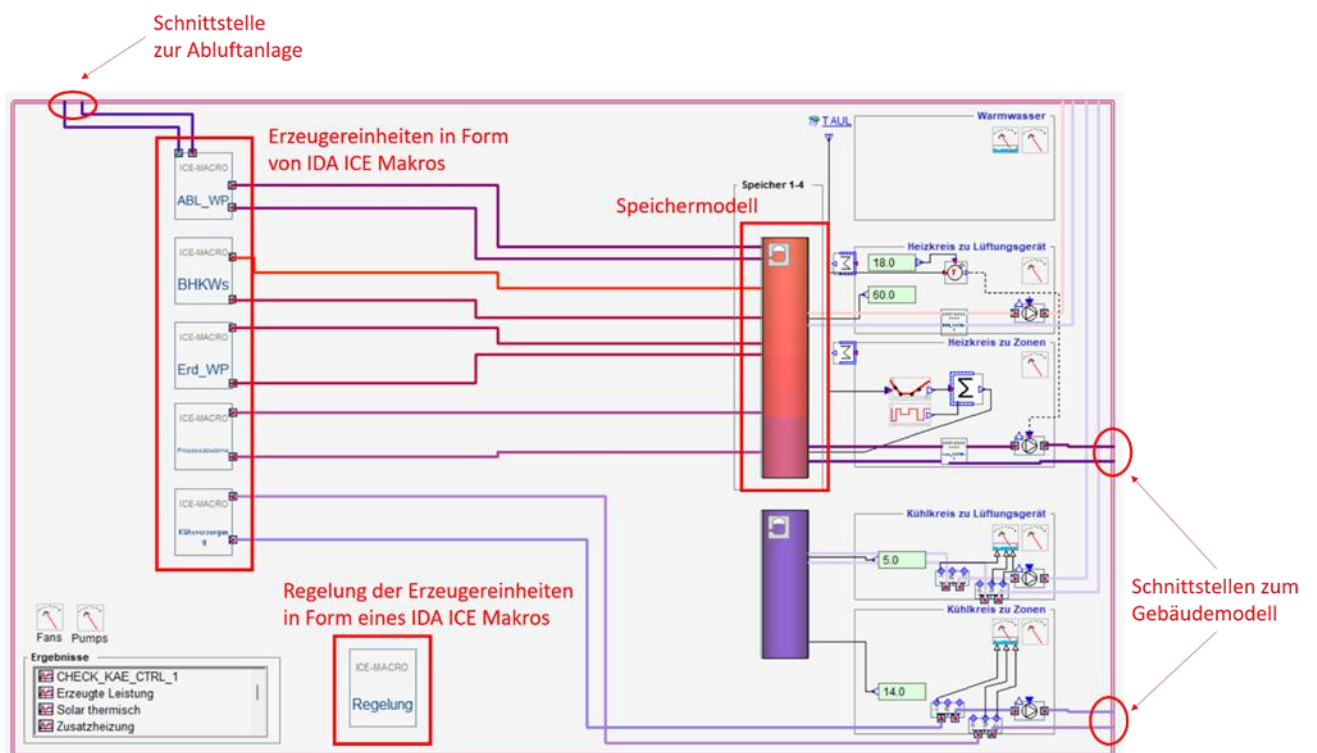


Abbildung 99 Darstellung der modellierten Anlage der Wärme- und Kälteversorgung

Das in Abbildung 99 dargestellte Anlagenmodell lässt sich grundsätzlich in drei Hauptkomponenten unterteilen. Auf der linken Seite sind die jeweiligen Erzeugereinheiten in Form von IDA ICE-Makros zu erkennen, welche die Funktion der Wärme- und Kälteerzeugung übernehmen. Diese Erzeugereinheiten sind mit dem zentralen Wärmespeicher, der den zweiten und zentralen Teil des Modells darstellt, nach rechts verbunden. Der Wärmespeicher spielt eine essenzielle Rolle im Versorgungskonzept und bildet das Bindeglied zwischen Erzeugung und Nutzung der thermischen Energie.

Im unteren Bereich der Abbildung ist ein weiteres IDA ICE-Makro integriert, das für die Regelung der Erzeugereinheiten zuständig ist. Dieses Makro gewährleistet eine koordinierte und effiziente Steuerung der Anlage.

Darüber hinaus sind auf der rechten Seite der Abbildung die Schnittstellen zum Gebäudemodell sichtbar, das durch die modellierten Zonen repräsentiert wird. Die in der linken oberen Ecke markierte Schnittstelle stellt die Verbindung zwischen dem Anlagenmodell und dem Abluftanlagenmodell her. Im Gegensatz dazu erfüllen die unmarkierten Schnittstellen in der rechten oberen Ecke keine funktionale Aufgabe für das Gebäude- oder Anlagenmodell sowie für die Simulation. Diese Schnittstellen werden von IDA ICE automatisch eingefügt und sind ursprünglich für Heiz- und Kühlregister von Lüftungsanlagen vorgesehen.

Obwohl diese Schnittstellen im Anlagenmodell nicht aktiv genutzt werden, wurden sie nicht entfernt, da sie für die Initialisierung der Simulation erforderlich sind. Ohne diese Schnittstellen würde ein Fehler in den benötigten Eingangsvariablen auftreten, was die korrekte Durchführung der Simulation beeinträchtigt.

Im Anschluss soll nun auf die gerade angesprochenen Hauptbestandteile des Anlagenmodells detailliert eingegangen werden.

### *Wärmeerzeugung*

In diesem Abschnitt sollen die für die Wärmeerzeugung modellierten Einheiten detailliert dargestellt werden. Die jeweils angesprochenen IDA ICE Makros können im Simulationsprogramm durch einen Doppelklick geöffnet werden. Aus Abbildung 100 ist eine grobe Übersicht zu den Makros erkennbar.

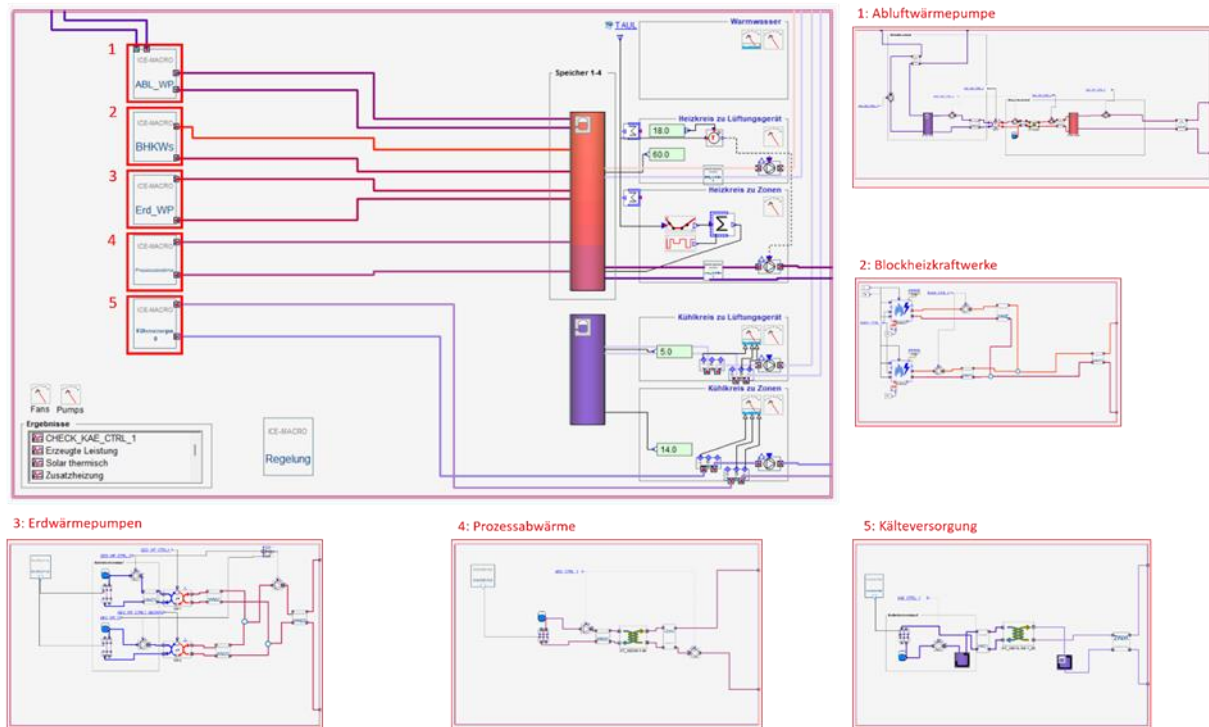


Abbildung 100 Überblick über die Makros der Wärmeerzeugung

Die Modellierung der Wärmeerzeuger folgte einem systematischen Ansatz, der sich an einem klar definierten Vorgehensmuster orientierte. Im ersten Schritt wurde für jeden Wärmeerzeuger auf Grundlage des hydraulischen Wärmeschaltbildes eine funktionale Einheit identifiziert und abgegrenzt. Diese Abgrenzung ermöglichte eine präzise Differenzierung der jeweiligen Wärmeerzeuger von der übrigen Anlagentechnik. Dabei wurde besonderer Wert daraufgelegt, eine strukturierte und übersichtliche Darstellung des Modells zu gewährleisten. Diese Vorgehensweise wurde durch die spezifische Topografie des Versorgungskonzepts begünstigt, da die einzelnen Anlagenteile als eigenständige, voneinander unabhängige Komponenten betrachtet werden konnten.

Die Abgrenzung wurde insbesondere durch die Kapselung der jeweiligen funktionalen Einheit in einem IDA ICE Makro realisiert. Eine anschauliche Darstellung der Umsetzung dieser Abgrenzung findet sich in Abbildung 101. Basis hierfür ist das Bestandsschema der Anlagentechnik, welche nicht Teil des Forschungsprojekts ist. Dieses wurde im Rahmen des Projekt EQ-Net I entwickelt.

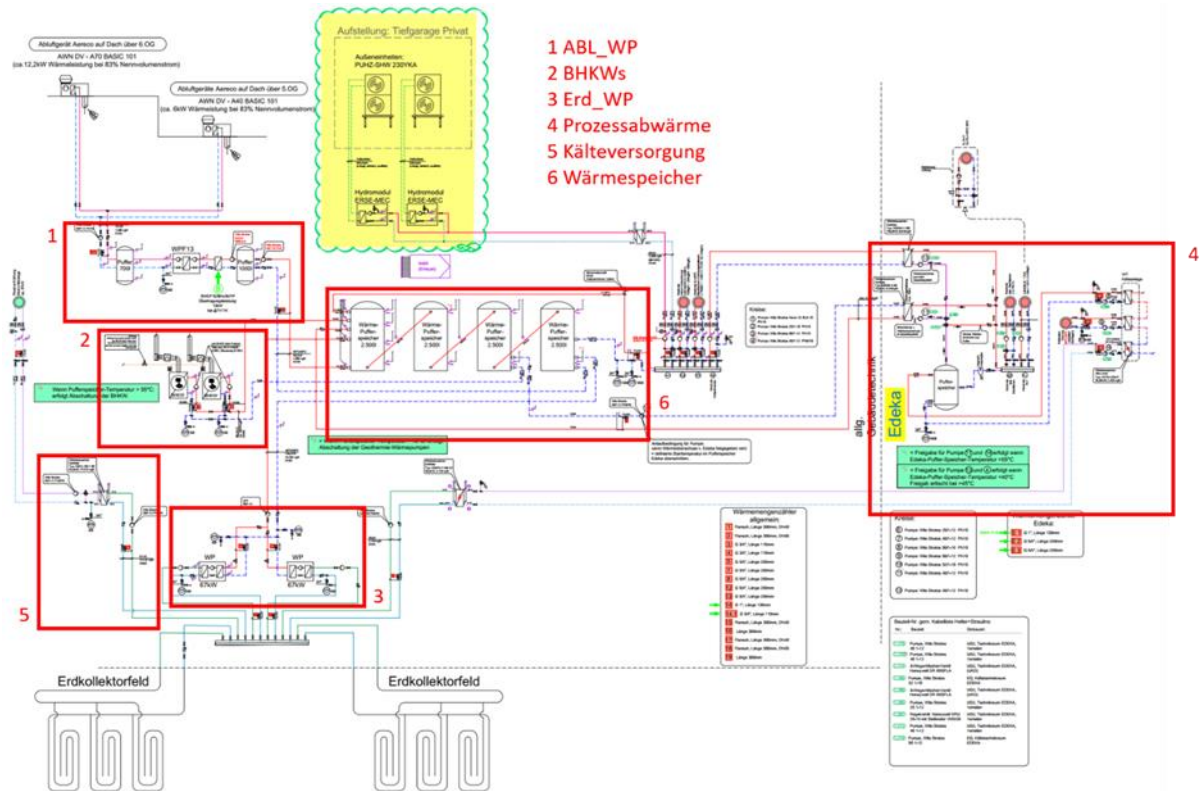


Abbildung 101 Unterteilung der Wärmeerzeugung in funktionelle Einheiten, die dann in den Makros zusammengefasst werden

Alle Komponenten, die in den rot umrandeten und nummerierten Bereichen dargestellt sind, wurden innerhalb eines IDA ICE-Makros berücksichtigt (vgl. Abbildung 19). Im Folgenden werden die einzelnen Makros ausführlich erläutert und beschrieben, um ihre spezifischen Eigenschaften sowie deren Parametrierung darzustellen.

### Abluftwärmepumpe (Makro „ABL\_WP“)

Das Makro der Abluftwärmepumpe (ABL\_WP) ist in Abbildung 19 mit der Nummer 1 gekennzeichnet. Eine detaillierte Darstellung der Modellierung der Abluftwärmepumpe (Abluft-WP) kann der Abbildung 102 entnommen werden.

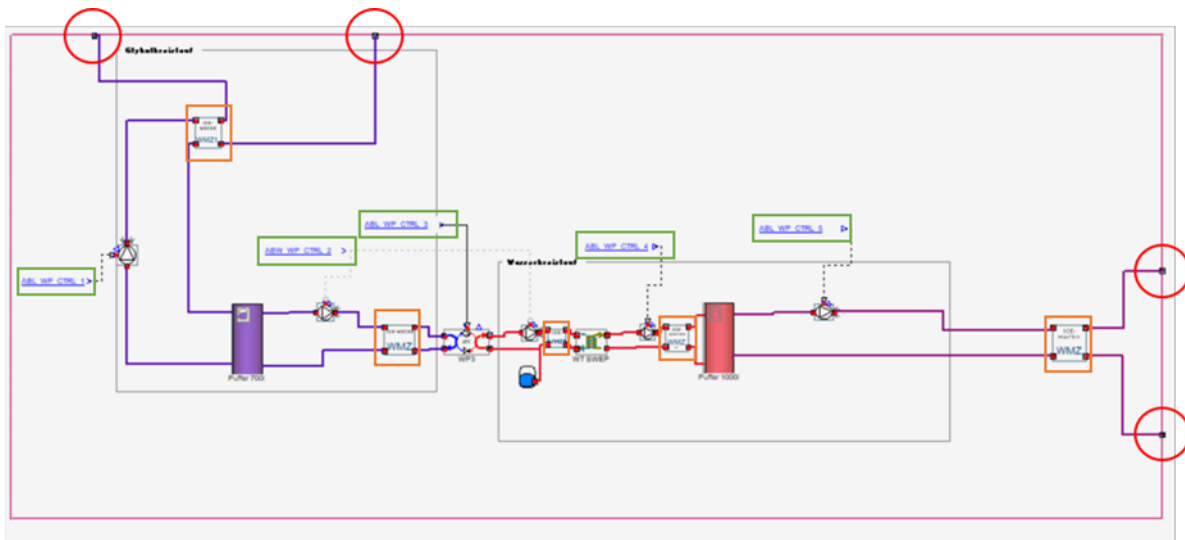


Abbildung 102 Abbildung der Abluftwärmepumpe (Makro ABL\_WP)

### Beschreibung des Modellaufbaus:

Die in Abbildung 102 grün gekennzeichneten Verknüpfungen repräsentieren die Schnittstellen zu den Regelungs makros, die den einzelnen Komponenten zugeordnet sind. Diese Schnittstellen werden in einem späteren Abschnitt detaillierter erläutert. Die in Orange markierten Makros entsprechen den Wärmemengenzählern (WMZ), welche in das Modell integriert wurden, um die Kontrolle von Massenströmen, Temperaturen und Energieflüssen zu gewährleisten. Diese Wärmemengenzähler dienen insbesondere dazu, die Modellierung nach einem Simulationsdurchlauf zu überprüfen und die Konsistenz der Ergebnisse sicherzustellen und haben auf die Funktionalität des Makros an sich keinen Einfluss. Der detaillierte Aufbau eines solchen Wärmemengenzählers ist in Abbildung 103 dargestellt.

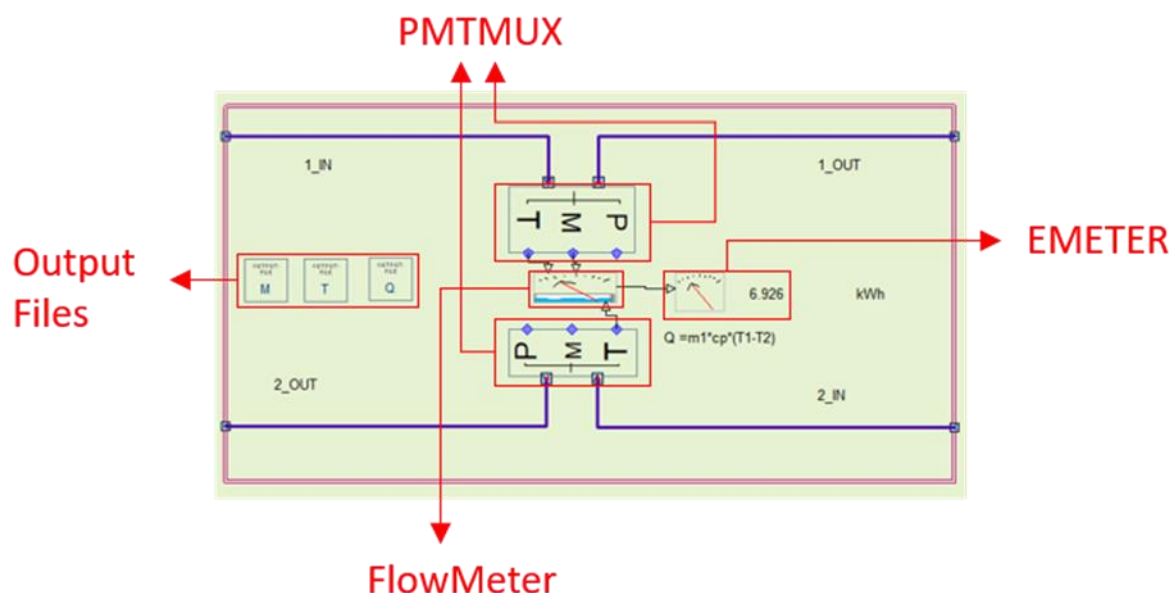


Abbildung 103 Makro Wärmemengenzähler (WMZ)

Die Funktionsweise des Wärmemengenzählermakros lässt sich detailliert wie folgt beschreiben:

Im Verlauf der Simulation werden von den Teilmodellen berechnete Werte, wie Massenstrom, Temperatur und Druck, kontinuierlich weitergegeben (repräsentiert durch die blauen Linien). Diese Werte werden mithilfe eines Multiplexers (PMTMUX) in Einzelsignale aufgespalten. Die einzelnen Signale können anschließend an ein sogenanntes Flow Meter (FlowMeter) weitergeleitet werden. Dieses Flow Meter berechnet den Energiefluss auf der Grundlage der übermittelten Temperaturdifferenzen und Massenströme ( $Q = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)$ ).

Der im jeweiligen Zeitschritt vom Flow Meter ermittelte Energiewert wird an einen Energiezähler (EMETER) übertragen. Dieser addiert die berechneten Energiewerte kontinuierlich auf und stellt die kumulierte Energiemenge dar.

Darüber hinaus bietet das Makro im linken Bereich Output-Dateien, die es ermöglichen, die berechneten Werte über den gesamten Simulationsverlauf hinweg detailliert nachzuvollziehen und zu analysieren.

Diese Methodik, bei der die in der Anlage vorliegenden Temperaturen und Massenströme mithilfe des dargestellten WMZ-Makros sowie der darin generierten Output-Dateien überprüft werden, wurde im gesamten Modell konsequent angewandt. Sie diente dazu, die angegebenen Parameter systematisch zu validieren und die Ergebnisse der Simulation auf ihre Plausibilität und Korrektheit zu überprüfen.

Der in dem hydraulischen Wärmeschaltbild dargestellte Anlagenaufbau (vgl. Abbildung 101, Markierung 1) wurde vollständig in das IDA ICE-Makro integriert und bildet die Grundlage des Modells. Im Zentrum des Modells steht eine Sole-Wasser-Wärmepumpe, die über einen Glykolkreislauf von der linken Seite mit Quellenenergie versorgt wird. Diese Energie wird, wie zuvor beschrieben, aus der Abluftanlage zurückgewonnen. Die Schnittstellen, die in Abbildung 21 im oberen linken Bereich dargestellt sind, stellen eine Verbindung zum Wärmerückgewinnungs-(WRG)-Register der Abluftanlage her. Dadurch wird eine Kopplung zwischen zwei Teilmodellen der zentralen Gebäudetechnik innerhalb des Gebäudemodells ermöglicht. Diese Wechselwirkung wird in Abbildung 104 schematisch illustriert.

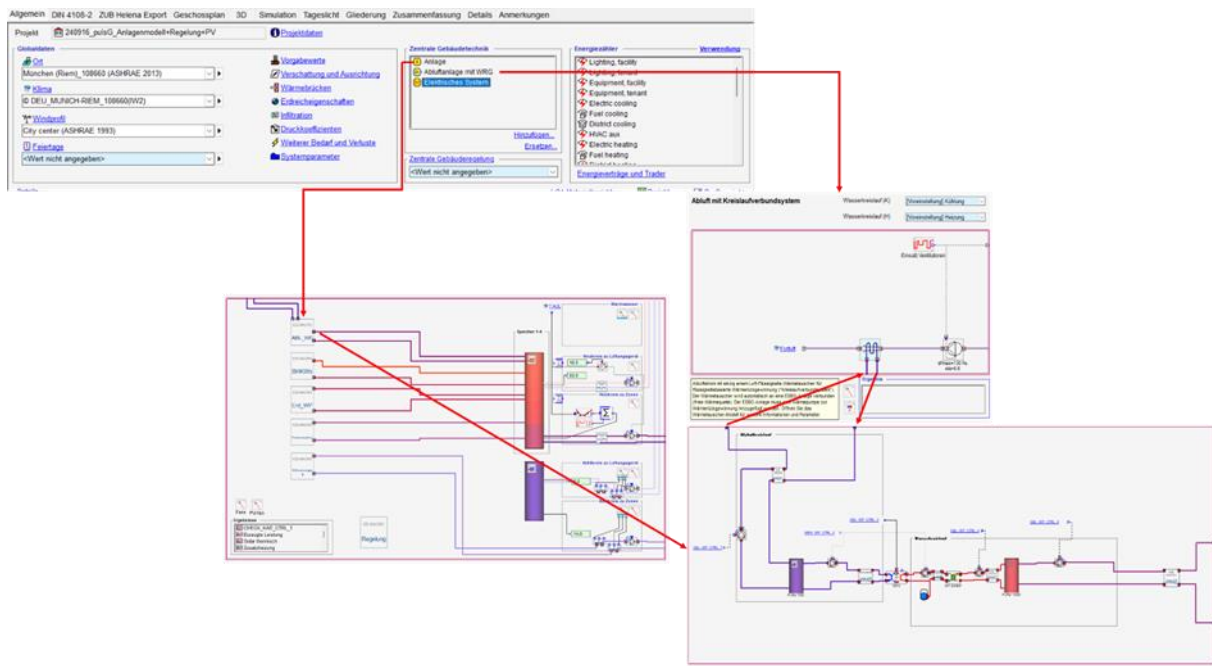


Abbildung 104 Schematische Darstellung der Wechselwirkung des Makros ABL\_WP und der Abluftanlage in IDA ICE

Auf der Sekundärseite der Wärmepumpe befindet sich ein Wärmetauscher, der zur hydraulischen Systemtrennung dient. Direkt nach diesem Wärmetauscher ist ein dezentraler Wärmespeicher angeordnet, der als zusätzlicher Energiespeicher fungiert. Nachgelagert an diesen Wärmespeicher zeigt Abbildung 21 im rechten unteren Bereich die Schnittstelle zum übrigen Anlagenmodell. Diese Schnittstelle gewährleistet die Anbindung an den zentralen Wärmespeicher des Systems und bildet somit die Verbindung zwischen dem Makro der Abluft-WP und dem Rest der Anlage.

### Parametrierung der Teilkomponenten:

#### *Pumpen:*

Für die Modellierung der Pumpen wurde das „PUMPCIRC“-Modell herangezogen. Die spezifische Parametrierung der im Makro ABL\_WP integrierten Pumpen ist detailliert in Tabelle 15 dargestellt. Dabei ist zu betonen, dass lediglich zwei Parameter modifiziert wurden. Erstens wurde im Falle des Glykolkreislaufs das Fördermedium (LIQTYPE) auf Glykol eingestellt, um den Einsatz eines Glykolgemischs als Wärmeträgerflüssigkeit korrekt abzubilden. Zweitens wurde bei allen Pumpen der Auslegungsvolumenstrom entsprechend den Vorgaben des hydraulischen Wärmeschaltbilds aus der Ausführungsplanung angepasst.

Tabelle 15 Parametrierung Pumpen Makro ABL\_WP

| Nummerierung<br>(nach Abb. Seite<br>129) | Bezeichnung | Pumpenmedium<br>(LIQTYPE) | Auslegungsdurch-<br>fluss (MFNOM)<br>[kg/s] |
|------------------------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------------------------|
| 1                                        | PUMPCIRC    | Ethylene_Glycol           | 24,75                                       |
| 2                                        | PUMPCIRC1   | Ethylene_Glycol           | 20,0                                        |
| 3                                        | PUMPCIRC2   | Water                     | 10,0                                        |
| 4                                        | PUMPCIRC4   | Water                     | 2,25                                        |
| 5                                        | PUMPCIRC4   | Water                     | 18,15                                       |

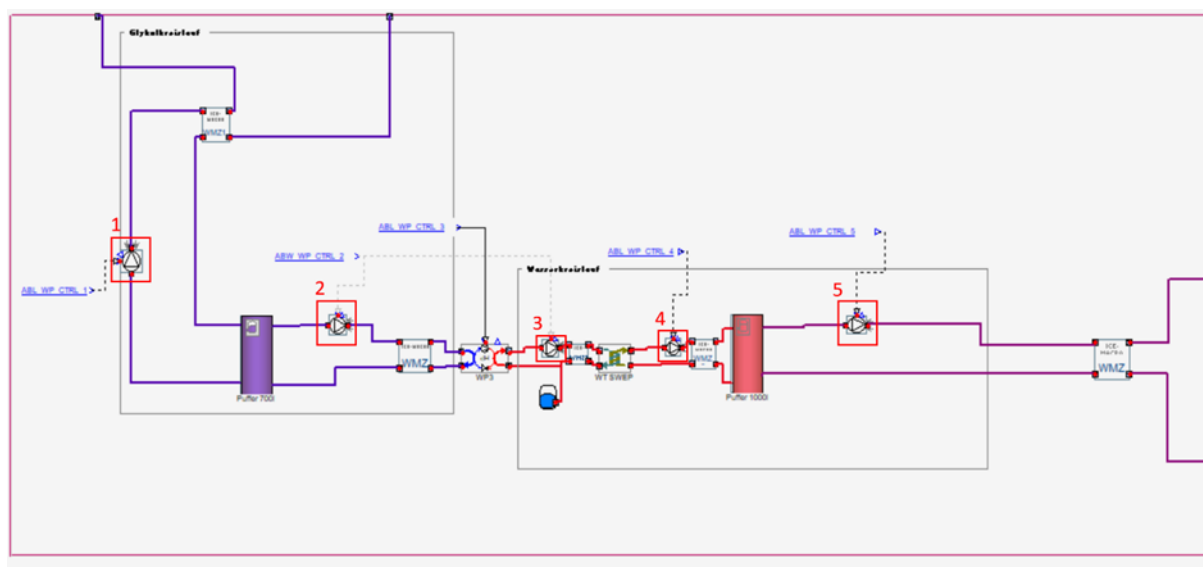


Abbildung 105 Nummerierung der Pumpen in Makro ABL\_WP

#### *Wärmespeicher:*

Die im Makro erkennbaren Wärmespeicher wurden mithilfe des in IDA ICE implementierten Modells „TANKSTRAT“ erstellt. Dieses Modell repräsentiert einen thermischen Energiespeicher, der auf der Basis eines geschichteten Aufbaus funktioniert. Die Anzahl der Schichten

kann dabei vom Benutzer entsprechend der spezifischen Anforderungen des Systems festgelegt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde für beide betrachteten Speicher eine Schichtanzahl von acht gewählt, um eine ausreichende Detaillierung der thermischen Schichtung sicherzustellen. Die Parametrierung der Schichtanzahl sowie die geometrischen Abmessungen der beiden Wärmespeicher sind detailliert in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16 Parametrierung Wärmespeicher Makro ABL\_WP

| Bezeichnung         | Speichervolumen (VTank) [m³] | Formfaktor (Shape Factor) | Innenradius (Rtank) [m] | Höhe (hTank) [m] | Anzahl der Schichten (nLayer) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|
| <b>Puffer 700l</b>  | 0,7                          | 1,09                      | 0,467                   | 1,02             | 8                             |
| <b>Puffer 1000l</b> | 1,0                          | 1,09                      | 0,526                   | 1,149            | 8                             |

Es ist außerdem darauf hinzuweisen, dass für den 700-Liter-Wärmespeicher, der im Glykolkreislauf auf der Quellenseite der Wärmepumpe integriert ist, das verwendete Medium entsprechend den Eigenschaften von Glykol angepasst werden musste. Im Gegensatz zu den Pumpen wurde die Anpassung jedoch nicht durch eine direkte Änderung des Parameters „LIQTYPE TANK“ auf Glykol vorgenommen. Stattdessen erfolgte die Anpassung durch die explizite Modifikation der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte sowie des Gefrierpunkts des Mediums.

Die Entscheidung gegen eine direkte Parametrisierung des Mediums als Glykol über „LIQTYPE TANK“ basierte auf wiederholt auftretenden numerischen Instabilitäten in der Simulation, die bei dieser Methode auftraten. Durch die gezielte Anpassung der thermophysikalischen Eigenschaften, während der Parameter „LIQTYPE TANK“ auf Wasser belassen wurde, konnte dieses Problem erfolgreich umgangen werden. Diese Vorgehensweise gewährleistete eine korrekte Abbildung der Stoffeigenschaften von Glykol, ohne dabei die numerische Stabilität der Simulation zu beeinträchtigen.

#### Wärmetauscher:

Für die Modellierung des Wärmetauschers, der als hydraulische Systemtrennung fungiert, wurde das Modell „Brine-to-Brine Heat Exchanger“ verwendet. Dieses Modell repräsentiert einen Gegenstrom-Wärmetauscher, der in der Simulation eingesetzt wurde, um den Wärmeübertragungsprozess zwischen zwei getrennten Kreisläufen darzustellen.

Die spezifische Funktion dieses Wärmetauschers innerhalb des Gesamtsystems der Anlage von pulsG konnte zwar nicht vollständig nachvollzogen werden, dennoch wurde der Wärmetauscher in die Modellierung einbezogen, um die Systemstruktur konsistent abzubilden.

Im Rahmen der Parametrierung wurden ausschließlich die Auslegungswerte an die Vorgaben aus der Ausführungsplanung angepasst. Diese Anpassungen betrafen insbesondere die Auslegungsleistung sowie die Ein- und Ausgangstemperaturen des Wärmetauschers auf der Primär- und Sekundärseite. Die entsprechenden Werte sind detailliert in Tabelle 17 dokumentiert.

Tabelle 17 Parametrierung des Wärmetauschers in Makro ABL\_WP

| Parameter                  | Einheit | Wert  |
|----------------------------|---------|-------|
| QRat                       | [W]     | 19000 |
| Eingangstemp. A (TAInRat)  | [°C]    | 55    |
| Ausgangstemp. A (TAOutRat) | [°C]    | 40    |
| Eingangstemp. B (TBInRat)  | [°C]    | 40    |
| Ausgangstemp. B (TBOutRat) | [°C]    | 55    |

## Wärmepumpe:

Für die Modellierung der Sole-Wasser-Wärmepumpe wurde das vereinfachte Wärmepumpenmodell „B2B\_Hp\_model“ aus IDA ICE verwendet. Um die in der Anlage von pulsG eingesetzte Wärmepumpe des Herstellers Stiebel Eltron, Modell „WPF13“, in die Simulation zu integrieren, wurde ein entsprechendes Produkt in der Eingabemaske des Modells angelegt. Die Parametrierung erfolgte basierend auf den herstellerspezifischen technischen Daten, die dem vorliegenden Datenblatt entnommen wurden, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Anlageneistung zu gewährleisten.

Aus Abbildung 106 sind die vorgenommenen Eingaben und die Parametrierungen der Wärmepumpe durch die roten Markierungen ersichtlich.

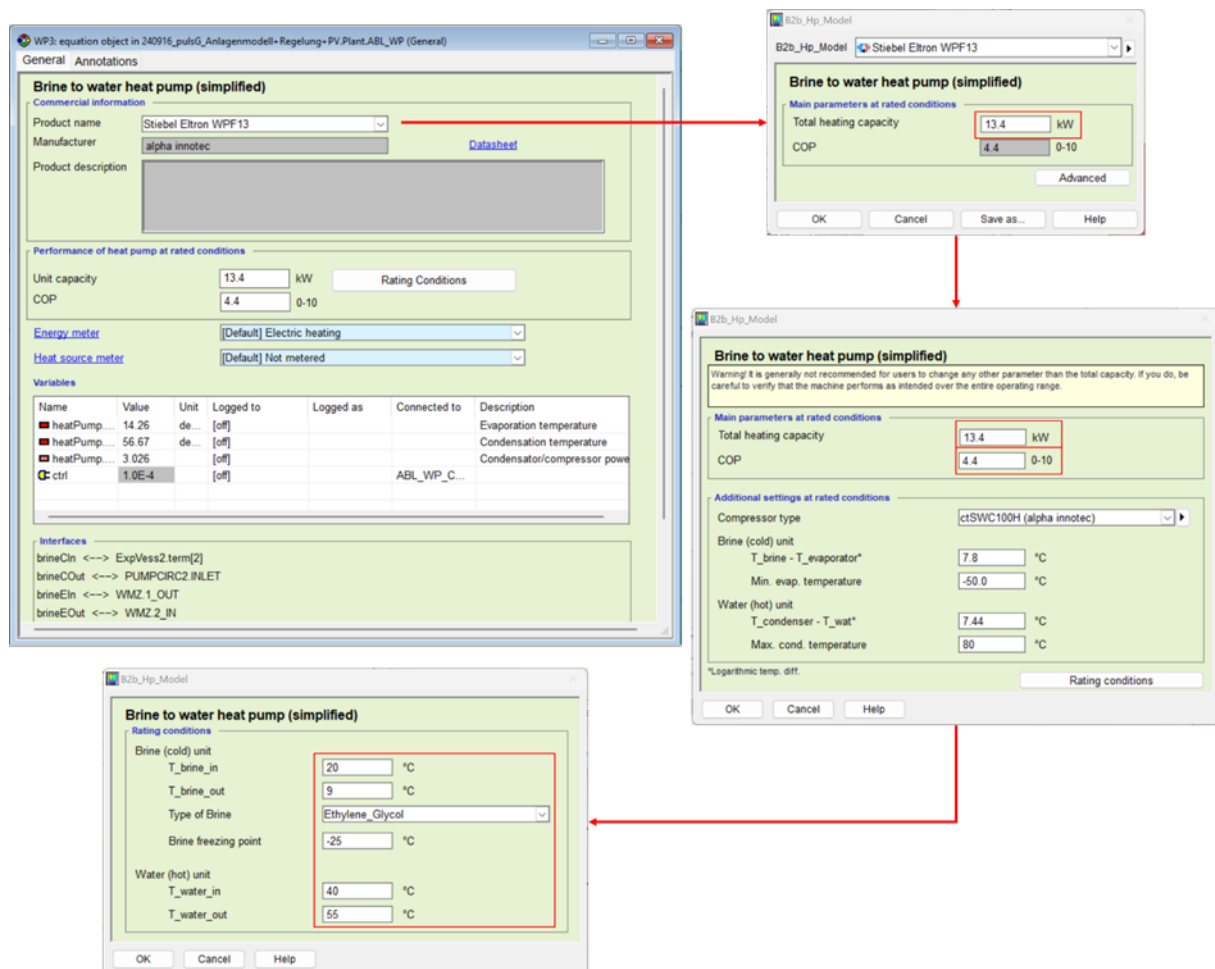


Abbildung 106 Parametrierung des Wärmepumpenmodells im Makro ABL\_WP

### **Blockheizkraftwerke (Makro „BHKWs“)**

Das Makro der Blockheizkraftwerke (BHKWs) ist in Abbildung 100 mit der Nummer 2 gekennzeichnet. Eine detaillierte Darstellung der Modellierung der Blockheizkraftwerke (BHKWs) in IDA ICE kann Abbildung 107 entnommen werden. Auf die Makros der Wärmemengenzähler wird an dieser Stelle nicht mehr genauer eingegangen, da diese den gleichen Zweck wie bereits beschrieben erfüllen.

Blockheizkraftwerke (BHKWs):

Da sowohl der Aufbau des Makros als auch die Parametrierung der Teilmodelle identisch sind, wird im Folgenden exemplarisch auf ein BHKW-Modell (Blockheizkraftwerk) und ein Pumpenmodell eingegangen.

Für die Modellierung des Blockheizkraftwerks wurde das IDA ICE-Modell „CHP\_model“ verwendet. Dieses Modell wurde speziell angepasst, um die in pulsG verbauten Blockheizkraftwerke des Herstellers Viessmann mit dem Fabrikat Vitobloc 200 EM-20/39 realitätsnah in die Simulation zu integrieren. Analog zur Vorgehensweise bei der Wärmepumpe wurde ein entsprechendes Modell auf Basis der technischen Daten und Kennwerte aus den vorliegenden Herstellerdatenblättern erstellt.

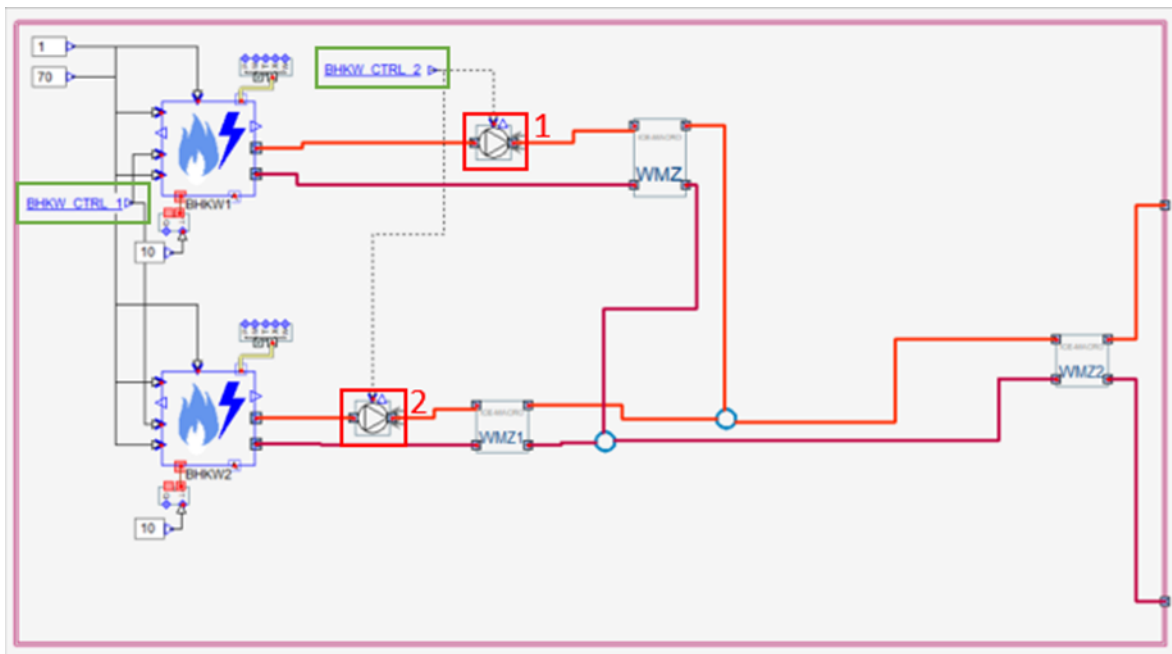


Abbildung 107 Abbildung der Blockheizkraftwerke (Makro BHKWs) mit Nummerierung der Pumpen (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zu den Regelmakros (grün)

Die Parametrierungen, die zur Abbildung der spezifischen Eigenschaften dieses Blockheizkraftwerks erforderlich waren, sind detailliert in Abbildung 108 dargestellt. Diese umfassen unter anderem die thermischen und elektrischen Leistungsdaten, Betriebscharakteristiken sowie weitere relevante Parameter, die für die realistische Nachbildung des Betriebsverhaltens von Bedeutung sind.

| Name         | Value               | Unit     | Description                                                  |
|--------------|---------------------|----------|--------------------------------------------------------------|
| nPoint       | 3                   | items    | Number of considered points for efficiency curve [integer]   |
| Pnet_min     | 10000.0             | W        | Minimum electricity output in continuous modulation[W]       |
| Pnet_max     | 20000.0             | W        | Maximum electricity output of the system[W]                  |
| Qnet_max     | 40000.0             | W        | Maximum heat output of the system[W]                         |
| Pnet_standby | 165.0               | W        | Standby power of the system[W]                               |
| MCeng        | 425000.0            | J/K      | Heat Capacity of the CHP unit (= cp*m) [J/K]                 |
| MCwat        | 2810.0              | J/K      | Thermal mass of cooling water and heat exchanger[J/K]        |
| UA_loss      | 4.64                | W/(m2.K) | Effective thermal conductance between engine and surrou      |
| UA_hx        | 600.0               | W/(m2.K) | Overall thermal conductance between engine and cooling       |
| mcw_min      | 0.1                 | kg/s     | Min water massflow[kg/s]                                     |
| mcw_max      | 0.42                | kg/s     | Min water massflow[kg/s]                                     |
| tau_Pnet     | 0.0                 | s        | Time constant for power output[sec]                          |
| tau_Mcw      | 10.0                | s        | Time constant for mass flow of coolant[sec]                  |
| tau_Tflgas   | 60.0                | s        | Time constant for fluegas temperature[sec]                   |
| tau_Tcwout   | 60.0                | s        | Time constant for coolant outlet temperatur[sec]             |
| PLR[1:3]     | {0.5 0.75 1.0}      |          | Part-load points for efficiency of chp [nrmz]                |
| Etael[1:3]   | {0.246 0.291 0.322} |          | Electrical efficiencies at selected part-load points for chp |
| Etaqe[1:3]   | {0.549 0.291 0.627} |          | Thermal efficiencies at selected part-loads for chp [nrmz]   |
| AFR[1:3]     | {22.0 21.0 20.0}    |          | ICE Combustion Air Fuel Ratio CH4: 17.19 Diesel: 14.5 E      |
| Ccel         | 0.98                |          | Electrical Efficiency degradation coefficient Cc used in on  |
| Ccqe         | 0.905               |          | Thermal Efficiency Degradation coefficient used in on-off c  |
| Cdel         | 0.98                |          | Electrical Efficiency degradation coefficient Cd used in on  |
| Fuel         | © NaturalGas        |          | Fuel type considered for CHP                                 |

Abbildung 108 Parametrierung des BHKW-Modells (CHP\_model)

Neben der Parametrierung des eigentlichen BHKW-Modells ist es erforderlich, auch die weiteren Schnittstellen des Modells mit entsprechenden Eingangswerten zu versehen, um eine fehlerfreie Initialisierung der Simulation sicherzustellen. Eine Übersicht der Schnittstellen des „CHP\_model“ ist in Abbildung 109 dargestellt.

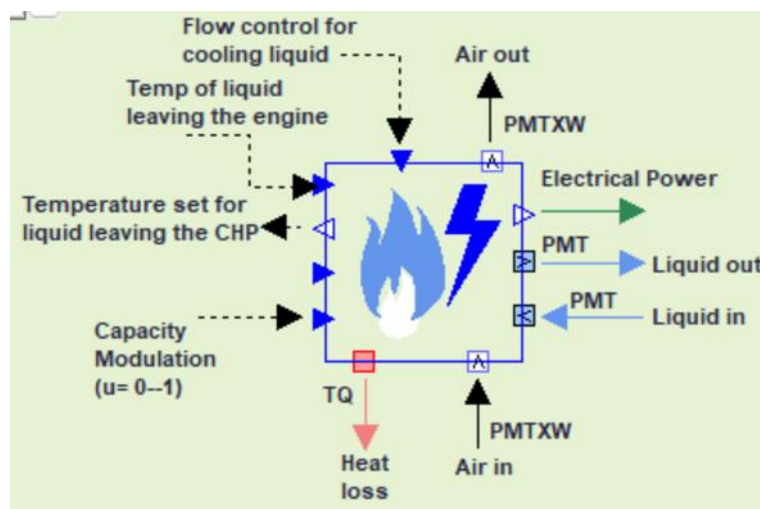


Abbildung 109 Schnittstellen des BHKW-Modells (CHP\_model)

Das vorliegende BHKW-Modell stellt ein relativ komplexes Teilmodell innerhalb der Simulationsumgebung IDA ICE dar. Aufgrund dieser Komplexität mussten einige Annahmen zur Parametrierung der Eingangswerte getroffen werden, die über Konstanten definiert wurden. Diese Vereinfachungen waren erforderlich, da die Integration und Modellierung von Blockheizkraftwerken (BHKWs) über längere Zeit und die Bearbeitung eine Herausforderung für den Simulationsprozess darstellte.

Der Schwerpunkt lag deswegen zunächst darauf, das Modell überhaupt stabil in die Simulation zu integrieren. Daher wurde der Einfluss der im Folgenden beschriebenen Parametrierungen

auf das Teilmodell während des weiteren Modellierungs- und Simulationsverlaufs nicht tiefergehend untersucht. Die erfolgreiche Einbindung des Modells in die Simulation stellte bereits einen wichtigen Fortschritt dar. Die bestehenden Probleme in Verbindung mit dem BHKW-Modell konnten letztlich erst nach mehrfacher Rücksprache mit dem Support der Simulationssoftware IDA ICE behoben werden.

Für die Schnittstelle „Air out“ (AirFlowOut) wurde ein Multiplexer für Luft (AIRMUX) angebunden, um die Luftströmung, die aus dem BHKW austritt, korrekt zu modellieren. Die Schnittstelle „Heat loss“ (ZoneLink), die den Wärmeverlust des BHKWs an eine definierte Zone im Gebäudemodell repräsentiert, wurde mit einem weiteren Multiplexer (TQMux) verbunden. An diesem Multiplexer wurde ein konstanter Temperaturwert von 10 °C definiert, um die Anforderungen des Modells zu erfüllen. Dies wurde durch die Verwendung einer Konstanten realisiert.

Die Schnittstellen „Electrical Power“ (PNet) und „Temperature set for liquid leaving the CHP“ (Tcw\_DryC\_In) mussten für die Simulation hingegen nicht verbunden werden, da sie für den betrachteten Simulationskontext keine Relevanz hatten.

#### *Pumpen:*

Die Pumpen im Makro der Blockheizkraftwerke wurden, analog zum bereits im Makro der Abluftwärmepumpe verwendeten Modell, anhand des PUMPCIRC-Modells abgebildet. Im vorliegenden Fall erfolgte die Parametrierung jedoch ausschließlich auf Basis des Auslegungsdurchflusses, der den in der Ausführungsplanung vorliegenden Werten entspricht. Die spezifischen Parametrierungen sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18 Parametrierung der Pumpen im Makro BHKWs

| <b>Nummerierung<br/>(nach Abb. Seite<br/>136)</b> | <b>Bezeichnung</b> | <b>Pumpenmedium<br/>(LIQTYPE)</b> | <b>Auslegungsdurch-<br/>fluss (MFNOM) [kg/s]</b> |
|---------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>1</b>                                          | PUMPCIRC           | Water                             | 57,33                                            |
| <b>2</b>                                          | PUMPCIRC1          | Water                             | 57,33                                            |

#### **Erdwärmepumpen (Makro „Erd WP“)**

Das Makro der Erdwärmepumpen (Erd\_WP) ist in Abbildung 100 mit der Nummer 3 gekennzeichnet. Der detaillierte Aufbau des Makros und seiner Teilmodelle wird in Abbildung 110 dargestellt. Analog zum Makro der BHKWs werden alle Teilkomponenten des Makros in der Beschreibung nur einmal erläutert, da der Aufbau und die Parametrierung der Teilkomponenten für die beiden Wärmepumpen (WP1, WP2) identisch sind.

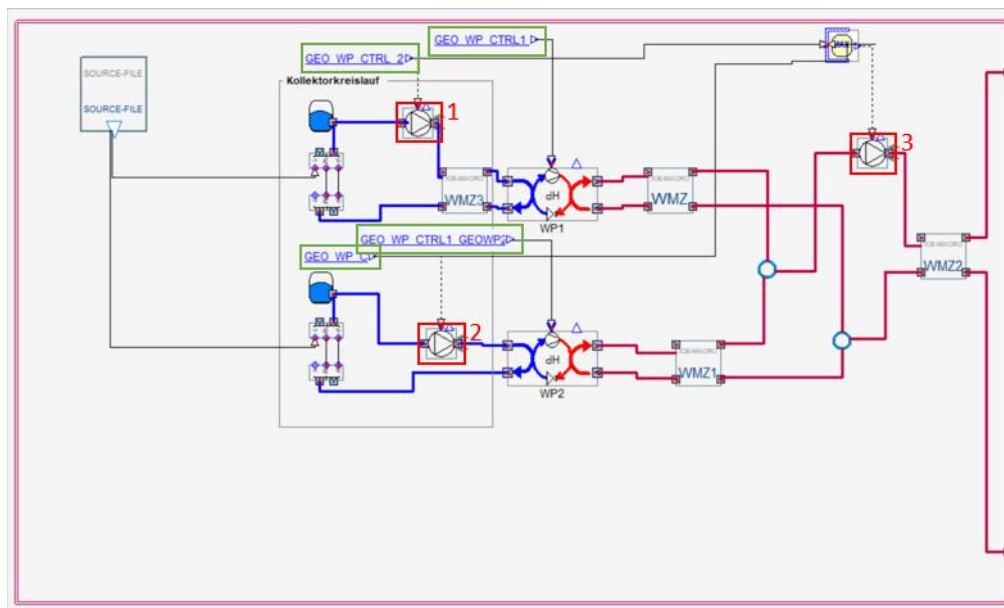


Abbildung 110 Prinzipskizze der Erdwärmepumpen (Makro Erd\_WP) mit Nummerierung der Pumpen (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zu den Regelungsmakros (grün)

#### Pumpen:

Wie in den bereits dargestellten Makros wurde zur Modellierung der Pumpen das PUMPCIRC-Modell von IDA ICE verwendet. Die Parametrierung der Pumpen, was sich wie bei den BHKWs auf die Änderung des Auslegungsdurchflusses beschränkt, ist aus Tabelle 19 ersichtlich.

Tabelle 19 Parametrierung der Pumpen im Makro Erd\_WP

| Nummerierung<br>(nach Abb. 29) | Bezeichnung | Pumpenmedium<br>(LIQTYPE) | Auslegungsdurchfluss (MFNOM) [kg/s] |
|--------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1                              | PUMPCIRC    | Water                     | 85,0                                |
| 2                              | PUMPCIRC1   | Water                     | 85,0                                |
| 3                              | PUMPCIRC2   | Water                     | 172,3                               |

#### Einbindung des Temperaturdatensatzes des Erdkollektors über ein Source-File:

Die Modellierung des im Anlagenkonzept von pulsG vorhandenen Erdkollektors in der Simulationsumgebung IDA ICE erforderte zunächst eine Analyse möglicher Ansätze. Ursprünglich wurde in Betracht gezogen, den Erdkollektor mithilfe verschiedener physikalischer Teilmodelle innerhalb von IDA ICE zu simulieren. Nach eingehender Abstimmung mit Experten aus dem Bereich der Gebäudesimulation, darunter Mitglieder des IBSA-DACH sowie dem Support-Team von IDA ICE, wurde jedoch entschieden, den Erdkollektor nicht über physikalische Modelle darzustellen, da dies das Modell deutlich komplexer und instabiler im Simulationsverlauf gemacht hätte. Stattdessen wurde ein datenbasierter Ansatz gewählt, bei dem vorhandene Temperaturmesswerte aus dem realen Gebäudebetrieb genutzt werden.

Die zugrunde liegenden Messdaten wurden über einen Zeitraum von drei Jahren im Betrieb des Gebäudes erhoben. Die Aufzeichnung erfolgte über das Gebäudeautomationssystem in einer minütlichen Auflösung, wodurch ein umfangreicher Datensatz entstand. Diese Messwerte mussten zunächst aufbereitet und in ein für die Einbindung in IDA ICE geeignetes Format transformiert werden. Die Methodik der Datenverarbeitung sowie die Erstellung des finalen Datensatzes werden an anderer Stelle ausführlich beschrieben.

Das Ergebnis der Datenaufbereitung war ein sogenanntes PRN-File, das stündliche Vorlauftemperaturwerte des Erdkollektors enthält. Dieses File, das an einem beliebigen Speicherort abgelegt werden kann, wird über ein „Source-File“-Objekt in IDA ICE eingebunden. Der datenbasierte Ansatz ermöglicht somit eine realitätsnahe Nachbildung des thermischen Verhaltens des Erdkollektors, ohne auf komplexe physikalische Modellierungen angewiesen zu sein.

Ein exemplarischer Workflow zur Einbindung des PRN-Files in IDA ICE ist in Abbildung 111 dargestellt.

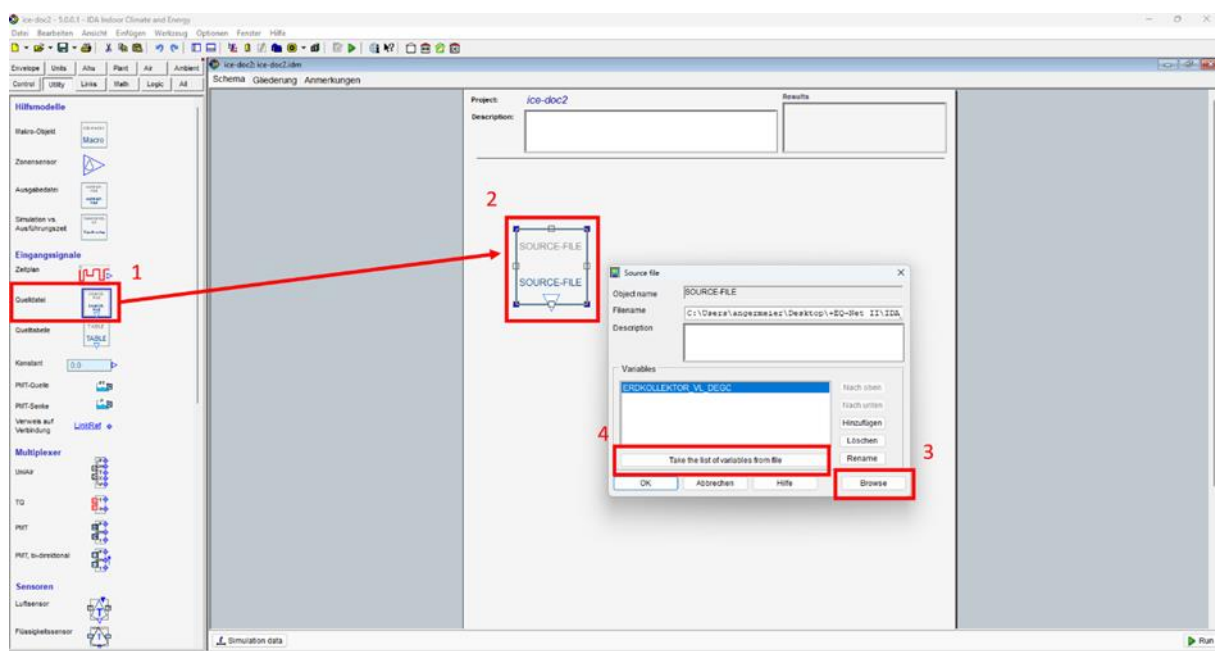


Abbildung 111 Einbindung eines externen Datensatzes über ein Source-File in IDA ICE

Wie in Abbildung 110 dargestellt, kann das Temperatursignal mithilfe eines Multiplexers (PMTMUX) an andere Teilmodelle weitergegeben werden. Diese Weiterleitung ermöglicht eine flexible Nutzung der Temperaturdaten innerhalb des Simulationsmodells und dient der Verknüpfung verschiedener Modellkomponenten.

Um die Druck- und Massenstrombilanz auf der Quellenseite des Kreislaufs sicherzustellen und somit die numerische Stabilität während der Simulation zu gewährleisten, wurde hinter dem Multiplexer ein Ausdehnungsgefäß (ExpVess2) eingefügt. Das Ausdehnungsgefäß erfüllt eine wichtige Funktion in dem geschlossenen Kreislauf: Es verhindert, dass der Kreislauf im Hinblick auf die Variablen Druck und Massenstrom überbestimmt wird. Ohne dieses Bauteil, das aus Sicht der Software als Nullpunkt für die Druck- und Massenbilanz dient, würde die Simulation aufgrund einer überbestimmten Bilanz von Druck und Masse einen numerischen Fehler erzeugen und abbrechen.

Das Modell des Ausdehnungsgefäßes wurde ohne Änderungen an den Standardparametern in die Simulation eingebunden. Diese Standardkonfiguration erwies sich als ausreichend, um die Stabilität der Simulation sicherzustellen.

### Wärmepumpen:

Für die Modellierung der Erdwärmepumpen wurde, analog zur Abluftwärmepumpe, das vereinfachte Wärmepumpenmodell „B2B\_Hp\_model“ aus der Simulationssoftware IDA ICE verwendet. Dementsprechend wurde für die in der Anlage von pulsG verbaute Wärmepumpe des Herstellers Stiebel Eltron, Fabrikat WPF 66, ein Produkt in der Eingabemaske von IDA ICE angelegt. Die Parametrierung erfolgte auf Basis der technischen Daten, die den herstellereigenen Datenblättern entnommen wurden. Die vorgenommenen Einstellungen und Parametrierungen sind detailliert in Abbildung 112 dargestellt.

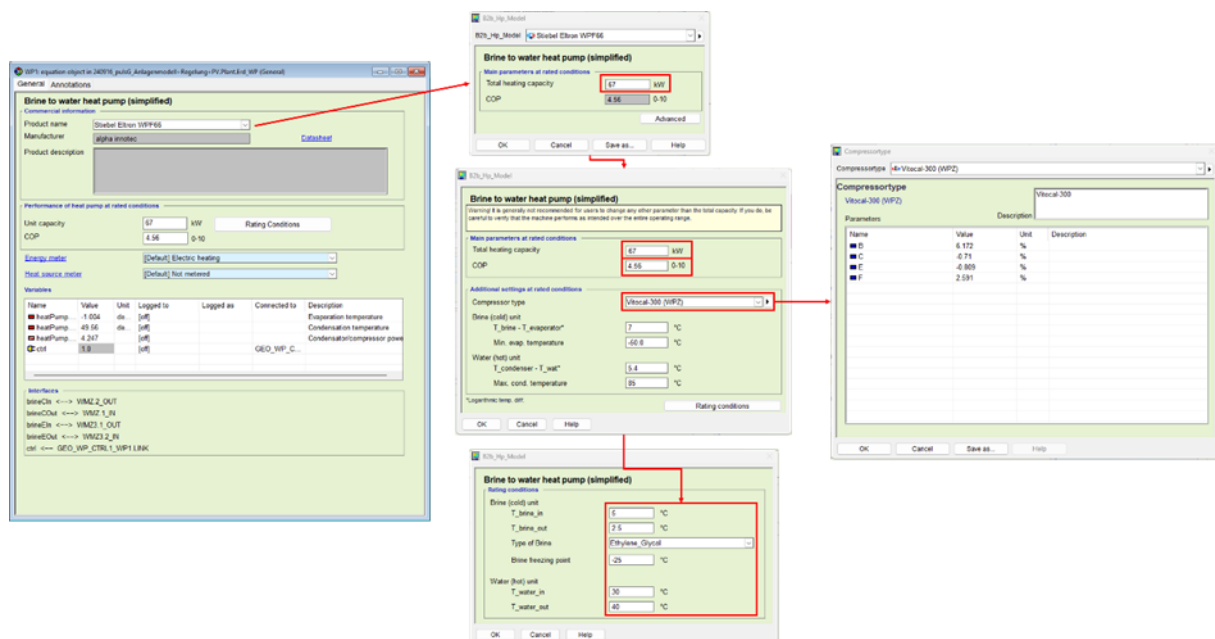


Abbildung 112 Parametrierung der Wärmepumpe (B2b\_Hp\_model) im Makro ABL\_WP

### Prozessabwärme (Makro „Prozessabwärme“)

Das Makro der Prozessabwärme ist in Abbildung 101 mit der Nummer 4 gekennzeichnet. Die detaillierte Zusammensetzung der Abwärmenutzung im Zusammenhang mit der Prozesskältetechnik des Vollsorbitmenters wird in Abbildung 113 dargestellt.

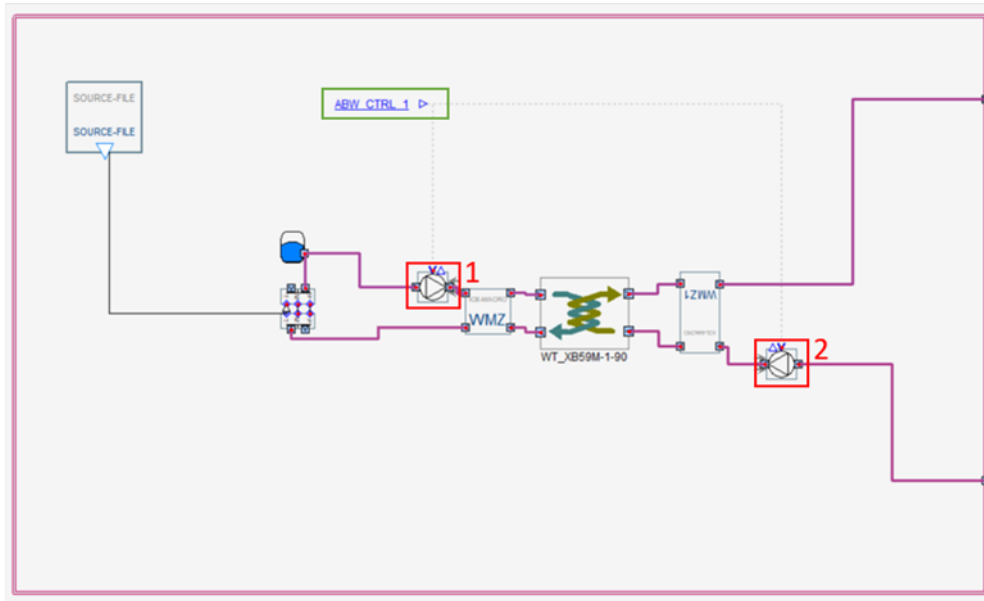


Abbildung 113 Abbildung der Prozessabwärme (Makro Prozessabwärme) mit Nummerierung der Pumpen (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zum Regelungsmakro (grün)

#### Pumpen:

Wie bei den bereits beschriebenen Makros wurden die Pumpen des Makros der Prozessabwärme mithilfe des Modells PUMPCIRC abgebildet. Die Parametrierung beschränkte sich dabei auf die Anpassung des Auslegungsdurchflusses, der in Tabelle 20 dokumentiert ist. Dies war der einzige Parameter, der bei der Modellierung der Pumpen modifiziert wurde. Die Werte entsprechen dem hydraulischen Schaltbild aus der Ausführungsplanung.

Tabelle 20 Parametrierung der Pumpen im Makro Prozessabwärme

| Nummerierung<br>(nach Abb. 32) | Bezeichnung | Pumpenmedium<br>(LIQTYPE) | Auslegungsdurch-<br>fluss (MFNOM) [kg/s] |
|--------------------------------|-------------|---------------------------|------------------------------------------|
| 1                              | PUMPCIRC    | Water                     | 71,83                                    |
| 2                              | PUMPCIRC1   | Water                     | 107,5                                    |

#### Einbindung des Temperaturdatensatzes der Prozessabwärme aus dem Vollsortimenter über ein SourceFile:

Die Einbindung der Prozessabwärme folgte einer ähnlichen Methodik wie die Modellierung des Erdkollektors im Makro der Erdwärmepumpen. Aufgrund der hohen Komplexität der physikalischen Abbildung der Prozesskältetechnik des Vollsortimenters in IDA ICE wurde stattdessen ebenfalls ein datenbasierter Ansatz gewählt. Hierbei wurde ein Temperaturdatensatz verwendet, der die Vorlauftemperaturen auf der Primärseite des Wärmetauschers über den Betriebszeitraum von einem Jahr erfasste. Dieser Datensatz wurde aus den Messdaten des Gebäudebetriebs generiert und für die Einbindung aufbereitet.

Der Prozess der Datenverarbeitung und Einbindung in das Modell entsprach dem Vorgehen bei der Erdwärmepumpe. Die Temperaturdaten wurden über einen Multiplexer (PMTMUX) in das Makro integriert. Diese Komponente gewährleistet eine numerisch stabile Simulation und eine konsistente Darstellung der Temperaturbedingungen auf der Primärseite. Die genaue Methodik zur Einbindung des Temperatursignals sowie die Struktur des Prozesses sind in Abbildung 30 dargestellt.

Durch diesen datenbasierten Ansatz konnte die korrekte Einbindung der Vorlauftemperaturen, die aus der Prozesskältetechnik des Vollsortimenters resultieren, in das Modell sichergestellt werden. Dies ermöglicht eine realistische Simulation der Abwärmenutzung, ohne die Rechenkomplexität durch physikalische Modelle zu erhöhen.

Wärmetauscher:

Für die Systemtrennung zwischen der Prozesskältetechnik des Vollsortimenters und dem Systemkreislauf des Gebäudes pulsG kam ein Wärmetauscher zum Einsatz, wie in Abbildung 20 dargestellt ist. Die Nachbildung dieses Wärmetauschers erfolgte in IDA ICE mithilfe des Modells „Brine to brine heat exchanger“, basierend auf einem ähnlichen Ansatz wie im Makro der Abluftwärmepumpe.

Die notwendigen Auslegungswerte, die die Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers bestimmen, wurden aus dem hydraulischen Wärmeschaltbild der Ausführungsplanung übernommen und in der Parametrierungs-Maske der Software hinterlegt. Diese Werte, die in Tabelle 21 dokumentiert sind, gewährleisten eine realitätsnahe Abbildung des Wärmetauschers innerhalb der Simulation.

Tabelle 21 Parametrierung des Wärmetauschers im Makro Prozessabwärme

| Parameter                         | Einheit | Wert  |
|-----------------------------------|---------|-------|
| <b>QRat</b>                       | [W]     | 75000 |
| <b>Eingangstemp. A (TAInRat)</b>  | [°C]    | 45    |
| <b>Ausgangstemp. A (TAOutRat)</b> | [°C]    | 38    |
| <b>Eingangstemp. B (TBInRat)</b>  | [°C]    | 35    |
| <b>Ausgangstemp. B (TBOuRat)</b>  | [°C]    | 42    |

### **Kälteerzeugung (Makro „Kälteversorgung“)**

Das Makro der Kälteerzeugung ist in Abbildung 100 detailliert dargestellt und in Abbildung 101 mit der Nummer 5 gekennzeichnet. Die Kälteerzeugung wurde ausschließlich für die Versorgung der Büro-Zonen des Gebäudemodells konzipiert und kommt in anderen Zonen des Gebäudemodells nicht zum Einsatz.

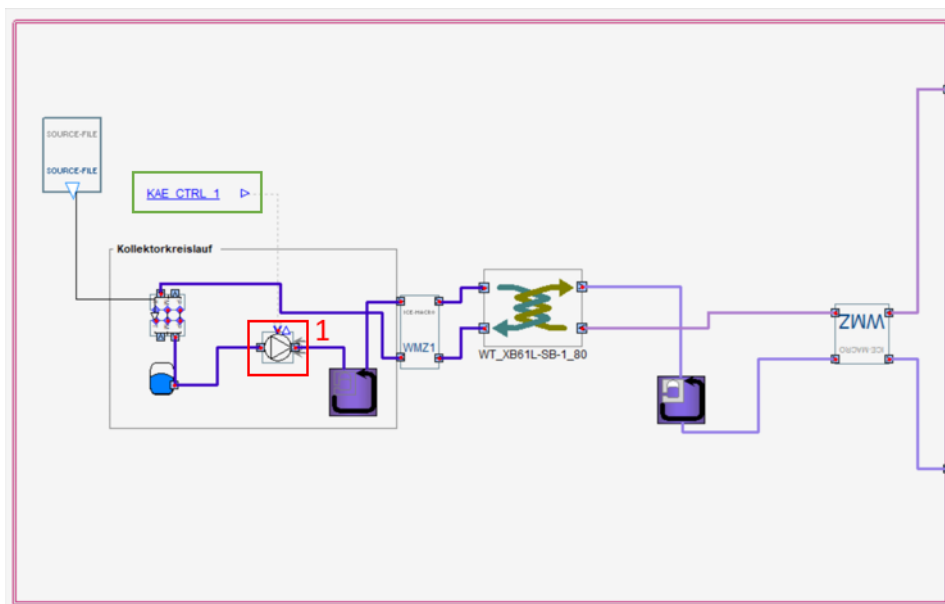


Abbildung 114 Schema der Kälteerzeugung (Makro Kälteerzeugung) mit Nummerierung der Pumpe (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zum Regelungsmakro (grün)

#### Pumpen:

Im gesamten Makro der Kälteerzeugung wurde nur eine Pumpe modelliert, die auf der Quelleseite des Wärmetauschers platziert ist. Diese Pumpe übernimmt die Aufgabe, Wasser zwischen dem Trenn-Wärmetauscher und dem Erdkollektor zu fördern, wodurch die freie Kühlung durch den Erdkollektor realisiert wird. Für die Modellierung der Pumpe wurde das PUMPCIRC-Modell aus der IDA ICE Bibliothek verwendet. Die Parametrierung der Pumpe beschränkte sich auf die Anpassung des Auslegungsdurchflusses, wobei der zugrunde liegende Wert aus der Ausführungsplanung sowie dem hydraulischen Schaltbild entnommen wurde. Alle relevanten Parameter dieser Pumpe sind in Tabelle 40 aufgeführt.

Tabelle 22 Parametrierung der Pumpe (PUMPCIRC) im Makro Kälteerzeugung

| Nummerierung<br>(nach Abb. 33) | Bezeichnung | Pumpenmedium<br>(LIQTYPE) | Auslegungsdurch-<br>fluss (MFNOM) [kg/s] |
|--------------------------------|-------------|---------------------------|------------------------------------------|
| 1                              | PUMPCIRC    | Water                     | 218,7                                    |

Auf der Sekundärseite des Wärmetauschers wurde keine Pumpe innerhalb des Makros modelliert. Stattdessen ist die Pumpe, die den Wasserkreislauf auf der Sekundärseite bedient, in der allgemeinen Ansicht der Anlagentechnik in der Software integriert. Diese Pumpe, die automatisch von IDA ICE hinzugefügt wurde, befindet sich kurz vor der Schnittstelle zum Gebäudemodell und ist in Abbildung 100 im unteren rechten Bereich sichtbar. Die Parametrierung dieser Pumpe wurde nicht verändert, da sie standardmäßig mit den erforderlichen Eigenschaften für die Simulation eingebunden wurde.

### **Einbindung des Temperaturdatensatzes der Kälteerzeugung aus dem Vollsortimenter über ein Source-File:**

Da die Kälteerzeugung im System von pulsG vollständig auf der freien Kühlung durch den Erdkollektor basiert, war es in diesem Zusammenhang wieder notwendig, eine geeignete Methodik für die Einbindung des Erdkollektors in IDA ICE zu finden. Diese Herausforderung wurde bereits im Makro der Erdwärmepumpen gelöst, und die dort angewandte datenbasierte Methodik konnte erfolgreich auf die Kälteversorgung übertragen werden. Die Einbindung der Temperaturdaten des Erdkollektors erfolgt über ein SourceFile-Objekt, das sich im oberen linken Bereich des Makros befindet. Dieses Objekt ermöglicht die Integration eines externen Datensatzes, der die Vorlauftemperaturen des Erdkollektors enthält.

Die Daten, die über das SourceFile-Objekt eingebunden werden, repräsentieren reale Messwerte und wurden speziell aufbereitet, um die Anforderungen der Simulation zu erfüllen. Die Temperaturwerte werden über einen Multiplexer (PMTMUX) in den Wasserkreislauf eingespeist, wodurch sichergestellt wird, dass die Simulation die thermischen Gegebenheiten des Erdkollektors präzise abbildet. Die Methodik und die Einbindungskomponenten entsprechen exakt dem Vorgehen, das bereits im Makro der Erdwärmepumpen erfolgreich angewandt und erläutert wurde.

#### *Speicher:*

Auf beiden Seiten des Wärmetauschers wurden einfache Speichermodelle (BrineTank und BrineTank1) integriert, wie in Abbildung 114 dargestellt. Diese Speicher wurden nicht zur Abbildung des realen Systems implementiert, sondern dienen ausschließlich der Stabilisierung der Simulation. Im Verlauf der Modellierung und in den anfänglichen Simulationsversuchen traten wiederholt numerische Fehler auf, die zum Abbruch der Simulation führten. Mithilfe der IDA ICE-Funktion „Show slowest model“, die das langsamste Teilmodell während des Simulationsprozesses markiert, konnte festgestellt werden, dass die Ursache der Instabilität im Makro der Kälteversorgung lag.

Die Probleme wurden auf die Temperatursprünge zurückgeführt, die durch die Quelldatei des Erdkollektors sowie das Wasser aus den Büro-Zonen auf den Wärmetauscher einwirkten. Diese abrupten Veränderungen führten zu numerischen Fehlern und einer Instabilität des Modells. Nach Rücksprache mit dem IDA ICE Support wurde entschieden, auf beiden Seiten des Wärmetauschers einfache Speichermodelle einzufügen, um das Wasservolumen zu erhöhen. Diese Maßnahme steigerte die thermische Trägheit des Systems und eliminierte die Instabilitäten vollständig.

Die Speichermodelle wurden auf ein Speichervolumen von 0,1 m<sup>3</sup> parametrisiert, wodurch die Simulation zuverlässiger und stabiler ausgeführt werden konnte. Die Integration dieser Speichermodelle ermöglichte es, die Temperatursprünge zu dämpfen und eine reibungslose Simulation des Kälteversorgungssystems zu gewährleisten.

#### *Wärmetauscher:*

Zur Systemtrennung zwischen dem Erdkollektor und dem Kältekreislauf des Gebäudes wurde ein Wärmetauscher verwendet. Dieser wurde in IDA ICE mithilfe des Modells „Brine to brine heat exchanger“ abgebildet. Die Parametrierung des Wärmetauschers erfolgte anhand der

Auslegungswerte, die aus dem hydraulischen Wärmeschaltbild der Ausführungsplanung entnommen wurden. Diese Parameter, die die Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers definieren, sind in Tabelle 23 dokumentiert.

Tabelle 23 Parametrierung des Wärmetauschers im Makro Kälteerzeugung

| Parameter                         | Einheit | Wert  |
|-----------------------------------|---------|-------|
| <b>QRat</b>                       | [W]     | 61000 |
| <b>Eingangstemp. A (TAInRat)</b>  | [°C]    | 14    |
| <b>Ausgangstemp. A (TAOutRat)</b> | [°C]    | 18    |
| <b>Eingangstemp. B (TBInRat)</b>  | [°C]    | 19    |
| <b>Ausgangstemp. B (TBOuRat)</b>  | [°C]    | 16    |

### Wärmespeicher

Die Modellierung des Wärmespeichers in der Simulation basiert grundsätzlich auf einer Anpassung des zentralen Wärmespeichersmodells, das standardmäßig bei der Erstellung einer Anlage im „Advanced Level“ in IDA ICE verwendet wird. Dieses Modell ist als Schichtenspeichermodell mit der Bezeichnung „TANKSTRAT“ (Hottank) bekannt und bildet die Grundlage für die Darstellung und Regelung der thermischen Speicherprozesse innerhalb der Simulation.

In der Simulationssoftware IDA ICE werden die Speicher, die im Hydraulikschema der Ausführungsplanung (vgl. Abbildung 102) als seriell verschaltete Einheiten dargestellt sind, nicht direkt als separate serielle Speicher modelliert. Stattdessen wird aus Stabilitätsgründen ein einzelner Schichtenspeicher mit einem Gesamtspeichervolumen von 10 m<sup>3</sup> angenommen. Diese Vereinfachung ist notwendig, da das in IDA ICE implementierte Speichermodell TANKSTRAT die Zuordnung der verschiedenen Ein- und Austrittspunkte bei mehreren separaten Speichern nicht korrekt umsetzen kann. Das Modell erfordert, dass die Anzahl der Ein- und Austrittspunkte immer paarweise übereinstimmt, was bei der Modellierung von vier seriell verschalteten Pufferspeichern in ihrer realen Form nicht gewährleistet werden kann.

In der realen Anlagentechnik von pulsG werden die Vor- und Rückläufe aus den unterschiedlichen Speichern so ausgelegt, dass sie spezifische Rücklauftemperaturen für die verschiedenen Wärmeerzeuger bereitstellen. Diese Rücklauftemperaturen sind essenziell, um die Effizienz der einzelnen Wärmeerzeuger, wie beispielsweise Wärmepumpen oder anderer Systeme, zu optimieren. Aufgrund der Einschränkungen des TANKSTRAT-Modells ist jedoch eine Vereinfachung in IDA ICE erforderlich, um die Stabilität der Simulation sicherzustellen und eine korrekte Lösung der Massenbilanz des Modells zu ermöglichen.

Die vereinfachte Darstellung der vier Pufferspeicher erfolgt, indem diese im Simulationsmodell als ein einzelnes Speichervolumen dargestellt werden. Anstatt die Speicher nebeneinander und seriell verschaltet zu modellieren, werden sie in der Simulation als „übereinanderliegende“ Schichten eines Schichtenspeichers abgebildet. Dies wird durch die Konfiguration der Schichtenanzahl im TANKSTRAT-Modell realisiert. Mit dieser Methode können die gewünschten Ein-

und Austrittspunkte der Vor- und Rückläufe der Wärmeerzeuger präzise in das Speichervolumen nach den jeweiligen Schichten integriert werden. Die genaue Zuordnung der Inlet-Outlet Streams stellt sicher, dass die Vor- und Rückläufe an den gewünschten Positionen in das simulierte Speichervolumen eingespeist werden, wodurch die Funktionalität des hydraulischen Systems im Simulationsmodell erhalten bleibt.

Die angesprochene Vereinfachung des Speichersmodells sowie die spezifische Anordnung der Ein- und Austrittspaare der jeweiligen Vor- und Rückläufe sind in Abbildung 111 und Abbildung 112 detailliert dargestellt. Diese Abbildungen zeigen, wie das vereinfachte Modell die realen hydraulischen Verhältnisse der Anlage abstrahiert, ohne die wesentlichen funktionalen Anforderungen zu beeinträchtigen.

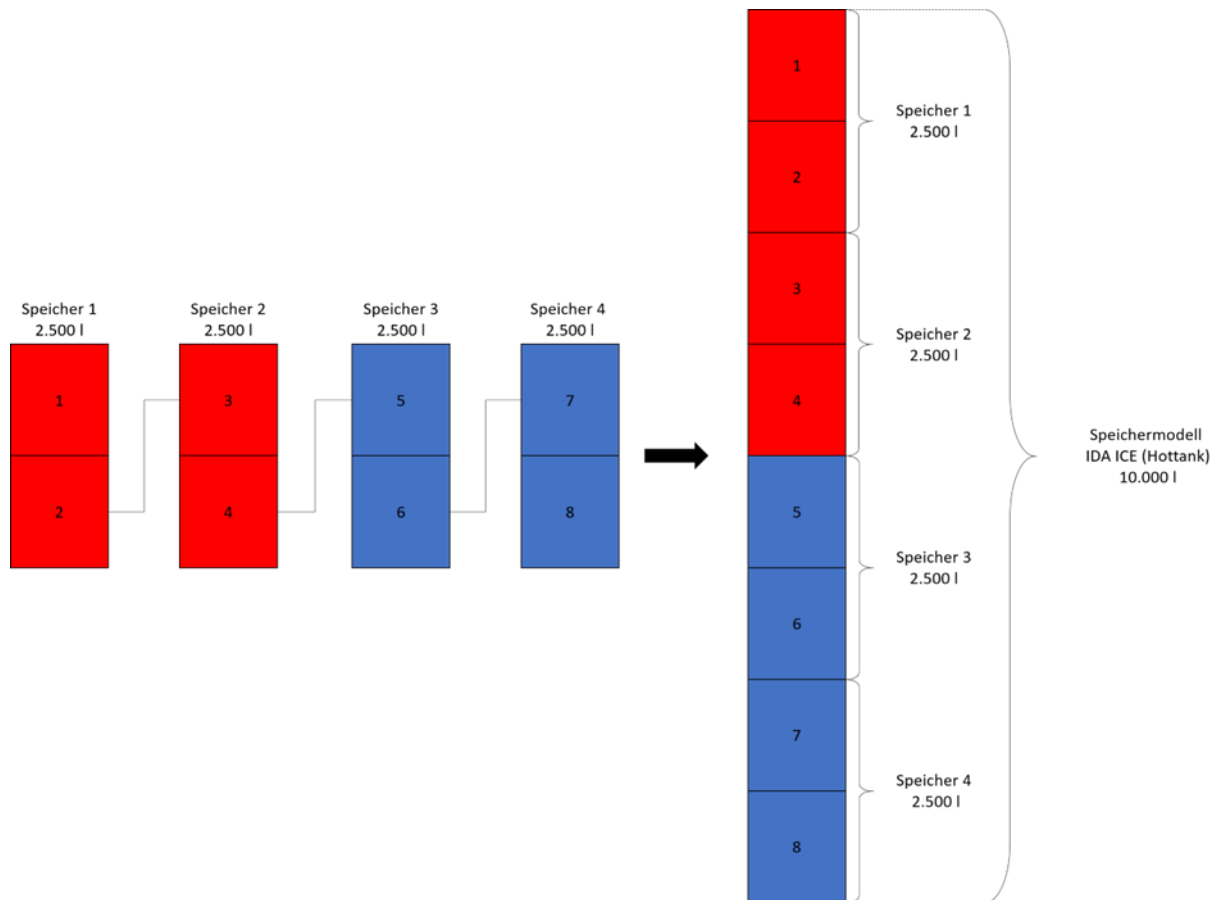


Abbildung 115 Anpassung der seriellen Speicher zu einem Speichermodell

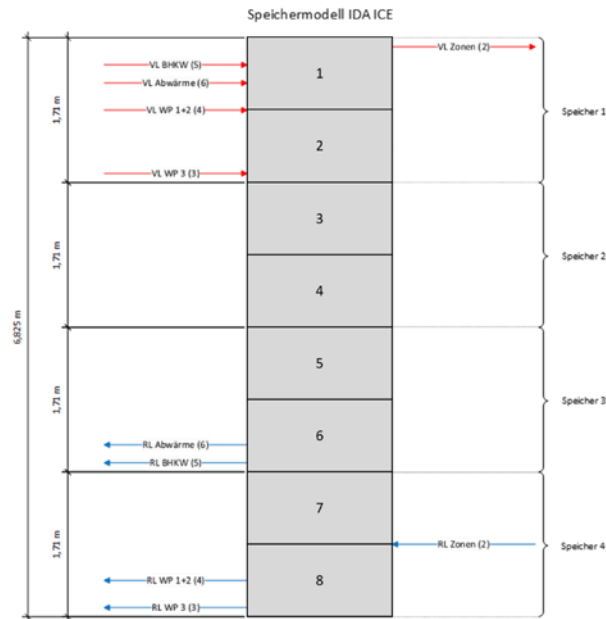


Abbildung 116 Darstellung des Speichermodells mit In- und Outletstreams

Die weiteren Parametrierungen bezüglich der geometrischen Abmessungen des zentralen Speichermodells (Hottank) sind aus Tabelle 24 ersichtlich.

Tabelle 24 Parameter des zentralen Speichermodells (Hottank)

| Bezeichnung | Speichervolumen (VTank) [m³] | Formfaktor (Shape Factor) | Innenradius (Rtank) [m] | Höhe (hTank) [m] | Anzahl der Schichten (nLayer) |
|-------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|
| Hottank     | 10                           | 5,00                      | 0,683                   | 6,825            | 8                             |

### 1.2.3.6 Regelung der einzelnen Komponenten

In diesem Abschnitt wird die Regelung der einzelnen Erzeuger-Makros erläutert. Grundsätzlich ist zu beachten, dass in IDA ICE alle Variablen, Parameter und Schnittstellen von Teilmodellen sowie Variablen aus den Zonenmodellen als Links in andere Makros eingebunden werden können. Diese Flexibilität ermöglicht es, wie in der vorliegenden Modellierung umgesetzt, jede Variable des Anlagenmodells als Eingangssignal für einen Regelungsalgorithmus zu nutzen.

Für die Regelung der einzelnen Erzeuger-Makros und deren regelbaren Komponenten wurde jeweils ein eigenständiges Makro erstellt. Diese Makros generieren die benötigten Eingangssignale für die zugehörigen Teilmodelle, die bereits näher dargestellt wurden, wie beispielsweise Pumpen, Wärmepumpen oder Blockheizkraftwerke (BHKWs). Die erzeugten Eingangssignale werden über Links, die im Rahmen des Modellierungsprozesses eindeutig benannt wurden, mit den entsprechenden Komponenten innerhalb der Erzeuger-Makros verbunden. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine klare Zuordnung der Regelungssignale und erleichtert die Orientierung innerhalb des Modellierungsprozesses und innerhalb des Modells an sich.

Die in diesem Zusammenhang erstellten Regelungsmakros, die die Steuerung der Erzeuger-Makros übernehmen, sind in Abbildung 117 dargestellt.

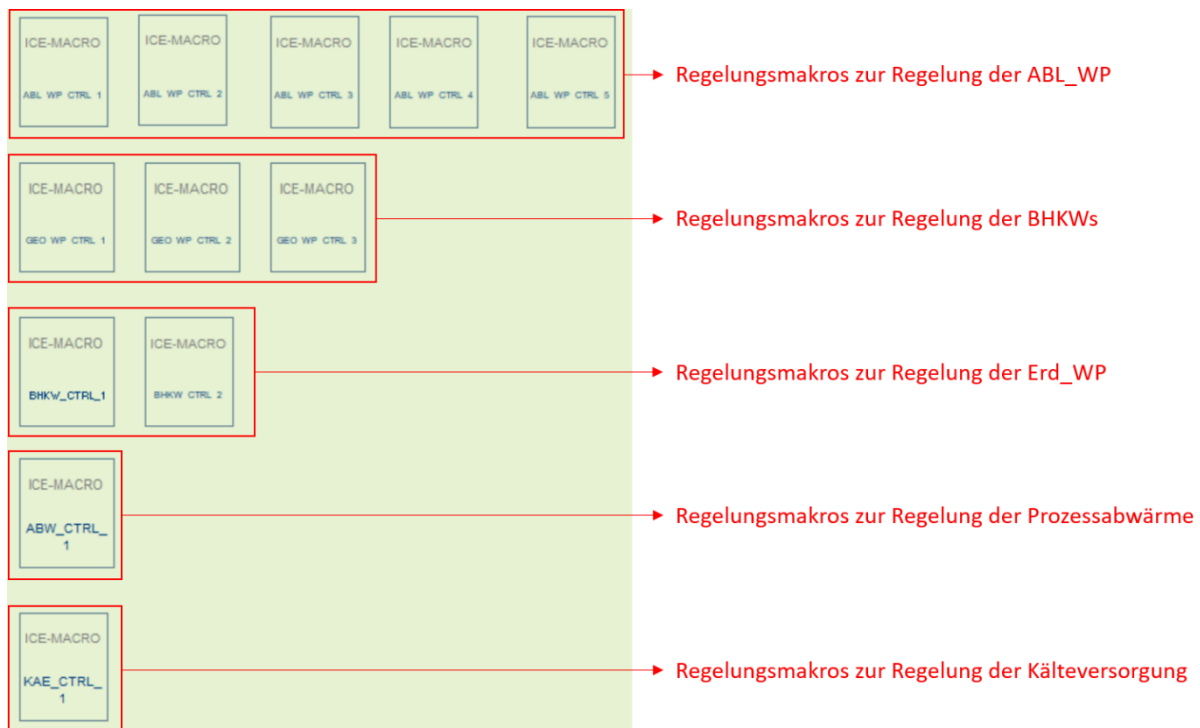


Abbildung 117 Erklärung der Struktur der Makros zur Regelung der Erzeugerkomponenten

Es ist zudem anzumerken, dass einige Gleichungsobjekte bzw. Teilmodelle, die im Rahmen der Regelungsalgorithmen eingesetzt wurden, aus Gründen der Stabilität der Simulation zweckentfremdet wurden. Dies betrifft insbesondere Proportionalregler, die primär als logische Schalter innerhalb der Regelungsmakros verwendet wurden.

## Regelung der Abluftwärmepumpe

Die Regelung der Abluftwärmepumpe (Makro ABL\_WP) unterteilt sich in fünf Regelungsmakros, die in Abbildung 102 an oberster Stelle ersichtlich sind.

### *ABL\_WP\_CTRL\_1 – Regelung Pumpe 1 (PUMPCIRC)*

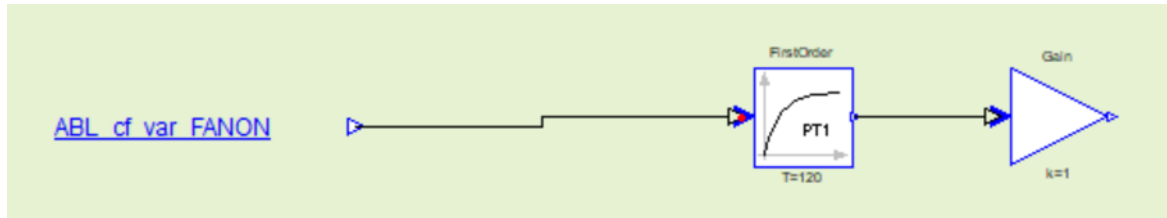


Abbildung 118 Makro ABL\_WP\_CTRL\_1

Das erste Regelungsmakro, das im Zusammenhang mit der Abluftwärmepumpe steht, bezieht sich auf die Regelung von Pumpe 1 (siehe Tabelle 15 und Abbildung 106). Auf der linken Seite der Abbildung ist in blauer Farbe ein Link zum Ventilator der Abluftanlage erkennbar. Dieser Link repräsentiert die Variable „FANON“, welche den Betriebszustand des Ventilators anzeigt. Die Variable nimmt die Werte 0 oder 1 an, abhängig davon, ob der Ventilator inaktiv oder aktiv ist.

Das Regelungssignal dieser Variable wird zunächst an ein „FirstOrder“-Gleichungsmodell weitergeleitet, bei dem es sich um ein PT1-Glied handelt. Dieses Glied modelliert ein Systemverhalten erster Ordnung mit einer parametrisierten Zeitkonstanten von 120 Sekunden. Dies bedeutet, dass das Signal des Ventilator-Links verzögert weitergegeben wird, sodass es nach einer exponentiellen Annäherung erst nach Ablauf der definierten Zeitkonstante seinen ursprünglichen Wert erreicht. Die Einführung dieses PT1-Glieds dient primär der Stabilität der Simulation. In vielen Modellen von IDA ICE kann die direkte Weitergabe eines Regelungssignals oder ein plötzlicher Signalwechsel von 0 auf 1 zu numerischen Instabilitäten führen, weshalb diese Methodik bevorzugt wird.

Nach der Verarbeitung im PT1-Glied wird das Regelungssignal an ein „Gain“-Objekt weitergeleitet. Obwohl das Gain-Objekt keine Veränderung des Signals bewirkt, stellt es eine übliche Praxis in der Modellierung von Regelungsalgorithmen in IDA ICE dar. Das Gain-Objekt ermöglicht es, das Regelungssignal über die Variable „y“ abzugreifen und mit der durch den Regelungsalgorithmus zu regelnden Komponente zu verknüpfen. In diesem Modell wurde dies analog umgesetzt, indem das Signal mit der zu steuernden Komponente verbunden wurde. Im Makro der Abluftwärmepumpe (ABL\_WP) ist dieser Link klar sichtbar und trägt den Namen des zugehörigen Regelungsmakros (in diesem Fall ABL\_WP\_CTRL\_1).

Die beschriebene Regelungsstrategie steuert gezielt Pumpe 1 der Abluftwärmepumpe. Ziel des Regelungsalgorithmus ist es, die Pumpe – die im Betriebsmodus Glykol zum Wärmerückgewinnungsregister (WRG-Register) der Abluftanlage fördert – ausschließlich dann einzuschalten, wenn die Abluftanlage aktiv ist. Dadurch wird sichergestellt, dass der 700-Liter-Pufferspeicher während des Betriebs der Abluftanlage beladen wird. Dieses Vorgehen entspricht im Wesentlichen dem aktuell implementierten und in Betrieb befindlichen Regelungskonzept.

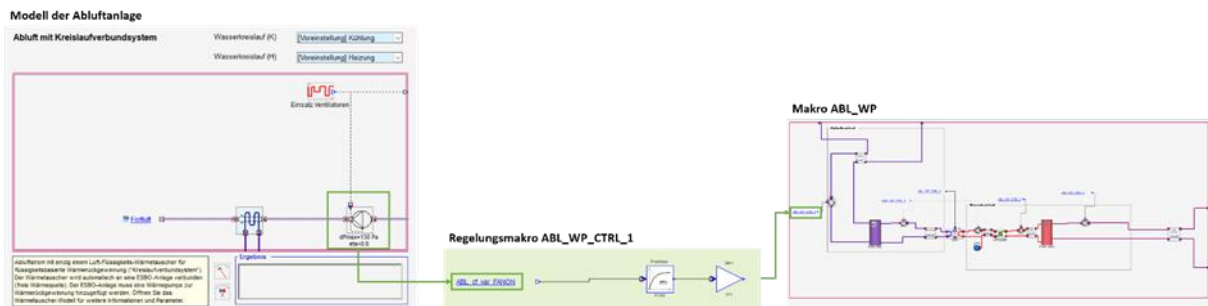


Abbildung 119 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungsmakros ABL\_WP\_CTRL\_1 (in grün markiert)

### ABL\_WP\_CTRL\_2 – Regelung Pumpe 2 und 3 (PUMPCIRC1, PUMPCIRC2)

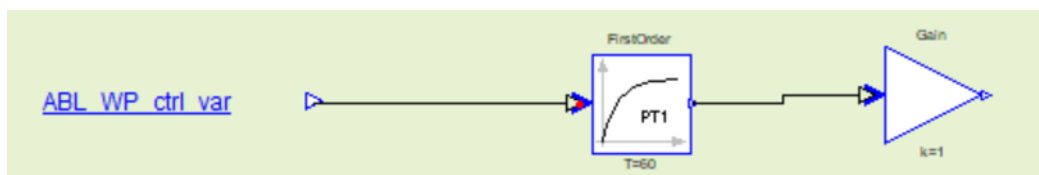


Abbildung 120 Makro ABL\_WP\_CTRL\_2

Das zweite Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe ist für die Steuerung von Pumpe 2 und Pumpe 3 zuständig (siehe Tabelle 15 und Abbildung 106). In seinem grundsätzlichen Aufbau ähnelt es dem bereits erläuterten Regelungsmakro „ABL\_WP\_CTRL\_1“.

Die wesentlichen Unterschiede zum ersten Makro betreffen die verknüpfte Regelungsvariable sowie die Zeitkonstante des „FirstOrder“-Objekts (PT1-Glied). Die Steuerung von Pumpe 2 und Pumpe 3 erfolgt hier basierend auf dem Betriebszustand der Wärmepumpe, welcher durch das Modell „B2b\_Hp\_model“ (WP3) beschrieben wird. Auf der linken Seite des Algorithmus ist in blauer Farbe die Regelungsschnittstelle der Wärmepumpe („ctrl“) eingebunden. Diese Schnittstelle gibt den Betriebszustand der Wärmepumpe durch ein Signal im Bereich von 0 bis 1 wieder, wobei 0 den inaktiven Zustand und 1 den aktiven Zustand repräsentiert.

Analog zum Makro „ABL\_WP\_CTRL\_1“ wird dieses Signal anschließend an ein „FirstOrder“-Objekt weitergeleitet, das ein PT1-Glied repräsentiert. Für die vorliegende Anwendung ist die Zeitkonstante auf 60 Sekunden eingestellt. Diese Parametrierung gewährleistet, dass Pumpe 2 und Pumpe 3 bereits leicht verzögert vor der Wärmepumpe in Betrieb genommen werden. Dadurch wird sichergestellt, dass sich der für eine stabile Simulation notwendige Volumenstrom im Wärmepumpenmodell rechtzeitig einstellt.

Zusammenfassend ermöglicht dieses Makro die regelungstechnische Steuerung von Pumpe 2 und Pumpe 3 der Abluftwärmepumpe in Abhängigkeit vom Betriebszustand der Wärmepumpe.

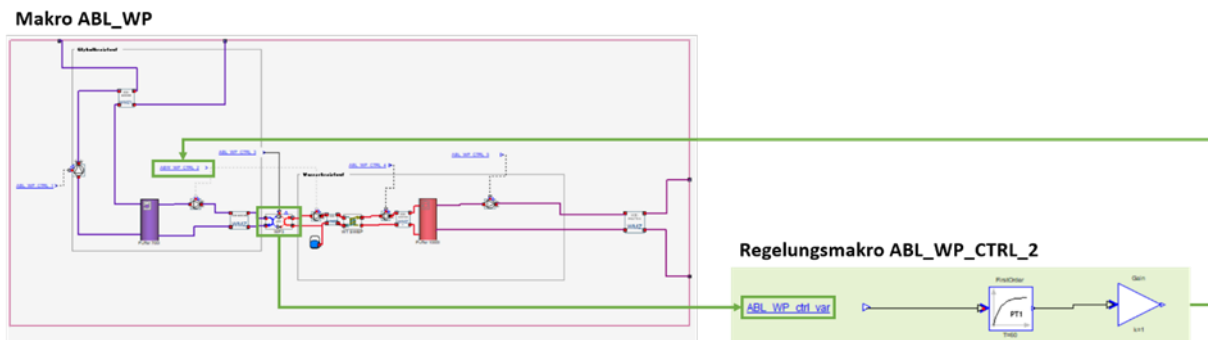


Abbildung 121 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungs makros ABL\_WP\_CTRL\_2 (in grün markiert)

### ABL\_WP\_CTRL\_3 – Regelung der Wärmepumpe (WP3, B2b\_Hp\_model)

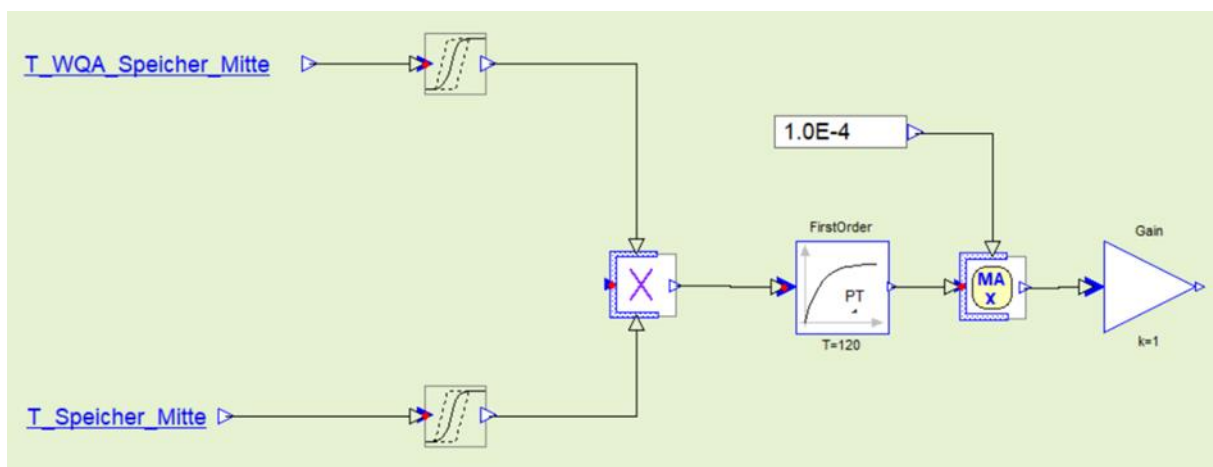


Abbildung 122 Makro ABL\_WP\_CTRL\_3

Das dritte Regelungs makro der Abluftwärmepumpe dient der Steuerung der Wärmepumpe selbst.

Der Betrieb der Wärmepumpe wird dabei maßgeblich durch die Ladestände zweier Wärmespeicher gesteuert, die im Regelungs makro ABL\_WP integriert sind. Dabei handelt es sich um die Wärmespeicher mit den Bezeichnungen „Puffer 700l“ (Quellenspeicher) und „Puffer 1000l“ (Sekundärspeicher). Der Ladestand eines jeden Speichers wird in diesem Kontext über die Temperatur in der mittleren Schicht des jeweiligen Speichermodells erfasst. Im verwendeten Modell repräsentiert die mittlere Schicht durch die verwendete Schichtanzahl im TANKSTRAT-Modell die Schicht 4 (TLayer[4]).

Zur Umsetzung der Regelung wurde die Temperaturvariable der vierten Speicherschicht direkt in das Regelungs makro eingebunden. Diese Einbindung erfolgt über zwei Verknüpfungen, die in Abbildung 29 auf der linken Seite dargestellt sind. Die obere Verknüpfung repräsentiert hierbei die Temperaturvariable der Schicht 4 des Quellenspeichers (Puffer 700l), während die untere Verknüpfung die Temperaturvariable der Schicht 4 des Sekundärseitenspeichers (Puffer 1000l) abbildet.

Beide Temperaturwerte werden anschließend in separate Proportionalregler (PSMOOTH) eingespeist. Diese Regler sind so parametrierung, dass sie als logische Schalter fungieren. In diesem Zusammenhang bedeutet dies, dass der Regler ein Ausgangssignal von 1 erzeugt, sobald die erfasste Temperatur einen definierten Schwellenwert über- beziehungsweise unterschreitet. Diese Funktionalität ermöglicht die Regelung der Wärmepumpe basierend auf den aktuellen Zuständen der beiden Speicher.

Die genauen Parameter, welche die Funktionalität der Proportionalregler bestimmen, sind in Tabelle 25 aufgeführt. Diese Tabelle bietet eine Übersicht der eingestellten Schwellenwerte sowie weiterer relevanter Einstellungen, die die Regelcharakteristik der PSMOOTH-Komponenten definieren.

Tabelle 25 Parametrierung der Proportionalregler im Makro ABL\_WP\_CTRL\_3

|                          | <b>HI</b> | <b>LO</b> | <b>HILIMIT</b> | <b>LOLIMIT</b> |
|--------------------------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| <b>PSMOOTH (&lt;12)</b>  | 12,1      | 12,0      | 1              | 0              |
| <b>PSMOOTH1 (&gt;40)</b> | 40,1      | 40,0      | 0              | 1              |

In sind die Grenztemperaturen aufgeführt, bei deren Überschreiten oder Unterschreiten der Proportionalregler ein Signal weitergibt. Konkret wird eine Freigabe für die Wärmepumpe erteilt, wenn in der vierten Schicht des Quellenspeichers eine Temperatur von 12,1 °C überschritten wird (HILIMIT=1). Im Gegensatz dazu erfolgt die Freigabe im Sekundärspeicher bei einer Unterschreitung der Temperatur von 40,0 °C in der vierten Schicht.

Die beiden resultierenden Signale der Proportionalregler werden an ein MULTIPLIER-Objekt weitergeleitet. Dieses Objekt multipliziert die beiden Eingangssignale miteinander, was bedeutet, dass die Wärmepumpe nur dann betrieben werden kann, wenn beide Proportionalregler ein Signal von 1 ausgeben. Somit stellt das MULTIPLIER-Objekt sicher, dass der Betrieb der Wärmepumpe nur dann freigegeben wird, wenn die Bedingungen für beide Speicher gleichzeitig erfüllt sind.

Nach dem MULTIPLIER-Objekt folgt ein FirstOrder-Objekt (PT1-Glied), das die bereits in den vorherigen Regelungsmakros erläuterte Funktion erfüllt. Dieses PT1-Glied glättet das Ausgangssignal, um plötzliche Änderungen zu dämpfen und so eine stabile Regelung zu gewährleisten.

Anschließend wird das geglättete Signal an ein MINMAXD-Objekt übergeben. Dieses Objekt vergleicht zwei Eingangssignale und gibt den jeweils größeren Wert als Ausgangssignal weiter. Wie in Abbildung 29 dargestellt, erhält das MINMAXD-Objekt ein Eingangssignal von einer konstanten Größe, nämlich 0,0001 (entsprechend der wissenschaftlichen Schreibweise 1,0e-4), sowie das Ausgangssignal des PT1-Glieds. Im Verlauf der Simulation wird so stets der größere der beiden Werte als Eingangsregelgröße für die Wärmepumpe weitergegeben.

Die Parametrierung des MINMAXD-Objekts mit der genannten Konstanten hat eine entscheidende Funktion. Aus Stabilitätsgründen für das Wärmepumpenmodell in IDA ICE (B2b\_Hp\_modell) ist es vorteilhaft, wenn am Regelungseingang des Wärmepumpenmodells

dauerhaft ein niedriger Minimalwert anliegt. Dies verhindert potenzielle Instabilitäten oder unerwünschte Regelabweichungen, die andernfalls auftreten könnten, wenn die Eingangsregelgröße auf 0 absinken würde und ein sprunghafter Anstieg der Eingangsregelgröße auf 1 vorliegt. Auf diese Weise wird die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit des Wärmepumpenmodells im Zuge der Simulation gewährleistet.

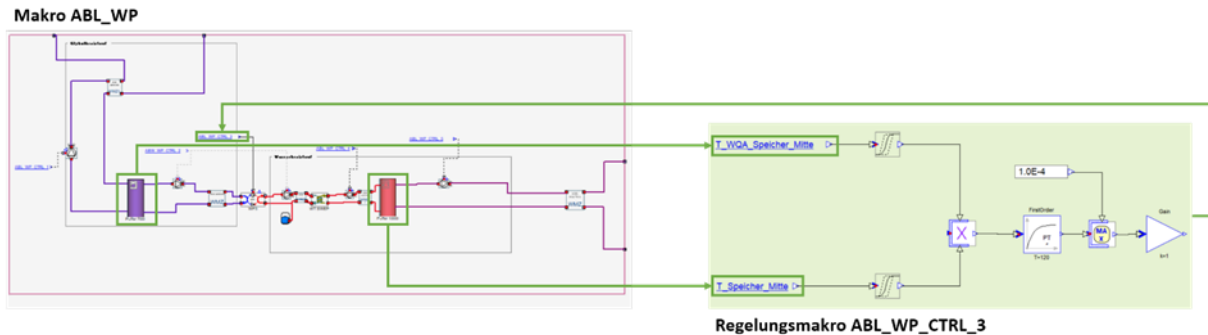


Abbildung 123 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungs makros ABL\_WP\_CTRL\_3 (in grün markiert)

#### ABL\_WP\_CTRL\_4 – Regelung Pumpe 4 (PUMPCIRC3)

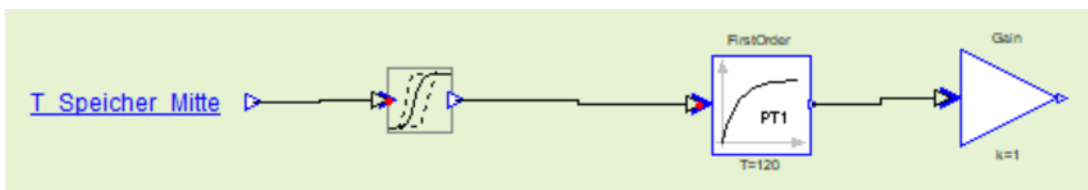


Abbildung 124 Makro ABL\_WP\_CTRL\_4

Das vierte Regelungs makro der Abluftwärmepumpe ist für die Steuerung von Pumpe 4 (siehe Tabelle 15 und Abbildung 106) zuständig.

Der grundlegende Regelungsansatz ähnelt dem des dritten Regelungs makros (ABL\_WP\_CTRL\_3), das der Steuerung der Wärmepumpe dient. Auch hier basiert die Regelung auf einer Temperaturüberwachung des Sekundärspeichers (Pufferspeicher mit 1000 l Volumen). Die Steuerung erfolgt über die Messung der Temperatur in der vierten Schicht des Speichermodells (TLayer[4]), die im Regelungs makro durch den Link T\_Speicher\_Mitte repräsentiert wird.

Die Freigabe zur Aktivierung von Pumpe 4, die sich unmittelbar rechts des Wärmetauschers befindet, wird erteilt, wenn die Temperatur in der vierten Schicht des Sekundärspeichers unter 40 °C sinkt. Der Proportionalregler, der diese Freigabebedingung umsetzt, ist so parametrisiert, dass er ein Regelungssignal von 1 erzeugt, sobald die Temperatur den definierten Schwellenwert unterschreitet. Diese Parametrierung ist in Tabelle 26 detailliert aufgeführt.

Das Regelungs makro sorgt somit dafür, dass Pumpe 4 ausschließlich dann betrieben wird, wenn die Temperaturbedingungen im Sekundärspeicher eine Aktivierung erforderlich machen. Dies trägt zur Effizienz und Stabilität des Gesamtsystems bei, indem unnötiger Betrieb der Pumpe vermieden wird und eine präzise Anpassung an die thermischen Gegebenheiten gewährleistet wird.

Tabelle 26 Parametrierung des Proportionalreglers in Makro ABL\_WP\_CTRL\_4

|                | HI   | LO   | HILIMIT | LOLIMIT |
|----------------|------|------|---------|---------|
| <b>PSMOOTH</b> | 40,0 | 39,9 | 1       | 0       |

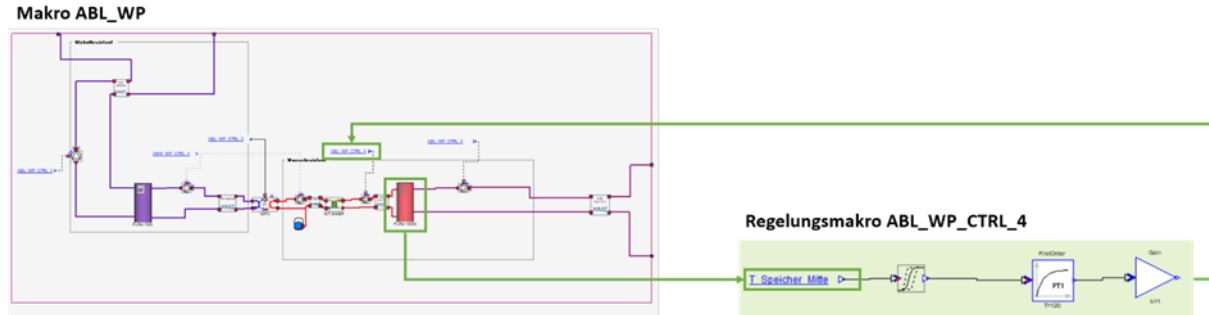


Abbildung 125 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungsmakros ABL\_WP\_CTRL\_4 (in grün markiert)

#### ABL\_WP\_CTRL\_5 – Regelung Pumpe 5 (PUMPCIRC4)

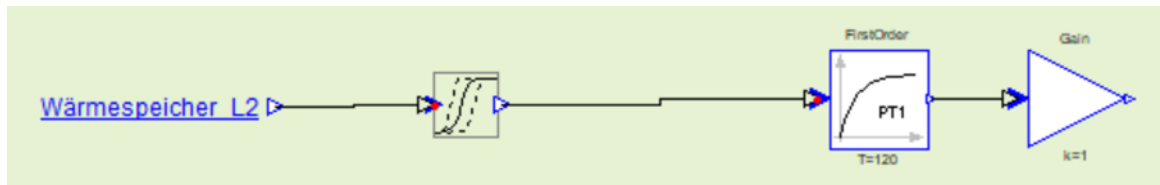


Abbildung 126 Makro ABL\_WP\_CTRL\_5

Das fünfte und letzte Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe steuert den Betrieb von Pumpe 5 (siehe Tabelle 15 und Abbildung 106).

Der Aufbau dieses Regelungsmakros folgt dem gleichen Regelungsalgorithmus wie im vorherigen Makro (ABL\_WP\_CTRL\_4). Allerdings unterscheidet es sich durch die geänderte Verknüpfung der relevanten Temperaturvariable und die angepasste Parametrierung des Proportionalreglers. Während im vierten Makro die Regelung auf die Temperatur im Sekundärspeicher bezogen war, wird die Regelung von Pumpe 5 durch die Temperatur des zentralen Wärmespeichers gesteuert. Dieser Speicher dient als Sammelpunkt, in den alle Wärmeerzeuger des Systems einspeisen.

Für die Steuerung wird die Temperatur in der zweiten Schicht des zentralen Speichers (Hottank; Variable TLayer[2]) verwendet, da dieser Speicher lediglich in vier Schichten unterteilt ist. Die Pumpe erhält eine Freigabe, sobald die Temperatur in der zweiten Schicht des zentralen Wärmespeichers unter 35 °C fällt. Der entsprechende Proportionalregler wurde so parametrierung, dass er in diesem Fall ein Regulationssignal von 1 ausgibt. Die spezifischen Parameter des Proportionalreglers sind in Tabelle 27 dokumentiert.

Dieses Regelungsmakro gewährleistet, dass Pumpe 5 nur dann in Betrieb genommen wird, wenn die thermischen Bedingungen im zentralen Speicher dies erfordern. Auf diese Weise

wird ein effizienter Betrieb des Systems sichergestellt, indem die Nutzung der Pumpe an den aktuellen Wärmestand des zentralen Speichers angepasst wird.

Tabelle 27 Parametrierung des Proportionalreglers in Makro ABL\_WP\_CTRL\_5

|                | HI   | LO   | HILIMIT | LOLIMIT |
|----------------|------|------|---------|---------|
| <b>PSMOOTH</b> | 35,0 | 34,9 | 1       | 0       |

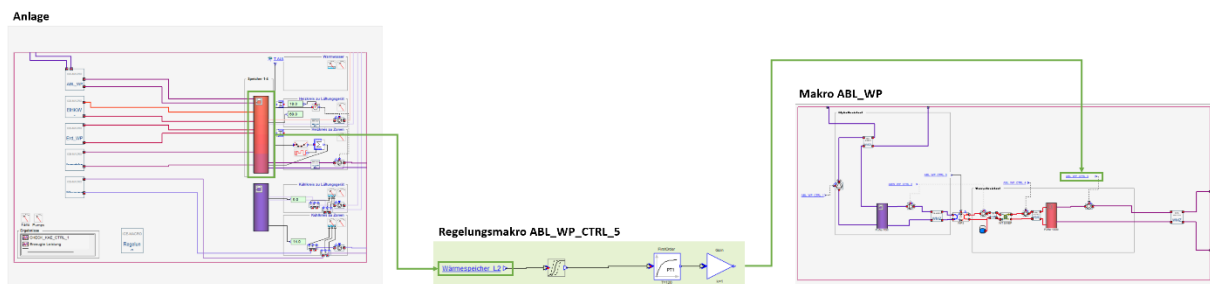


Abbildung 127 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungs makros ABL\_WP\_CTRL\_5 (in grün markiert)

### 1.2.3.7 Regelung der Blockheizkraftwerke

Die Regelung der Blockheizkraftwerke (Makro BHKWs) unterteilt sich in zwei Regelungs makros, die in an dritter Stelle von oben ersichtlich sind.

*BHKW\_CTRL\_1 – Regelung des BHKW-Modells (BHKW1, BHKW2)*

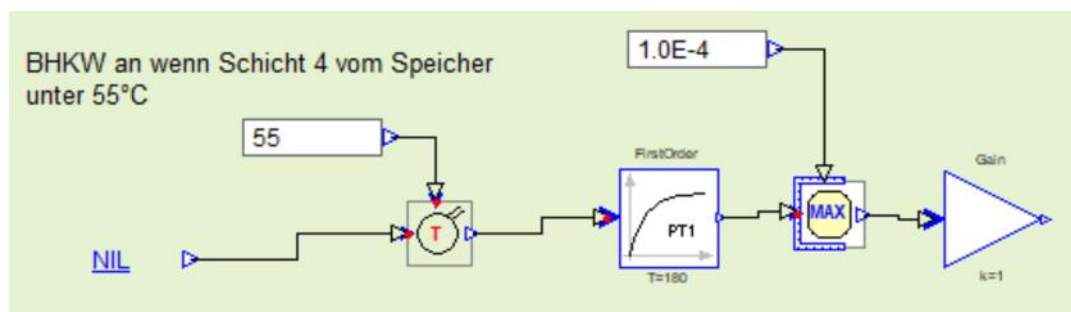


Abbildung 128 Makro BHKW\_CTRL\_1

Das erste Regelungs makro der Blockheizkraftwerke (BHKWs) ist für die Steuerung der BHKW-Modelle selbst verantwortlich. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Komponenten dieses Makros ist in Abbildung 128 zu finden.

Analog zur Regelung der Abluftwärmepumpe wird auch hier der Betriebszustand der BHKWs auf Basis des Ladestands des zentralen Wärmespeichers (Hottank) gesteuert. Zu diesem Zweck wurde im Makro ein Link zur Temperaturvariable der mittleren Speicherschicht des zentralen Wärmespeichers eingebunden. Diese mittlere Speicherschicht entspricht Schicht 4 (TLayer[4]). In Abbildung 128 ist dieser Link im unteren linken Bereich zu sehen. Es sei jedoch angemerkt, dass die Beschriftung des Links inkonsistent umgesetzt wurde; in diesem Fall ist er mit „NIL“ bezeichnet.

Das Temperatursignal aus Schicht 4 des Wärmespeichers dient als Eingangssignal für ein Thermostat-Objekt (THERMOST). Als Sollwert für den Thermostat wurde eine Konstante von 55 °C definiert. Zusätzlich wurde ein Totband von 10 Kelvin parametrisiert, wodurch sich eine obere Grenztemperatur von 65 °C und eine untere Grenztemperatur von 45 °C ergibt. Das Thermostat vergleicht kontinuierlich die Temperatur des Wärmespeichers mit diesen Schwellwerten. Es gibt ein Regelsignal von 1 aus, wenn die Temperatur des Wärmespeichers unter 45 °C fällt. Dieses Signal bleibt aktiv, bis die Temperatur den oberen Grenzwert von 65 °C erreicht. Diese Regelstrategie mit Totband verhindert übermäßiges Takten der BHKWs, wodurch die Laufzeit der Anlagen stabilisiert und die Betriebseffizienz erhöht wird.

Die nachfolgenden Objekte im Regelungsmakro entsprechen den in der Regelung der Abluftwärmepumpe beschriebenen Komponenten. Zunächst wird das Regelsignal an ein FirstOrder-Objekt (PT1-Glied) weitergeleitet, das die Funktion hat, das Signal zu glätten und plötzliche Änderungen zu dämpfen. Anschließend sorgt ein MINMAXD-Objekt dafür, dass das Regelsignal aus Stabilitätsgründen der Simulation niemals auf 0 absinken kann. Diese Maßnahme ist besonders wichtig, um Instabilitäten im Simulationsmodell zu vermeiden und den kontinuierlichen Betrieb der Regelung sicherzustellen.

Insgesamt ermöglicht dieses Regelungsmakro eine robuste Steuerung der BHKWs, indem es den Betrieb an den thermischen Zustand des zentralen Wärmespeichers anpasst.

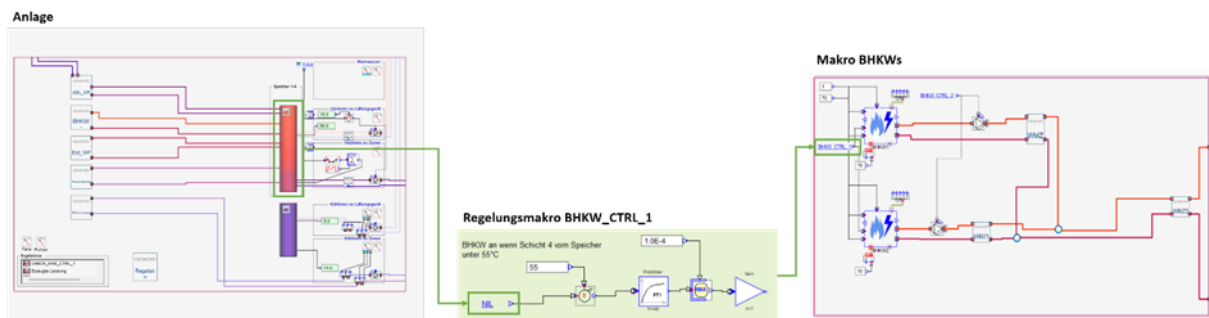


Abbildung 129 Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros BHKW\_CTRL\_1 (in grün markiert)

#### BHKW\_CTRL\_2 – Regelung der Pumpen (PUMPCIRC, PUMPCIRC1)

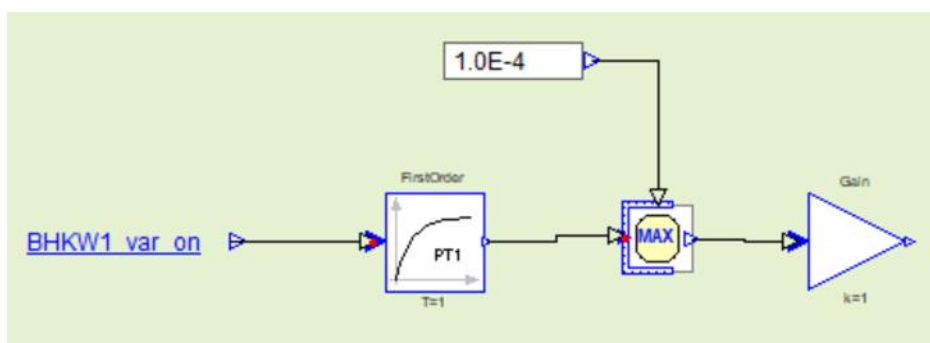


Abbildung 130 Makro BHKW\_CTRL\_2

Das zweite Regelungsmakro der Blockheizkraftwerke (BHKWs) ist für die Steuerung der Pumpen 1 und 2 innerhalb des BHKW-Makros verantwortlich. Die detaillierte Darstellung der Bestandteile dieses Regelungsmakros ist in Abbildung 130 zu finden.

Die Regelungsstrategie für die Pumpen ist eng mit dem Betriebszustand der BHKWs verknüpft. Im Allgemeinen werden die Pumpen aktiviert, sobald die BHKWs in Betrieb ist. Diese Verknüpfung wurde durch die Integration des Betriebszustands eines BHKWs realisiert. Konkret erfolgt dies über den Link zur „on“-Variable von BHKW1, die den Status des ersten Blockheizkraftwerks widerspiegelt.

Da der Betriebszustand beider BHKWs durch den gleichen Regelungsalgorithmus gesteuert wird, reicht es aus, den Status eines einzigen BHKWs als Eingangssignal für die Regelung der Pumpen zu verwenden. Dies vereinfacht die Regelstruktur, ohne die Funktionalität zu beeinträchtigen, da die Pumpen ohnehin nur dann betrieben werden, wenn die BHKWs aktiv sind.

Das Ausgangssignal aus der „on“-Variable wird, wie in den vorherigen Regelungsmakros beschrieben, zunächst an ein FirstOrder-Objekt (PT1-Glied) und danach an ein MINMAXD-Objekt weitergegeben. Diese Maßnahme verhindert, wie bereits beschrieben, instabile Zustände im Simulationsmodell und gewährleistet den kontinuierlichen Betrieb der Regelung.

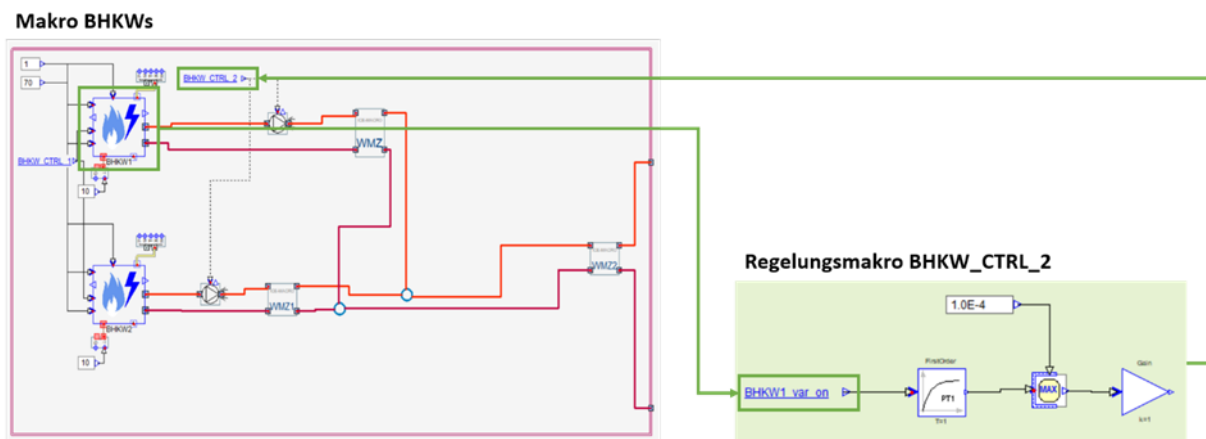


Abbildung 131 Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros BHKW\_CTRL\_2 (in grün markiert)

### 1.2.3.8 Regelung der Erdwärmepumpen

Die Regelung des Makros der Erdwärmepumpen (Erd\_WP) ist in drei separate Regelungsmakros unterteilt. Diese Strukturierung ermöglicht eine übersichtliche und modulare Abbildung der verschiedenen Regelungsprozesse innerhalb des Simulationsmodells.

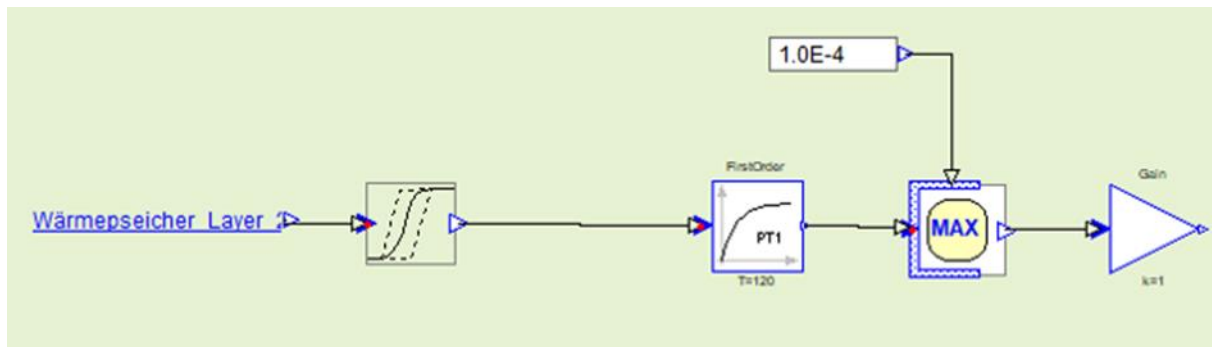
**GEO\_WP\_CTRL\_1 – Regelung der Wärmepumpen (WP1, WP2)**

Abbildung 132 Makro GEO\_WP\_CTRL\_1

Das erste Regelungsmakro der Erdwärmepumpen ist für die Steuerung der Wärmepumpen selbst verantwortlich. Die spezifischen Komponenten dieses Makros sind in Abbildung 132 dargestellt.

Analog zu den bereits beschriebenen Wärmeerzeugern werden auch die Erdwärmepumpen auf Grundlage des Ladestands des zentralen Wärmespeichers (Hottank) geregelt. Der Ladestand wird, wie bei den anderen Wärmeerzeugern, durch die Temperatur in der vierten Speicherschicht (Hottank, TLayer[4]) erfasst. Entsprechend wurde, wie in Abbildung 132 auf der linken Seite dargestellt, ein Link mit der Temperaturvariable TLayer[4] der vierten Speicherschicht in das Regelungsmakro integriert. Dieser Link stellt die Verbindung zwischen dem zentralen Speicher und der Steuerungslogik der Erdwärmepumpen her.

Das aus diesem Link resultierende Temperatursignal wird einem Proportionalregler zugeführt, der nach derselben Methodik wie bei der Regelung der Abluftwärmepumpe parametrisiert wurde. Die Funktion des Proportionalreglers besteht darin, bei Unterschreitung einer definierten Temperaturschwelle ein Signal von 1 weiterzugeben, wodurch der Betrieb der Wärmepumpen initiiert wird. In diesem Fall liegt die Temperaturschwelle bei 45 °C. Sobald die Temperatur im Hottank (TLayer[4]) unter diesen Wert fällt, aktiviert der Regler die Wärmepumpen, bis die Temperatur wieder über die definierte Schwelle steigt.

Die spezifischen Parameter, die die Funktion des Proportionalreglers bestimmen, sind in Tabelle 29 aufgeführt.

Tabelle 28 Parametrierung des Proportionalreglers in Makro GEO\_WP\_CTRL\_1

|                | <b>HI</b> | <b>LO</b> | <b>HILIMIT</b> | <b>LOLIMIT</b> |
|----------------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| <b>PSMOOTH</b> | 45,1      | 45,0      | 0              | 1              |

Die nachfolgenden Komponenten des Regelungsalgorithmus folgen demselben Muster wie bei den zuvor beschriebenen Regelungsstrategien. Das Ausgangssignal aus dem Proportionalregler wird zunächst an ein FirstOrder-Objekt (PT1-Glied) weitergeleitet. Dieses PT1-Glied dient der Glättung des Signals, um abrupte Sprünge im Regelungssignal zu vermeiden und eine kontinuierliche Steuerung sicherzustellen.

Anschließend wird das geglättete Signal durch ein MINMAXD-Objekt verarbeitet. Dieses Objekt gewährleistet, dass während der Simulation immer ein sehr geringes, aber definiertes Regelungssignal an das Modell der Wärmepumpe weitergegeben wird. Diese Maßnahme trägt dazu bei, numerische Instabilitäten im Simulationsprozess zu verhindern und die Funktionalität des Regelungssystems auch bei niedrigen Eingangswerten sicherzustellen.

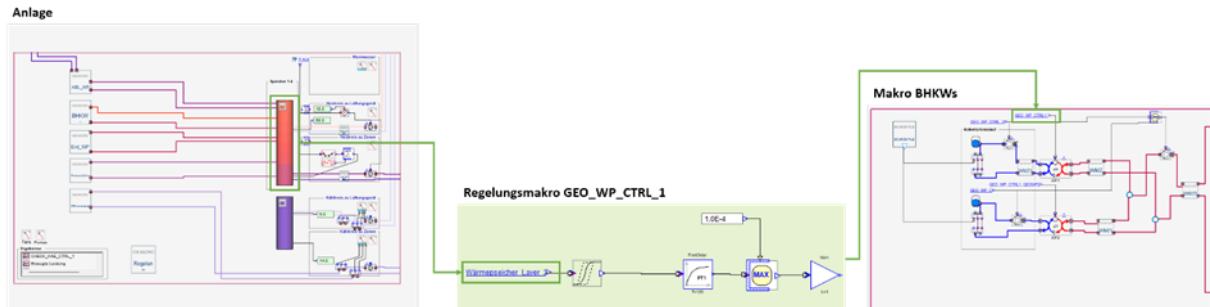


Abbildung 133 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungs makros GEO\_WP\_CTRL\_1 (in grün markiert)

### **GEO\_WP\_CTRL\_2 – Regelung Pumpe 1 (PUMPCIRC)**

Die Regelung folgt demselben Prinzip wie im zweiten Regelungsmakro der Blockheizkraftwerke (BHKW\_CTRL\_2). Die Aktivierung der Pumpe erfolgt synchron mit dem Betrieb der Wärmepumpe. Um dies umzusetzen, wurde ein Link der Regelungsvariable ctrl von Wärmepumpe 1 (WP1) in das Makro integriert. Diese Variable spiegelt den aktuellen Betriebszustand des Wärmepumpenmodells wider und dient als Ausgangspunkt für die Steuerung von Pumpe 1.

Das aus der Regelungsvariable „ctrl“ resultierende Signal wird anschließend, wie bei anderen Regelungsalgorithmen, an die üblichen Komponenten zur Stabilisierung der Simulation weitergeleitet. Dazu gehören ein FirstOrder-Objekt (PT1-Glied), das das Signal glättet und plötzliche Änderungen dämpft, sowie ein MINMAXD-Objekt, das sicherstellt, dass das Regelsignal während der Simulation niemals auf 0 absinkt.

### **GEO\_WP\_CTRL\_3 – Regelung Pumpe 2 (PUMPCIRC1)**

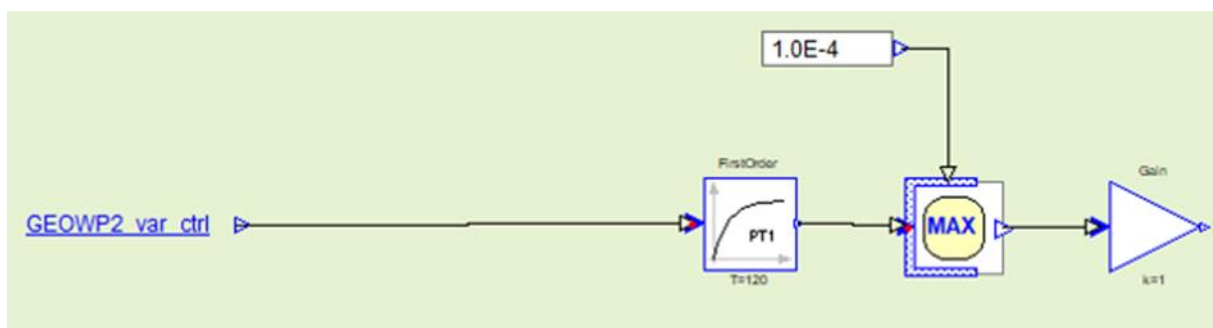


Abbildung 134 Makro GEO\_WP\_CTRL\_1

Der Regelungsalgorithmus von Pumpe 2 entspricht in seiner Struktur vollständig dem des zweiten Regelungsmakros (GEO\_WP\_CTRL\_3). Rückblickend wäre es möglich gewesen, die

Betriebssteuerung der Pumpen 1 und 2 innerhalb eines einzigen Regelungsmakros zu realisieren. Dies hätte den Vorteil gehabt, dass im Zuge der Simulation weniger Regelungswerte berechnet werden müssten, wodurch sich die Simulationszeit reduziert hätte. Dennoch wurde entschieden, für jede Pumpe einen separaten Regelungsalgorithmus zu implementieren.

Der einzige Unterschied zwischen den beiden Makros besteht darin, dass im dritten Regelungsmakro die Regelungsvariable „ctrl“ des Wärmepumpenmodells von Wärmepumpe 2 (WP2) anstelle von WP1 verlinkt wurde. Dieser Ansatz beeinträchtigt die Funktionalität des Modells nicht, hat jedoch zur Folge, dass die Rechenzeit im Simulationsverlauf etwas länger ausfällt.

Da die Komponenten der beiden Regelungsmakros identisch sind und keine weiteren inhaltlichen Unterschiede vorliegen, wird an dieser Stelle auf eine erneute detaillierte Beschreibung verzichtet.

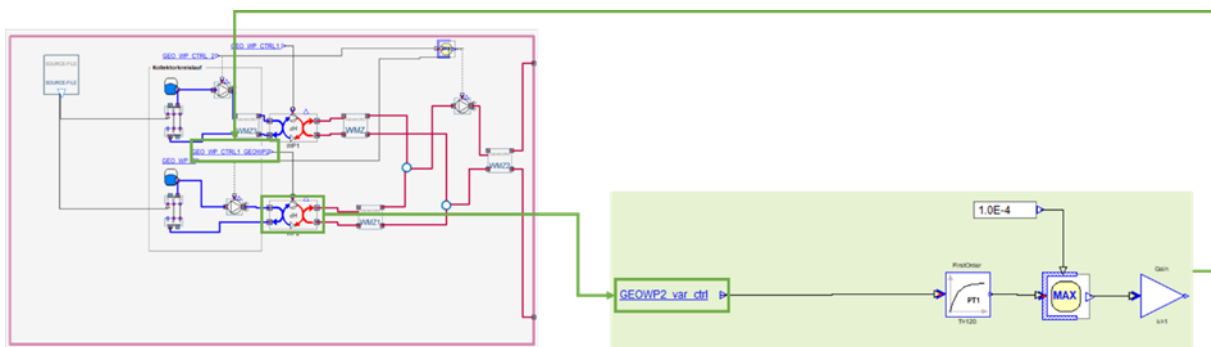


Abbildung 135 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungsmakros GEO\_WP\_CTRL\_3 (in grün markiert)

### **Regelung Pumpe 3 (PUMPCIRC3)**

Für die Regelung von Pumpe 3 im Makro der Erdwärmepumpen (Erd\_WP) wurde kein separates Regelungsmakro erstellt. Dieser Ansatz lässt sich damit begründen, dass der Betrieb von Pumpe 3 indirekt durch den Betriebszustand der anderen Pumpen und somit durch den Betriebszustand der Wärmepumpen gesteuert wird.

Innerhalb des Makros „Erd\_WP“ wurden die Signale der beiden Regelungsmakros GEO\_WP\_CTRL\_2 und GEO\_WP\_CTRL\_3 als Eingänge einem MINMAXD-Objekt zugeführt. Das Ausgangssignal dieses Objekts dient als Regelungseingang für Pumpe 3. Das MINMAXD-Objekt wurde so parametrisiert, dass es wie bereits an anderer Stelle beschrieben, einen Vergleich der beiden Eingangssignale durchführt und das jeweils größere Signal als Ausgangssignal weitergibt.

Folglich wird Pumpe 3 immer durch das aktuell im Simulationsschritt größere der beiden Stellgrößen aus GEO\_WP\_CTRL\_2 und GEO\_WP\_CTRL\_3 gesteuert. Dieser Ansatz gewährleistet, dass Pumpe 3 nur dann betrieben wird, wenn mindestens eine der beiden anderen Pumpen aktiv ist.

### 1.2.3.9 Regelung der Prozessabwärme

#### **ABW\_CTRL\_1 – Regelung von Pumpe 1 und 2 (PUMPCIRC, PUMPCIRC1)**

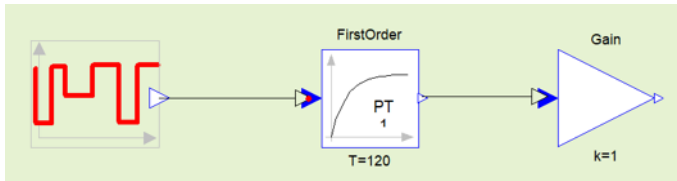


Abbildung 136 Makro ABW\_CTRL\_1

Das Regelungsmakro der Prozessabwärme übernimmt die Steuerung von Pumpe 1 und Pumpe 2. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Komponenten dieses Makros ist in Abbildung 136 zu finden.

Die Betriebsführung der Pumpen im Makro der Prozessabwärme erfolgt auf Basis eines Zeitplans, der über ein Schedule-Objekt in den Regelungsalgorithmus integriert wurde. Dieses Objekt, das in Abbildung 136 auf der linken Seite dargestellt ist, dient der zeitlichen Steuerung der Pumpen gemäß den Öffnungszeiten des Supermarktes. Der hinterlegte Zeitplan, der die spezifischen Betriebszeiten definiert, ist in Abbildung 137 dargestellt.

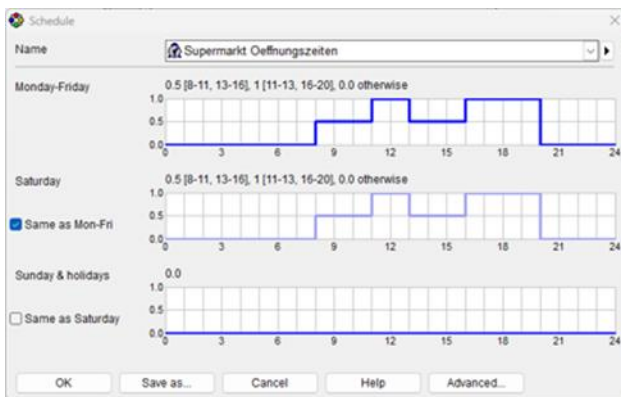


Abbildung 137 Abbildung des Zeitplans im Makro ABW\_CTRL\_1

Der im Zeitplan hinterlegte Betriebszeitraum definiert die Öffnungszeiten des Supermarktes von 08:00 bis 20:00 Uhr, Montag bis Samstag. Um jedoch ein realistisches thermisches Verhalten des zentralen Wärmespeichers abzubilden, wurde darauf geachtet, dass während der gesamten Betriebszeit nicht permanent die volle Leistung der Prozessabwärme in den zentralen Wärmespeicher eingespeist wird. Eine kontinuierliche Volllastzufuhr hätte zu einem unrealistisch hohen Temperaturniveau im zentralen Wärmespeicher geführt und den Anteil der Prozessabwärme an der Gesamtwärmeerzeugung unproportional hoch dargestellt.

Diese Anpassung wurde durch eine Variation des Regelungssignals im Zeitplan realisiert. Anstelle eines durchgehenden Signals von 1 wird zu bestimmten Zeitintervallen lediglich ein Signal von 0,5 an die Pumpen weitergegeben. Diese zeitliche Modulation orientiert sich an der Kundendichte im Supermarkt. In Zeiträumen mit hoher Kundendichte, in denen die Prozesskältetechnik voraussichtlich ihre höchste Leistung erbringen muss, wird ein maximales Signal von 1 verwendet. In anderen Zeitfenstern wird das Signal reduziert, um die Simulation der Prozessabwärmenutzung an die realen Betriebsbedingungen anzupassen.

Die spezifischen Zeitintervalle sowie die entsprechenden Regelungssignale, die an die Pumpen weitergegeben werden, sind in Tabelle 29 dokumentiert.

Tabelle 29 Regelsignal nach Zeitraum durch den Zeitplan vorgegeben

| Zeitraum          | Regelsignal |
|-------------------|-------------|
| 00:00 – 07:59 Uhr | 0           |
| 08:00 – 10:59 Uhr | 0,5         |
| 11:00 – 12:59 Uhr | 1           |
| 13:00 – 15:59 Uhr | 0,5         |
| 16:00 – 19:59 Uhr | 1           |
| 20:00 – 00:00 Uhr | 0           |

Diese Anpassung des Regelungssignals gewährleistet eine realistische Abbildung des Beitrags der Prozessabwärme zur Gesamtheizleistung.

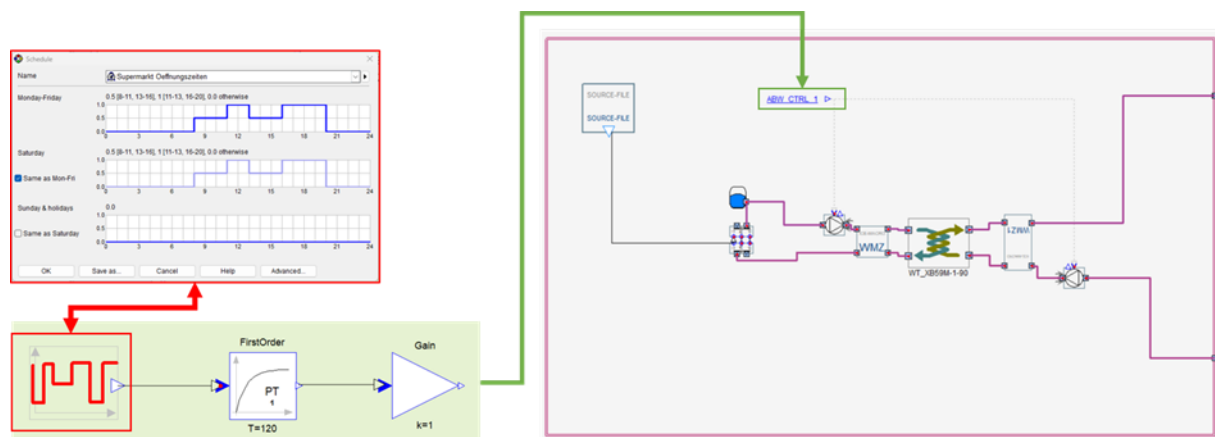


Abbildung 138 Wechselwirkung des Signalflusses des Regelungs makros ABW\_CTRL\_1 (in grün markiert)

### 1.2.3.10 Regelung der Kälteversorgung

#### **KAE\_CTRL\_1 – Regelung von Pumpe 1 (PUMPCIRC)**

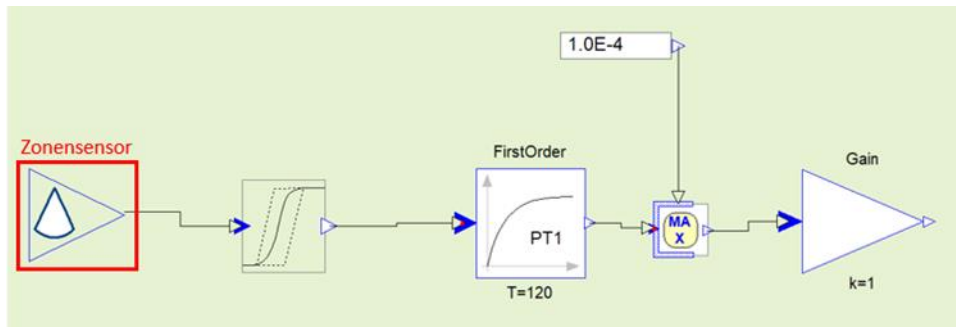


Abbildung 139 Makro KAE\_CTRL\_1

Das Regelungsmakro der Kälteerzeugung übernimmt die Steuerung von Pumpe 1. Die detaillierte Darstellung der einzelnen Komponenten dieses Makros ist in Abbildung 139 zu finden. Der Betrieb von Pumpe 1 wird auf Grundlage der durchschnittlichen Lufttemperatur der Zonengruppe „Büros“ geregelt. Sobald eine definierte Temperaturgrenze überschritten wird, wird die Pumpe aktiviert, sodass die Büroräume über den Erdkollektor gekühlt werden können.

Die Regelung basiert auf einem Zonensensor, der die Temperaturdaten der Büro-Zonen (Büro 1, Büro 2, Büro 3) erfasst. Dieser Sensor, der sich auf der linken Seite in Abbildung 139 befindet, ist so parametrisiert, dass er den Durchschnittswert der Lufttemperaturen der genannten Zonen berechnet und diesen Wert als Temperatursignal weitergibt. Die spezifische Parametrierung des Zonensensors ist in Abbildung 140 dokumentiert

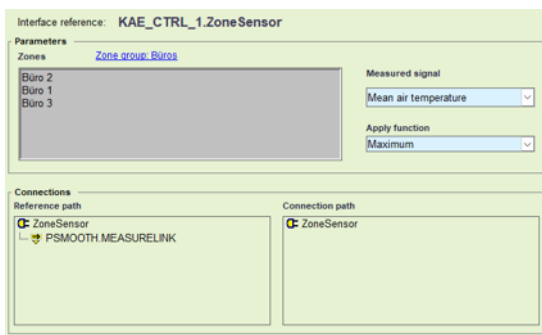


Abbildung 140 Parametrierung Zonensensor im Makro KAE\_CTRL\_1

Das durch den Zonensensor generierte Temperatursignal wird als Eingangssignal an einen Proportionalregler weitergeleitet. Dieser Regler ist, wie bereits bei anderen Regelungskomponenten beschrieben, so parametrisiert, dass er als logischer Schalter fungiert. Überschreitet die durchschnittliche Lufttemperatur der Büro-Zonen den Schwellenwert von 24 °C, gibt der Proportionalregler ein Regulationssignal von 1 aus, wodurch Pumpe 1 aktiviert wird. Die spezifischen Einstellungen und Parameter des Proportionalreglers sind in Tabelle 30 aufgeführt.

Tabelle 30 Parametrierung des Proportionalreglers in Makro Kälteversorgung

|                | HI   | LO   | HILIMIT | LOLIMIT |
|----------------|------|------|---------|---------|
| <b>PSMOOTH</b> | 24,0 | 23,9 | 1       | 0       |

Die weiteren Bestandteile des Regelungsmakros entsprechen den üblichen Stabilisierungskomponenten, die in den vorherigen Makros beschrieben wurden. Dazu gehören ein FirstOrder-Objekt (PT1-Glied), das das Regelungssignal glättet, um plötzliche Änderungen zu vermeiden und eine kontinuierliche Steuerung sicherzustellen und ein MINMAXD-Objekt, das sicherstellt, dass das Regelungssignal während des Simulationsverlaufs niemals auf 0 absinkt, wodurch numerische Instabilitäten verhindert werden.

### 1.2.3.11 Regelung der Zonenversorgung

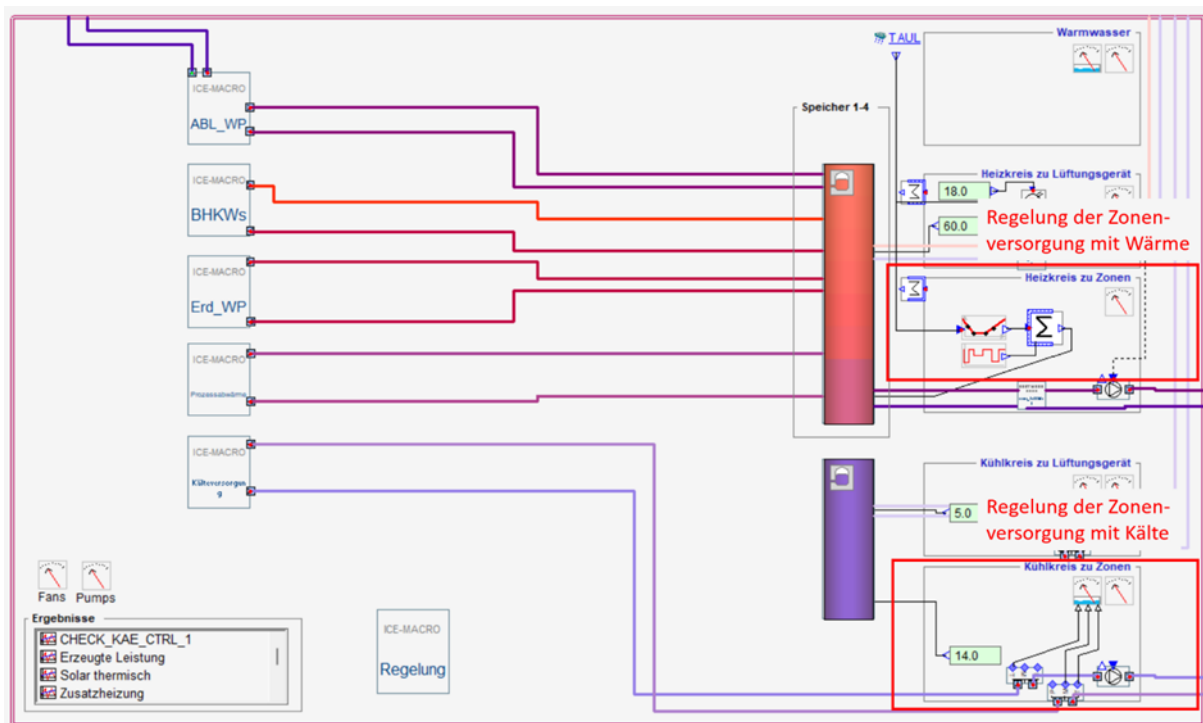


Abbildung 141 Markierung der Regelung der Zonenversorgung mit Wärme und Kälte

Die Regelung der Pumpen, die Wasser zu den Zonen fördern, basiert auf den von IDA ICE bei der Erstellung eines Anlagenmodells im „Advanced Level“ automatisch generierten Regelungsalgorithmen. Diese Algorithmen werden in das Modell integriert, um den Betrieb der Pumpen zu steuern. Zur Vollständigkeit sollen diese Regelungsmechanismen hier kurz angesprochen und erläutert werden.

Es ist zudem anzumerken, dass die Regelungskreise „Heizkreis zu Lüftungsgerät“ und „Kühlkreis zu Lüftungsgerät“, wie bereits erwähnt, im vorliegenden Anlagenmodell keine funktionale Rolle spielen. Dies liegt daran, dass das Lüftungsgerät weder mit einem Heiz- noch mit einem Kühlregister ausgestattet ist. Dennoch ist es notwendig, beide Kreise in ihrer abgebildeten

Form im Modell zu belassen, um die für die Simulationsinitialisierung erforderlichen Eingangsvariablen korrekt zu erfüllen. Die Kreise dienen somit ausschließlich der Sicherstellung einer stabilen Initialisierung der Simulation.

### **Heizkreis zu Zonen:**

Der Heizkreis zu den Zonen (vgl. Abbildung 141) wird durch ein Thermostat (THERMOST) gesteuert. Dieses Thermostat erhält standardmäßig als Messwert (MEASURELINK) die Außentemperatur, die über den Link im oberen Bereich (TAUL) dargestellt wird, sowie einen Sollwert von 18 °C, der als Konstante hinterlegt ist.

Zusätzlich wurde im Thermostat ein Totband (Deadband) von 3 Kelvin eingestellt, wodurch sich ein Temperaturbereich von 16,5 °C bis 19,5 °C ergibt. Innerhalb dieses Bereichs bleibt das Thermostat inaktiv. Sobald die Außentemperatur 16,5 °C unterschreitet, wird das Thermostat aktiviert und gibt ein Regelsignal weiter. Dies führt dazu, dass die Pumpe zoneHotPump eingeschaltet wird, wodurch Wasser aus dem zentralen Wärmespeicher (Hottank) zu den Zonen gefördert wird.

### **Kühlkreis zu Zonen:**

Die Regelung des Kühlkreises zu den Zonen (vgl. Abbildung 141) und insbesondere der Pumpe zoneColdPump erscheint aus der schematischen Darstellung der Anlagentechnik relativ undurchsichtig. Es ist nicht eindeutig erkennbar, wie oder zu welchem Zeitpunkt die Pumpe aktiviert wird, um Kühlwasser zu den Büro-Zonen zu fördern.

In einem ersten Modellierungsansatz wurde das Regelsignal, das durch das Regelungsmakro der Kälteversorgung (KAE\_CTRL\_1) erzeugt wird, zur Steuerung der Pumpe verwendet. Bei einem weiteren Austausch mit dem Support von IDA ICE wurde jedoch klargestellt, dass eine „manuelle“ Regelung der Pumpe durch ein separates Regelungsmakro nicht erforderlich ist. Stattdessen erfolgt die Steuerung dieser Pumpe automatisch über die Zoneneinstellungen.

Daher wurde die Pumpe bei ihrer Standardeinstellung belassen, ohne zusätzliche Eingriffe in die Regelungslogik vorzunehmen. Aus diesem Grund kann der Signalweg an dieser Stelle leider nicht mit voller Sicherheit nachvollzogen werden. Eine Überprüfung der Simulationsergebnisse hat jedoch gezeigt, dass die Pumpe in ihrer Funktion korrekt gesteuert wird und ihre Aufgabe, Kühlwasser zu den Büro-Zonen zu fördern, ordnungsgemäß erfüllt.

## Allgemeiner Signalfloss im Referenzmodell

Zur abschließenden Beschreibung des Referenzmodells verdeutlicht Abbildung 142 die Wechselwirkungen zwischen den zuvor beschriebenen Erzeuger-Makros, den Regelungs-Makros, dem zentralen Wärmespeicher sowie dem Gebäude und den zugehörigen Zonen.

In der Abbildung sind die Energieflüsse durch rote Linien und die Signalflüsse durch grüne Linien gekennzeichnet.

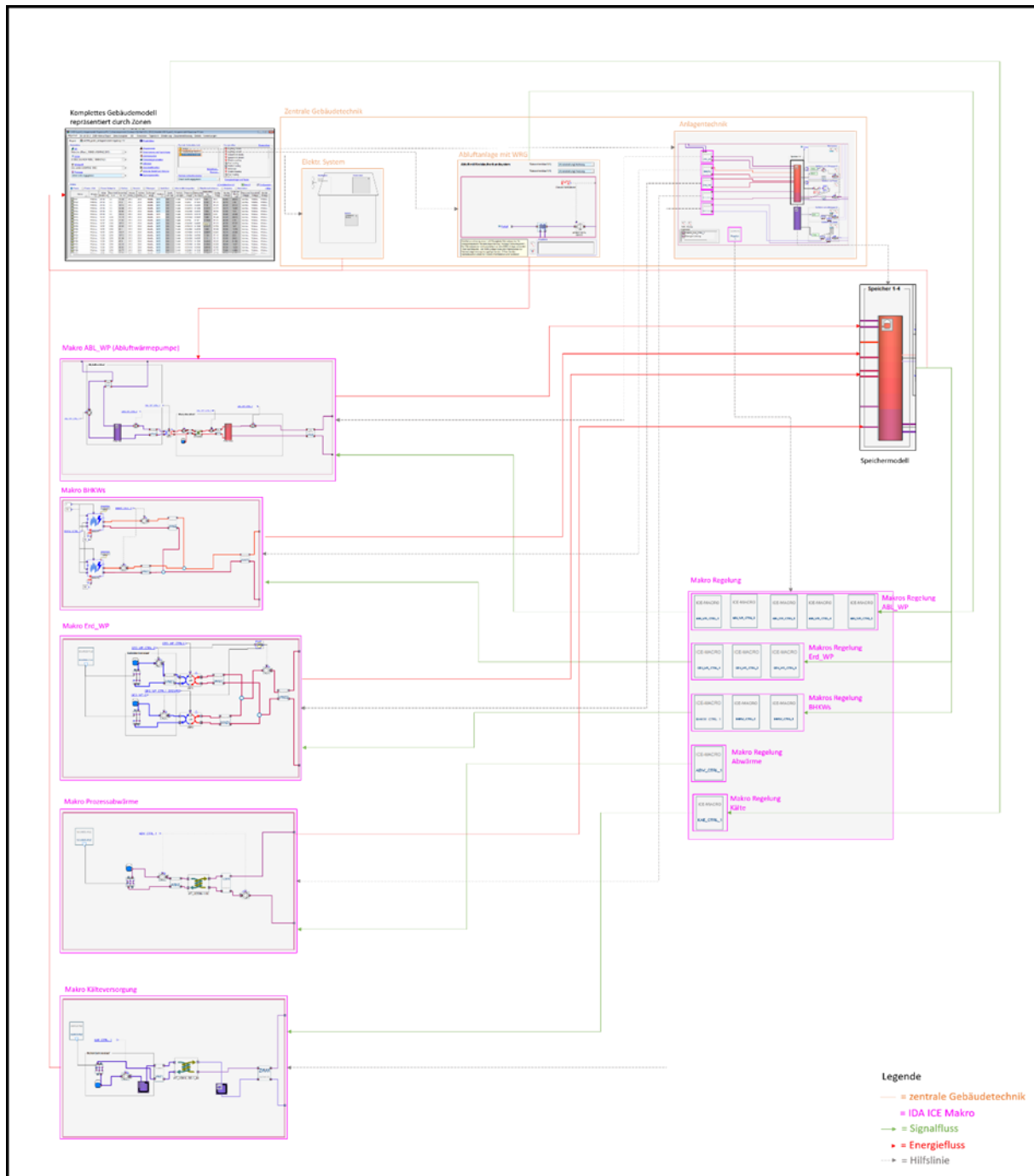


Abbildung 142 Signalfloss und Energieflüsse des Referenzmodells

### 1.2.3.12 Erstellung Datensatz Residuallast

Nachdem die Anlagentechnik von pulsG mit der Regelung der Komponenten in der Simulationssoftware IDA ICE als Referenzmodell vollständig implementiert wurde, erfolgte die Entwicklung weiterer Varianten. Ziel dieser Varianten war die Implementierung einer netzdienlichen Regelungsstrategie, die auf einem externen Netzsignal basiert.

Im Rahmen dieses Prozesses war es erforderlich, einen Datensatz zu erstellen, der als Schnittstelle für das externe Netzsignal in die Simulationssoftware eingebunden werden konnte. Um die Grundlage für das Verständnis dieses Arbeitsschritts zu schaffen, wird im Folgenden detailliert erläutert, aus welchen Daten der Datensatz besteht, welche Quellen für die Datengenerierung herangezogen wurden und welche methodischen Schritte bei der Erstellung des Datensatzes durchgeführt wurden.

#### Download Residuallastdaten über SMARD

Im Rahmen einer umfassenden Recherche zu verfügbaren Plattformen für den Bezug von Daten zum Residuallastverlauf in Deutschland stellte sich heraus, dass die Informationsplattform „SMARD“ der Bundesnetzagentur eine geeignete Quelle darstellt. Seit 2017 werden auf dieser Plattform Daten zum Strom- und Gasmarkt in Deutschland veröffentlicht, die kosten-frei zugänglich und uneingeschränkt nutzbar sind.

Die Benutzeroberfläche von SMARD ermöglicht eine benutzerfreundliche Visualisierung der Daten über den Menüpunkt „Marktdaten visualisieren“. Im Untermenü „Stromverbrauch“ kann unter der Option „Realisierter Stromverbrauch“ ein interaktives Diagramm angezeigt werden, das die Kategorien „Gesamt (Netzlast)“, „Residuallast“ und „Pumpspeicher“ umfasst. Durch eine Auswahlfunktion unterhalb des Diagramms ist es möglich, gezielt die anzuzeigenden Daten zu filtern. Für die vorliegende Untersuchung wurde ausschließlich die Residuallast ausgewählt.

Abbildung 143 illustriert den Navigationsweg, der zur gezielten Auswahl und Darstellung der Residuallastdaten führt.

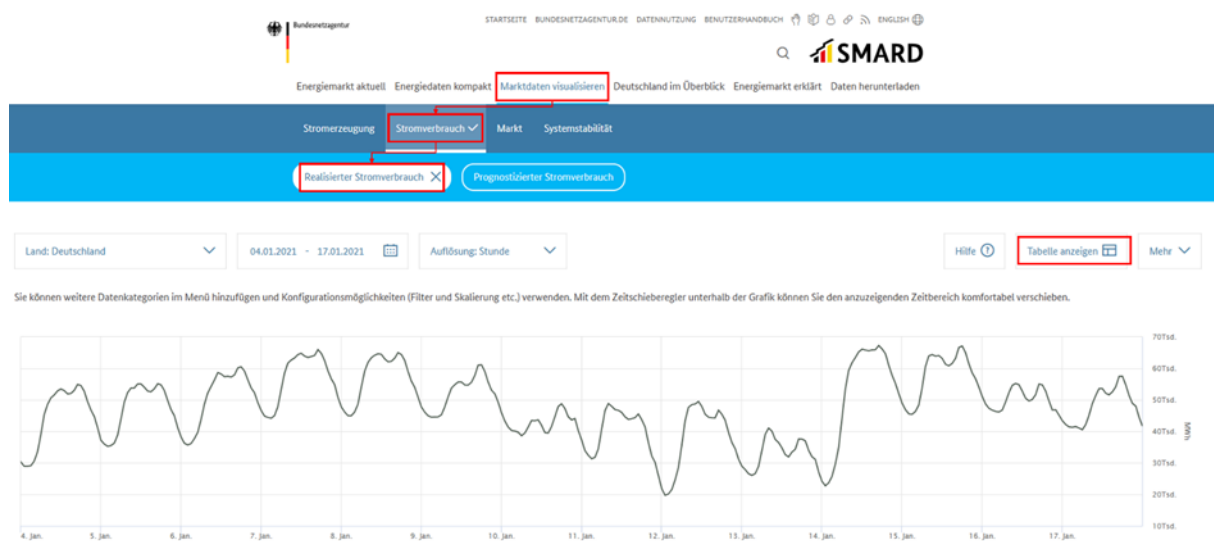
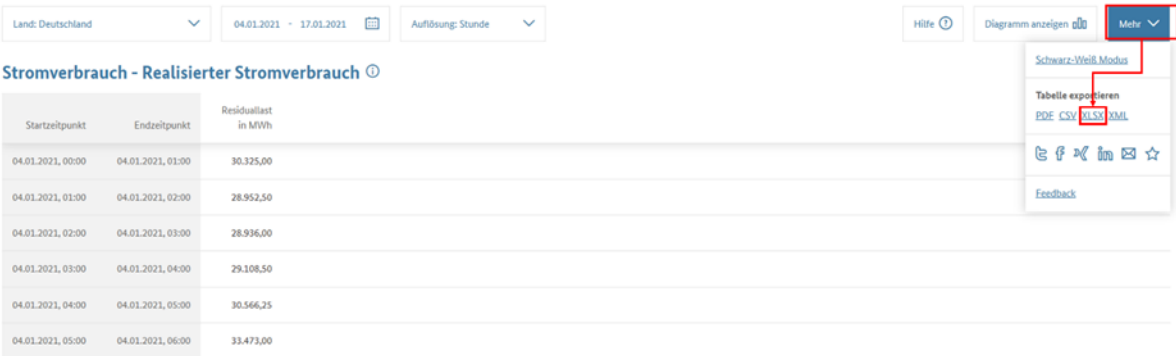


Abbildung 143 Darstellung der Plattform SMARD und Navigation zum Datensatz

Da die Darstellung der Daten auf der Plattform sowohl nach Zeitraum als auch nach zeitlicher Auflösung konfigurierbar ist, wurde für die Untersuchung der Zeitraum des gesamten Jahres 2021 gewählt, welcher auch in IDA ICE als Simulationszeitraum eingestellt war. Hinsichtlich der Auflösung entschied man sich für eine stündliche Auflösung, da diese ein angemessenes Verhältnis zwischen Datenpräzision und der Größe des resultierenden Datensatzes (8760 Werte) bietet, welches für die Simulation als ausreichend erachtet wurde.

Aufgrund einer Einschränkung der Plattform können Daten bei stündlicher Auflösung lediglich für Zeiträume von maximal zwei Wochen angezeigt und heruntergeladen werden. Um den vollständigen Datensatz für das Jahr 2021 zu erhalten, mussten die Daten daher in zweiwöchigen Intervallen heruntergeladen und anschließend zu einer zusammenhängenden Datei zusammengeführt werden. Dies wurde durch die tabellarische Ansicht der zuvor visualisierten Diagrammdaten erleichtert, welche über den Button „Tabelle anzeigen“ (siehe Abbildung 143) geöffnet werden kann. Der Export der Daten erfolgt über den Button „Mehr“ und den Unterpunkt „Tabelle exportieren“. Dieser Prozess ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Für den Download wurde das XLSX-Dateiformat bevorzugt, da dieses die anschließende Verarbeitung der Daten in Microsoft Excel erleichtert. Die zweiwöchigen Teildatensätze konnten durch Kopieren und Einfügen zu einer Gesamttabelle zusammengeführt werden. Zudem wurde die Erstellung des finalen Datensatzes, der in IDA ICE importiert werden sollte, ebenfalls mithilfe von Excel umgesetzt.



Land: Deutschland 04.01.2021 - 17.01.2021 Auflösung: Stunde Hilfe Diagramm anzeigen Mehr

**Stromverbrauch - Realisierter Stromverbrauch**

| Startzeitpunkt    | Endzeitpunkt      | Residuallast in MWh |
|-------------------|-------------------|---------------------|
| 04.01.2021, 00:00 | 04.01.2021, 01:00 | 30.325,00           |
| 04.01.2021, 01:00 | 04.01.2021, 02:00 | 28.952,50           |
| 04.01.2021, 02:00 | 04.01.2021, 03:00 | 28.936,00           |
| 04.01.2021, 03:00 | 04.01.2021, 04:00 | 29.108,50           |
| 04.01.2021, 04:00 | 04.01.2021, 05:00 | 30.566,25           |
| 04.01.2021, 05:00 | 04.01.2021, 06:00 | 33.473,00           |

Abbildung 144 Navigation zum Download des Datensatzes

### **Erstellung eines PRN-Datensatzes für die Simulation**

Nachdem die Daten in Microsoft Excel zu einer zusammengefüigten Tabelle verarbeitet worden waren, mussten sie in ein von IDA ICE lesbares Format überführt werden. Dabei handelt es sich um das bereits angesprochene PRN-Datenformat, das direkt über Excel generiert werden kann.

Für die korrekte Erstellung des PRN-Datensatzes war es erforderlich, die Daten in einer spezifischen Struktur anzuordnen. Die Zeitschritte und die zugehörigen Residuallastwerte mussten in separaten Spalten nebeneinander dargestellt werden. Diese tabellarische Organisation gewährleistet, dass die Daten in der Simulationssoftware korrekt interpretiert werden können.

Für den korrekten Einbindungsprozess in die Simulationssoftware IDA ICE ist es erforderlich, die Spalte, die die Zeitschritte enthält, mit der Bezeichnung „time“ zu versehen. Diese Kenn-

zeichnung ermöglicht es der Software, die Spalte eindeutig als Zeitschrittspalte zu erkennen und entsprechend zu verarbeiten.

Nach der strukturierten Anordnung der Daten in der beschriebenen Weise muss die Datei im Format „Text (MS-DOS) (\*.txt)“ gespeichert werden. Im abschließenden Schritt wird die Dateiendung der gespeicherten Datei von „.txt“ in „.prn“ geändert, um das für IDA ICE erforderliche Format zu generieren.

### **Einlesen des Datensatzes in IDA ICE**

Wie bereits bei der Erstellung des Datensatzes für den Erdkollektor erläutert, erfolgt die Einbindung der Residuallastdaten in IDA ICE analog über ein SourceFile-Objekt. Durch diese Methode werden die Residuallastdaten erfolgreich in die Simulation integriert und stehen anschließend als Signal zur Verfügung, das in die jeweiligen Regelungsalgorithmen eingebunden werden kann.

### **1.2.3.13 Simulationsdurchführung**

Alle dargestellten Modellvarianten wurden unter Verwendung identischer Ausgabeparameter sowie Simulationsdaten simuliert, um eine vergleichbare Analyse der Ergebnisse gewährleisten zu können. In der Simulationssoftware IDA ICE besteht die Möglichkeit, für beide Kategorien benutzerdefinierte Eingaben vorzunehmen. Diese individuellen Anpassungen werden im Folgenden angesprochen.

#### **Ausgabeparameter**

In der Simulationssoftware IDA ICE können verschiedene Ausgabeparameter in Form von Diagrammen und Berichten auf unterschiedlichen Ebenen des Gebäudemodells generiert werden. Dabei wird zwischen drei Kategorien unterschieden: Diagramme für gebäudeübergreifende Systeme, wie beispielsweise die zentrale Gebäudetechnik, Diagramme auf der Ebene der Zonenmodelle (also dem detaillierten Gebäudemodell) sowie Berichte, die ebenfalls auf beiden genannten Ebenen erstellt werden können.

Anzumerken ist, dass die Gesamtzeit für die Simulation proportional zur Anzahl der ausgewählten Ausgabeparameter ist. Daher wurde eine gezielte Auswahl relevanter Parameter getroffen, um ein aussagekräftiges Bild der Ergebnisse zu ermöglichen.

Für die Simulation wurden die folgenden Diagramme und Berichte definiert:

Diagramme – Gebäudeebene (Building Level):

- Temperaturen in der Anlage (Plant Temperatures)
- Gesamtverbrauch von Heiz- und Kühlenergie (Total Heating and Cooling)
- Anlagendetails (Plant Details)
- Elektrisches System (Electrical Systems)
- Diagramme – Zonenebene (Zone Level):

Haupttemperaturen (Main Temperatures)

- Energiebilanz (Heat Balance)
- Berichte – Gebäudeebene (Building Level):

Gelieferte Energie (Delivered Energy)

- Handelsbericht (Trading Report)
- Bericht über elektrische Energie (Electrical Energy Report)

### **Simulationsdaten**

Die Konfiguration der Simulationsdaten hat einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse sowie auf den erforderlichen Rechenaufwand und damit auf die Gesamtdauer der Simulation. Eine sorgfältige Auswahl dieser Parameter kann dazu beitragen, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Präzision und Effizienz zu erzielen.

Die in den Simulationsdaten vorgenommenen Einstellungen sind in Abbildung 145 dargestellt.

The screenshot shows a software interface for configuring simulation data. It has three tabs: 'Startup', 'Advanced', and 'Options'. The 'Startup' tab is active. Under the 'Type' section, there are two radio buttons: 'Periodic' and 'Dynamic'. The 'Dynamic' button is selected. Below this, there is a text input field labeled 'Days for startup' with the value '1'. On the right side of the 'Startup' tab, there are several numerical input fields: 'Tolerance' (0.2), 'Maximal timestep' (0.5 h), 'Maximum number of periods' (14), 'Tolerance for periodicity' (0.001), and 'Time step for output' (0.0 h). At the bottom of the 'Startup' tab, there is a checkbox labeled 'Time-split parallelization' which is currently unchecked.

Abbildung 145 Darstellung der Simulationsdaten

#### **1.2.3.14 Anpassung der Regelungsstrategie und Variantenbildung**

Das ursprünglich formulierte Ziel bestand darin, eine netzdienliche Regelungsstrategie in der Simulationssoftware IDA ICE abzubilden und zu simulieren. Nachdem der Referenzfall des Gebäudes pulsG erfolgreich modelliert wurde, wird in diesem Abschnitt erläutert, wie die Regelungsstrategie angepasst wurde, um das angestrebte Ziel zu erreichen.

Dabei wurde ein externes Netzsignal, in diesem Fall die Residuallast, in die Regelungsalgorithmen integriert. Auf dieser Grundlage wurde der Betrieb der Erzeuger koordiniert, um eine netzdienliche Betriebsweise zu ermöglichen.

Die Residuallast beschreibt den Teil des Strombedarfs, der nach Abzug der Einspeisung aus erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarenergie durch konventionelle Kraftwerke gedeckt werden muss. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen dem gesamten Stromverbrauch und der Stromerzeugung aus volatilen erneuerbaren Quellen. Aufgrund der Witterungsabhängigkeit und der Schwankungen erneuerbarer Energien unterliegt die Residuallast erheblichen Variationen, was Herausforderungen für die Stabilität des Stromnetzes mit sich bringt. Ein hoher Wert der Residuallast zeigt an, dass die Nachfrage nicht durch erneuerbare Energien gedeckt werden kann, während ein negativer Wert auf eine Überproduktion hinweist.

Dementsprechend ist es aus Sicht einer netzdienlichen Regelung im Kontext eines Gebäudes von Vorteil, bei geringen Werten der Residuallast Strom durch das Betreiben der Wärmeerzeuger zu beziehen und als Wärme in einem zentralen Wärmespeicher zwischenspeichern.

Im Folgenden wird erläutert, wie die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Regelungsalgorithmen so angepasst wurden, dass die Residuallast als weitere Führungsgröße, neben der Speichertemperatur im zentralen Wärmespeicher, in die Regelungsstrategien eingebunden werden konnte, um eine netzdienliche Steuerung der Erzeugerkomponenten zu gewährleisten.

### **Methodischer Ansatz zur Einbindung der Residuallast**

Um die Residuallast als Führungsgröße in die Regelung des Simulationsmodells zu integrieren, musste zunächst eine geeignete Methode zur Einbindung des externen Netzsignals entwickelt werden. Dabei wurde der Ansatz verfolgt, basierend auf der eingebundenen Datenreihe Schwellenwerte festzulegen, die bestimmen, ab wann eine Freigabe für einen Erzeuger in Abhängigkeit von der Residuallast erfolgt. Dabei handelt es sich um eine ähnliche Methodik wie im Referenzfall in dem die Betriebszustände der Erzeuger durch die Speichertemperatur des zentralen Wärmespeichers geregelt werden.

Zur Definition dieser Schwellenwerte wurde der Datensatz der Residuallast einer statistischen Analyse unterzogen. Dabei wurden Kennwerte wie Median, Minimum und Maximum ermittelt, um ein fundiertes Verständnis der Verteilung der Residuallast zu erhalten. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

Tabelle 31 Statistische Kennwerte der Datenreihe der Residuallast

|                | Wert [MWh] |
|----------------|------------|
| <b>Minimum</b> | 2528,25    |
| <b>Median</b>  | 34684,25   |
| <b>Maximum</b> | 70961,50   |

Basierend auf dem Maximalwert des vorliegenden Datensatzes wurden Schwellenwerte auf prozentualer Basis definiert, die anschließend in die Regelungsalgorithmen integriert wurden. Diese Herangehensweise lässt sich damit begründen, dass die Residuallast, wie zuvor erläutert, in gewissem Maße einen Indikator für die Stabilität des Stromnetzes darstellt.

Aus einer netzdienlichen Perspektive sollte Strom bevorzugt dann aus dem Netz bezogen werden, wenn die Residuallast geringe Werte aufweist. In diesen Zeiträumen ist der Anteil der volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am höchsten, was zugleich bedeutet, dass die Netzstabilität am anfälligsten ist und dementsprechend kann über den gezielten Strombezug in diesen Zeiten zur Netzstabilität beigetragen werden.

Ausgehend vom Maximalwert der Residuallast wurden prozentuale Anteile berechnet, die zur Definition der Schwellenwerte dienten. Diese Schwellenwerte legen fest, ab wann eine Freigabe für den Betrieb eines Wärmeerzeugers erteilt wird.

Die für jede Modellvariante definierten Schwellenwerte sind in den jeweiligen Beschreibungen der Varianten detailliert dargestellt und dienen als Grundlage für die netzdienliche Steuerung der Erzeugerkomponenten.

### **Beschreibung der Anpassungen im Modell (Darstellung der verschiedenen Varianten)**

Die nachfolgend beschriebenen Modellvarianten unterscheiden sich vom Referenzmodell ausschließlich in ihren Regelungsalgorithmen, während die Zusammensetzung und Parametrierung der Wärmeerzeuger in der Simulationssoftware IDA ICE unverändert bleibt. Das zu Beginn dieser Arbeit definierte Ziel bestand primär in der Anpassung und Untersuchung der Regelung unter den Gesichtspunkten der Netzdienlichkeit.

Auf dieser Grundlage wurden mehrere Varianten entwickelt, die sich in ihren Ansätzen nur geringfügig unterscheiden. Im Folgenden wird zunächst der spezifische Zweck jeder Variante erläutert, bevor die entsprechenden Änderungen im Simulationsmodell detailliert dargestellt werden.

#### *Variante 1: Residuallastregelung 30% WP + BHKW*

In der ersten Variation des Referenzmodells wurde, wie bereits erwähnt, die Residuallast als externes Netzsignal in die Regelungsalgorithmen der Wärmeerzeuger integriert, die auf elektrische Hilfsenergie angewiesen sind bzw. Strom verbrauchen. Dieses externe Signal diente als zusätzliches Freigabekriterium für den Betrieb der entsprechenden Anlagen. Die Anpassung betraf ausschließlich die Abluft-Wärmepumpe sowie die Erdwärmepumpen, da diese direkt von der elektrischen Energieversorgung abhängig sind.

#### Änderungen im Makro ABL\_WP\_CTRL\_3:

Wie bereits in Kapitel 1.2.3.6 beschrieben, wird der Betriebszustand der Abluftwärmepumpe durch die Temperatur in der Mitte des Quellenspeichers und des Primärspeichers gesteuert. Die Wärmepumpe wird aktiviert, wenn beide Speicher einen definierten Temperaturschwellenwert über- beziehungsweise unterschreiten.

In der Variante 1 wurde ein zusätzliches Freigabekriterium in die Regelung des Betriebszustands der Abluftwärmepumpe integriert: das Residuallastsignal. Für dieses Signal wurde, analog zu den Speichertemperaturen, ein Schwellenwert definiert, der als zweites Freigabekriterium ergänzt wurde. Dadurch ergibt sich, dass die Abluftwärmepumpe in diesem Fall nur dann in Betrieb gehen kann, wenn beide Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Speichertemperaturen liegen über den definierten Schwellenwerten.
2. Das Residuallastsignal liegt unter dem vorgegebenen Schwellenwert.

Diese Erweiterung der Regelungsstrategie sorgt dafür, dass die Aktivierung der Abluftwärmepumpe nicht nur an die thermischen Gegebenheiten der Speicher, sondern auch an das externe Netzsignal gekoppelt ist.

Der definierte Schwellenwert für das Residuallastsignal wurde als prozentualer Anteil des Maximalwerts der Residuallastdatenreihe berechnet (vgl. Tabelle 31). Für Variante 1 wurde ein Wert von 30 % des Maximalwerts angenommen. Dieser Ansatz ergibt einen Schwellenwert von 21.288 Megawattstunden, der in die Regelung integriert wurde.

Unterschreitet das Residuallastsignal diesen Schwellenwert, wird die Wärmepumpe aktiviert. Diese Methodik stellt sicher, dass die Regelung an den energetischen Zustand des Systems angepasst ist und der Betrieb der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Residuallast optimiert wird.

Aus Abbildung 146 ist das abgeänderte Makro „ABL\_WP\_CTRL\_3“ ersichtlich.

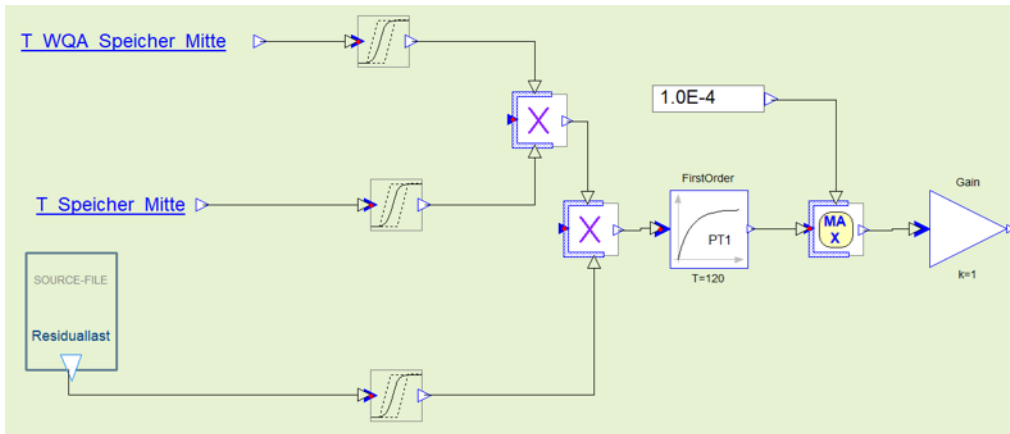


Abbildung 146 Regelungsmakro ABL\_WP\_CTRL\_3 in Variante 1

Die Einbindung des Residuallastsignals in die Software IDA ICE erfolgte dabei analog zur bereits beschriebenen Integration externer Daten mittels eines Source-File-Objekts. Nach der Einbindung wird das Residuallastsignal an einen Proportionalregler weitergeleitet. Dieser Regler ist, wie zuvor beschrieben, als logischer Schalter parametrisiert und mit dem definierten Schwellenwert der Residuallast konfiguriert.

Unterschreitet das Residuallastsignal den vorgegebenen Schwellenwert, gibt der Proportionalregler ein Signal von 1 an den zweiten Multiplikator weiter. Dies ermöglicht die Verknüpfung des Residuallastkriteriums mit den anderen Freigabekriterien, um den Betrieb der Abluftwärmepumpe zu steuern. Die spezifischen Parameter des Proportionalreglers sind in Tabelle 32 dokumentiert.

Tabelle 32 Parametrierung Proportionalregler Residuallast ABL\_WP\_CTRL\_3 Variante 1

|                | HI    | LO      | HILIMIT | LOLIMIT |
|----------------|-------|---------|---------|---------|
| <b>PSMOOTH</b> | 21288 | 21287,9 | 0       | 1       |

Somit wurde das Ursprüngliche Regelungsmakro, das den Betrieb der Abluftwärmepumpe steuert, lediglich um die Freigabebedingung, die aus dem Datensatz der Residuallast resultiert, erweitert.

Änderungen im Makro GEO\_WP\_CTRL\_1:

Die im Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe (ABL\_WP\_CTRL\_3) angewendete Methodik wurde ebenfalls im Regelungsmakro zur Steuerung des Betriebszustands der Erdwärmepumpen implementiert. Das Residuallastsignal wurde dabei erneut über ein Source-File-Objekt in den Algorithmus integriert, um den Betrieb der Erdwärmepumpen zusätzlich zur Netzlast zu regeln.

Durch diese Erweiterung ist der Betrieb der Erdwärmepumpen nicht mehr ausschließlich vom Temperatursignal des zentralen Wärmespeichers abhängig, sondern auch von der Residuallast.

Die angepassten Komponenten des Regelungsmakros GEO\_WP\_CTRL\_1 sind in Abbildung 147 dargestellt und verdeutlichen die Integration des Residuallastsignals in den bestehenden Regelungsalgorithmus.

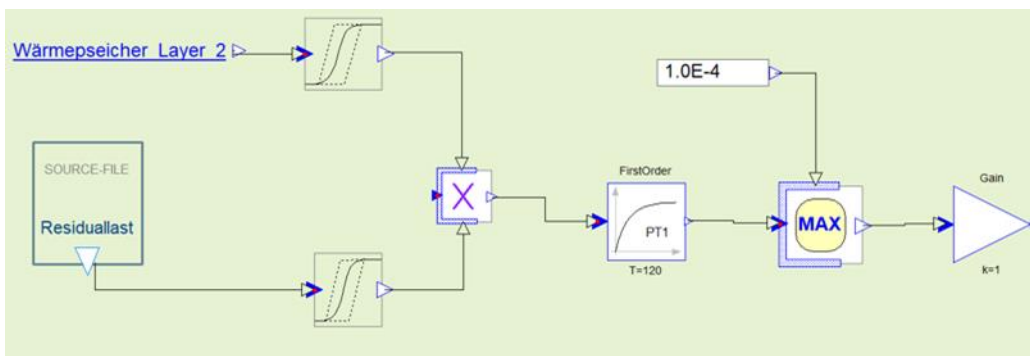


Abbildung 147 Regelungsmakro GEO\_WP\_CTRL\_1 in Variante 1

Das Residuallastsignal wird nach demselben Prinzip wie beim veränderten Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe als Eingangssignal einem Proportionalregler zugeführt. Des Weiteren wurde der Regler ebenfalls identisch zum Proportionalregler im angepassten Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe parametrierung (vgl. Tabelle 28). Der Grund für diese einheitliche Parametrierung liegt darin, dass die Erdwärmepumpen zum selben Zeitpunkt in Betrieb gehen sollen, nämlich bei einer Unterschreitung des Residuallastschwellenwerts von 21.288 Megawattstunden.

Diese einheitliche Regelungsstrategie gewährleistet, dass beide Wärmepumpensysteme auf identische Weise auf die Bedingungen des Stromnetzes reagieren, wie sie durch das Residuallastsignal ausgedrückt werden. Dadurch wurde in Variante 1 eine einfache und effiziente netzdienliche Regelungsstrategie implementiert, die auf einem externen Netzsignal basiert.

### *Variante 2: Residuallastregelung 40% WP + BHKW*

In Variante 2 wurde im Vergleich zu Variante 1 lediglich der Schwellenwert der Proportionalregler in den Regelungsalgorithmen der Wärmepumpen angepasst und auf einen höheren Wert korrigiert. Konkret wurde ein prozentualer Schwellenwert von 40 % des Maximalwerts der Residuallastdatenreihe festgelegt, was einem Schwellenwert von 28.384 Megawattstunden entspricht.

Diese Anpassung basiert auf der Annahme, dass die Wärmepumpen in Variante 1 bei dem niedrigeren Schwellenwert nicht ausreichend lange in Betrieb sein würden, um den Wärmebedarf des Gebäudes vollständig zu decken. Ein solcher Zustand hätte sich insbesondere in der Simulation durch unzureichende Zonentemperaturen bemerkbar gemacht. Durch die Erhöhung des Schwellenwerts in Variante 2 wird sichergestellt, dass die Wärmepumpen länger aktiv bleiben, um den thermischen Anforderungen des Gebäudes gerecht zu werden.

Da in Variante 2 keine grundlegenden strukturellen Änderungen am Modell vorgenommen wurden und lediglich die Schwellenwerte in den bereits in Variante 1 beschriebenen Regelungsmakros (ABL\_WP\_CTRL\_3 und GEO\_WP\_CTRL\_1) angepasst wurden, wird an dieser Stelle auf eine erneute detaillierte Beschreibung des Modells und der Regelungsmakros verzichtet.

### *Variante 3: Residuallastregelung 40% ohne BHKW*

Die dritte Variante entspricht in der Parametrierung der Regelungsmakros der Wärmepumpen exakt der zweiten Variante. Für die Steuerung der Betriebszustände der Wärmepumpen wurden dieselben Schwellenwerte in den Proportionalreglern definiert. Der einzige Unterschied dieser Variante liegt in der Parametrierung des Regelungsmakros der Blockheizkraftwerke (BHKWs). Mit dieser Variante wurde untersucht, ob eine netzdienliche Regelung der Wärmeerzeuger und die Deckung des erforderlichen Wärmebedarfs auch ohne den Betrieb der Blockheizkraftwerke möglich ist.

Die Überlegung hinter dieser Untersuchung beruht auf der Tatsache, dass die BHKWs die einzigen nicht erneuerbaren Wärmeerzeuger im System von pulsG darstellen und daher vermutlich für den größten Anteil des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes des Systems verantwortlich sind.

Zur Umsetzung dieser Variante wurde das Regelungsmakro, das die Betriebszustände der beiden Blockheizkraftwerke berechnet (BHKW\_CTRL\_1), angepasst. Eine Konstante mit dem Wert 0 wurde als Eingangssignal parametrierung und anstelle der üblichen Regelung basierend auf der Speichertemperatur auf die weiteren Komponenten des Regelungsalgorithmus geführt. Dies bewirkt, dass die Blockheizkraftwerke während des gesamten Simulationsprozesses nicht in Betrieb gehen. Dadurch konnte analysiert werden, ob die verbleibenden Wärmeerzeuger ausreichen, um den Wärmebedarf des Gebäudes zu decken und einen behaglichen Gebäudebetrieb zu gewährleisten.

Die spezifischen Änderungen im Regelungsmakro sind in Abbildung 148 dargestellt.

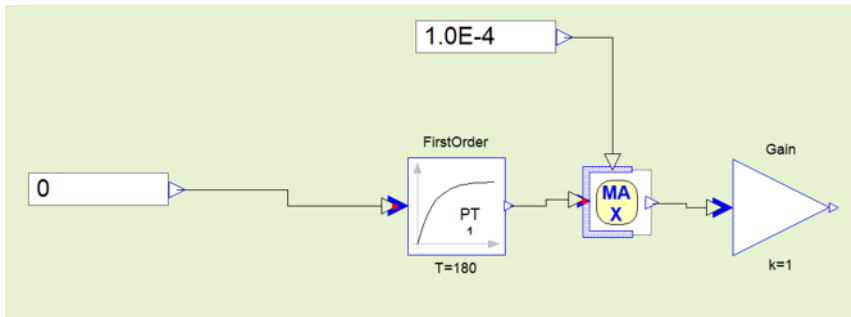


Abbildung 148 Regelungsmakro BHKW\_CTRL\_1 in Variante 3

#### Variante 4: Residuallastregelung 30% WP + BHKW mit Behaglichkeitsberücksichtigung

Da in den drei zuvor beschriebenen Varianten grundsätzlich nicht gewährleistet ist, dass die Behaglichkeitsanforderungen der Nutzer in den Wohnungen zuverlässig erfüllt werden, wurde eine weitere Variante entwickelt. In dieser Variante wurde neben der Residuallast eine zusätzliche Führungsgröße in die Regelungsalgorithmen integriert: die Temperatur in den Zonen der Wohnungen. Diese Temperatur dient als weitere Führungsgröße, die über den Betrieb der Wärmepumpen entscheidet.

Die Einbindung der Zonentemperaturen erfolgt über ein Switch-Objekt (Switch), das anhand der durchschnittlichen Temperatur in den Wohnzonen zwischen den Regelungsalgorithmen umschaltet. Der Betriebszustand der Abluftwärmepumpe und der Erdwärmepumpen wird dabei wie folgt geregelt:

- Temperaturen  $\geq 21\text{ °C}$ : Liegt die durchschnittliche Temperatur in den Wohnzonen bei  $21\text{ °C}$  oder darüber, werden die Wärmepumpen wie in Variante 1 ausschließlich anhand des Signals der Residuallast und des definierten Schwellenwerts, sowie den jeweiligen Speichertemperaturen aus dem Referenzmodell gesteuert.
- Temperaturen  $< 21\text{ °C}$ : Sinkt die durchschnittliche Temperatur in den Wohnzonen unter  $21\text{ °C}$ , erfolgt der Betrieb der Wärmepumpen in Abhängigkeit von den Speichertemperaturen wie im Referenzmodell. Die Wärmepumpen werden solange betrieben, bis die Temperatur in den Wohnzonen wieder auf  $21\text{ °C}$  oder darüber ansteigt.

Diese Regelungsstrategie berücksichtigt somit sowohl die energetischen Bedingungen des Netzsignals als auch die thermischen Anforderungen der Nutzer. Die Details der Implementierung dieser erweiterten Regelung werden noch genauer erläutert.

Durch diese Erweiterung wird die Behaglichkeit der Nutzer in die Regelung der Wärmeerzeuger integriert, wodurch die Abbildung des Anlagenbetriebs realistischer gestaltet wird und besser den tatsächlichen Anforderungen entspricht.

Die abgeänderten Regelungsalgorithmen der Abluftwärmepumpe und der Erdwärmepumpe sind in den Abbildung 149 und Abbildung 148 ersichtlich

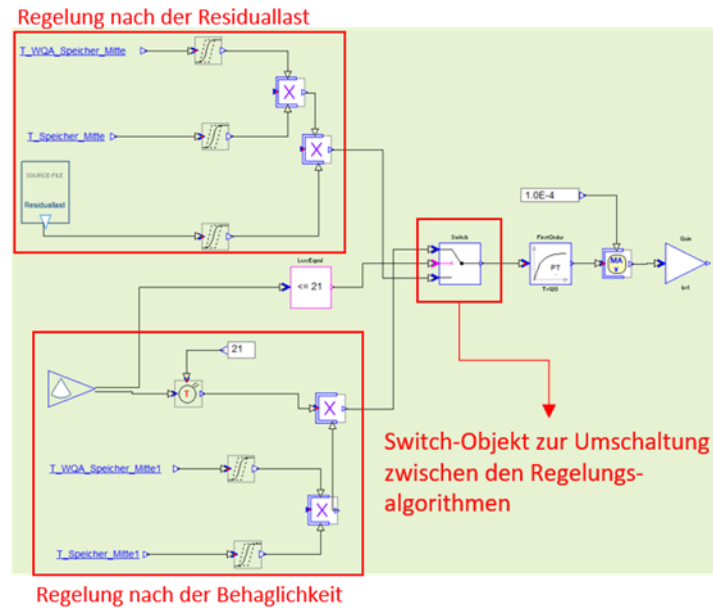


Abbildung 149 Regelungsmakro ABL\_WP\_CTRL\_3 in Variante 4

Die zuvor beschriebene Funktionalität wurde im Regelungsmakro ABL\_WP\_CTRL\_3 mithilfe eines Switch-Objekts umgesetzt. Dieses Objekt ermöglicht die Umschaltung zwischen zwei Regelungsalgorithmen, die den Betrieb der Abluftwärmepumpe im Makro ABL\_WP steuern. Das Switch-Objekt verfügt über drei Eingangssignale: zwei potenzielle Ausgangssignale und ein boolesches Signal, das entscheidet, welches der beiden Eingangssignale durch das Switch-Objekt weitergegeben wird.

Das boolesche Signal, das für die Umschaltung zwischen den Regelungsalgorithmen verantwortlich ist, wird durch ein LessEqual-Objekt erzeugt. Dieses Objekt nimmt als Eingangssignal die durchschnittliche Lufttemperatur der Wohnzonen, die durch einen ZoneSensor gemessen wird. Der Schwellenwert des LessEqual-Objekts wurde auf 21 °C festgelegt. Wenn die durchschnittliche Lufttemperatur in den Wohnzonen unter 21 °C liegt, gibt das LessEqual-Objekt ein FALSE-Signal aus. Dieses Signal wird anschließend an das Switch-Objekt weitergeleitet, das daraufhin das entsprechende Eingangssignal, je nach booleschem Signal weitergibt und somit zwischen den beiden Regelungsalgorithmen umschaltet.

Das Switch-Objekt schaltet je nach Zustand des LessEqual-Objekts zwischen zwei Regelungsalgorithmen um, die in Abbildung 149 dargestellt sind:

1. Regelungsalgorithmus aus Variante 1: Dieser Algorithmus, der in Abbildung 67 an oberer Stelle gezeigt wird, wurde bereits an einem früheren Punkt beschrieben. Er regelt den Betrieb der Abluftwärmepumpe basierend auf zwei Führungsgrößen: den Speichertemperaturen und dem Residuallastsignal. Die Residuallast dient dabei als zweite Entscheidungsgrundlage neben den thermischen Bedingungen in den Wärmespeichern des Makros der Abluftwärmepumpe.
2. Zweiter Regelungsalgorithmus mit Lufttemperatur als zusätzlicher Führungsgröße: Der zweite Algorithmus, der in Abbildung 67 an unterer Stelle dargestellt ist, regelt die Abluftwärmepumpe ebenfalls primär anhand der Speichertemperaturen. Als zusätzliche

Führungsgröße wird jedoch die durchschnittliche Lufttemperatur der Wohnungszonen berücksichtigt. Die Temperaturdaten werden dabei erneut durch den ZoneSensor erfasst und an ein Thermostat-Objekt weitergeleitet. Dieses Thermostat-Objekt vergleicht den aktuellen Temperaturwert mit einer hinterlegten Konstante. Zusätzlich wurde ein Totband mit einer Breite von 1 °C parametrisiert. Liegt die Temperatur innerhalb des Totbandes, bleibt das Thermostat inaktiv. Überschreitet oder unterschreitet die Temperatur jedoch den definierten Schwellenwert, gibt das Thermostat ein Signal von 1 oder 0 aus, das wiederum den Betrieb der Abluftwärmepumpe steuert. Wenn also beide Freigabebedingungen erfüllt sind, einerseits die thermischen Bedingungen der Wärmespeicher und der Lufttemperatur in den Zonen der Wohnungen wird die Wärmepumpe in Betrieb genommen.

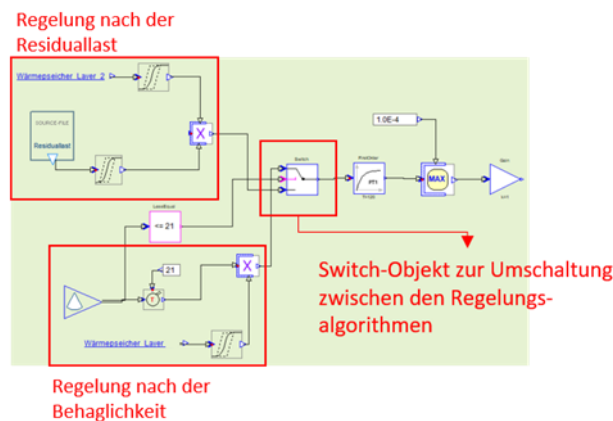


Abbildung 150 Regelungsmakro Erd\_WP\_CTRL\_1 in Variante 4

Das gleiche Regelungsprinzip wie bei der Abluftwärmepumpe wurde auch im Regelungsmakro der Erdwärmepumpen angewendet. Über ein Switch-Objekt wird ebenfalls in Abhängigkeit von der Lufttemperatur als Behaglichkeitsindikator in den Wohnungszonen zwischen zwei Regelungssignalen umgeschaltet.

Analog zum Regelungsalgorithmus der Abluftwärmepumpe wurde der obere Regelungsalgorithmus im Makro der Erdwärmepumpen entsprechend dem bereits in Variante 1 beschriebenen Algorithmus integriert. Dieser Algorithmus, der auch im Referenzfall genutzt wurde, steuert den Betrieb der Erdwärmepumpen anhand der Speichertemperatur im zentralen Wärmespeicher. Als zusätzliche Bedingung dient das Residuallastsignal. Die Wärmepumpen werden aktiviert, wenn die Speichertemperatur den definierten Schwellenwert überschreitet und das Residuallastsignal unter den vorgegebenen Schwellenwert fällt.

Der untere Regelungsalgorithmus im Makro der Erdwärmepumpen ist ähnlich zu dem im Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe beschriebenen Algorithmus gestaltet. Hier wird als Behaglichkeitskriterium die durchschnittliche Raumlufttemperatur der Wohnungszonen verwendet, die durch einen Zonensensor erfasst wird. Dieses Signal wird als Eingangssignal an ein Thermostat-Objekt weitergeleitet. Das Thermostat vergleicht die durchschnittliche Raumlufttemperatur mit einer festgelegten Konstante und berücksichtigt dabei ein Totband, das auf 1 Kelvin parametrisiert wurde. Je nach Wert gibt das Thermostat ein Regelungssignal von 0 oder 1 aus.

Als zweites Freigabekriterium wird, wie im ursprünglichen Referenzmodell, die Speichertemperatur in Schicht 2 des zentralen Wärmespeichers verwendet. Die Wärmepumpen werden aktiviert, wenn beide Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Raumlufthtemperatur liegt unter 21 °C.
2. Die Speichertemperatur in Schicht 2 des zentralen Wärmespeichers liegt unter 45 °C.

Erfüllen beide Kriterien diese Schwellenwerte, wird ein Signal von 1 durch den Multiplikator an das Switch-Objekt weitergegeben.

Die beiden Regelungsalgorithmen sind, wie im Regelungsmakro der Abluftwärmepumpe, über ein Switch-Objekt verbunden. Das Switch-Objekt entscheidet anhand der durchschnittlichen Raumlufthtemperatur der Zonen der Wohnungen, welcher Algorithmus den Betrieb der Erdwärmepumpen steuert:

- Liegt die durchschnittliche Raumlufthtemperatur über 21 °C, wird die Residuallastregelung verwendet.
- Liegt die durchschnittliche Raumlufthtemperatur unter 21 °C, wird der Algorithmus mit Behaglichkeitsberücksichtigung angewendet.

Die kombinierte Nutzung eines Switch-Objekts, des LessEqual-Objekts und des Thermostat-Objekts ermöglicht eine flexible Regelung der Abluftwärmepumpe (Makro ABL\_WP) sowie der Erdwärmepumpen (Makro Erd\_WP) durch zwei parallel aufgebaute Regelungsalgorithmen. Dadurch wird der Betrieb sowohl an die thermischen Bedingungen in den jeweiligen Wärmespeichern, an das Residuallastsignal als auch an die Behaglichkeitsanforderungen in den Wohnungszonen, die durch die Lufttemperatur repräsentiert werden, angepasst.

### 1.2.3.15 Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse aus den dargestellten Modellvarianten abgebildet. Es wird dabei Bezug auf das Referenzmodell aus Abschnitt 2 sowie auf die jeweiligen Untervarianten die in Abschnitt 3 angesprochen wurden genommen. Zur übersichtlichen Darstellung sind die verschiedenen Modellvarianten in Tabelle 33 aufgeführt.

Tabelle 33 Übersicht der Modellvarianten mit Kurzbeschreibung

| Modellbezeichnung   | Anmerkung                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Referenz (Ref)      | Referenzmodell mit konventioneller Regelung                                   |
| Variante 1 (Var. 1) | Residuallastregelung 30% WP mit BHKWs                                         |
| Variante 2 (Var. 2) | Residuallastregelung 40% WP mit BHKWs                                         |
| Variante 3 (Var. 3) | Residuallastregelung 40% ohne BHKW                                            |
| Variante 4 (Var. 4) | Residuallastregelung 30% WP mit BHKW inklusive Behaglichkeitsberücksichtigung |

### **Zonentemperaturen**

Im ersten Schritt der Auswertung der Simulationsergebnisse wurden die Zonentemperaturen für jede Variante überprüft. Diese dienen als Indikator für die Erfüllung der Behaglichkeitskriterien durch die zugrunde liegenden Regelungsalgorithmen. Trotz der in den Varianten 1 bis 4 optimierten Regelungsstrategien stellt ein behagliches Raumklima weiterhin eine grundlegende Voraussetzung für einen qualitativ hochwertigen und effizienten Betrieb der Anlagentechnik dar. Die Analyse konzentriert sich auf die Zonentemperaturen während der Heizperiode, da die vorgenommenen Anpassungen der Regelungsstrategien primär die Wärmeerzeugung betreffen.

#### *Vergleich der Regelungsstrategien*

Im Referenzmodell wird eine konventionelle Regelungsstrategie verwendet, die sich vorrangig an der Speichertemperatur des zentralen Wärmespeichers orientiert. Diese Regelung gewährleistet über den gesamten Simulationszeitraum der Heizperiode eine stabile Einhaltung der vorgegebenen Sollwerte der Zonentemperaturen, wobei ein Mindestwert von 20 °C sichergestellt wird.

In den Varianten 1 bis 3 hingegen wurde die Regelungsstrategie des Referenzmodells durch die Implementierung eines externen Referenzsignals optimiert. Diese Anpassung führte zu einer Reduzierung der Betriebszeiten der Wärmepumpen, wodurch insgesamt eine geringere Wärmemenge bereitgestellt wurde. Die Auswirkungen auf die Zonentemperaturen sind dabei unterschiedlich stark ausgeprägt:

- Variante 1: Die Minimalwerte der Zonentemperaturen betragen 15 °C.
- Variante 2: Die Minimalwerte liegen geringfügig höher bei 16 °C.
- Variante 3: Da hier ausschließlich die Wärmepumpen mit einer netzdienlichen Regelungsstrategie betrieben werden und auf den Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKW) verzichtet wurde, ergeben sich die niedrigsten Minimalwerte mit durchschnittlich 10 °C.

Diese Temperaturabsenkungen sind darauf zurückzuführen, dass durch die Einbindung des externen Referenzsignals in die Regelungsmakros die Betriebsdauer der Wärmepumpen verringert wurde, was zu einer insgesamt reduzierten Wärmeerzeugung führte. Die in den Varianten 1 und 2 weiterhin zur Verfügung stehenden BHKWs haben aufgrund ihrer begrenzten Leistungskapazität nur einen geringen Einfluss auf die Zonentemperaturen. Ihre thermische Leistung reicht nicht aus, um das gesamte Gebäude bedarfsgerecht mit Wärme zu versorgen.

In Variante 3 wird besonders deutlich, dass der alleinige Einsatz von Wärmepumpen unter Berücksichtigung einer netzdienlichen Regelung ohne zusätzliche BHKW nicht ausreicht, um die Wärmeversorgung des Gebäudes sicherzustellen. Infolgedessen sind die Zonentemperaturen in den Varianten 1 bis 3 als zu niedrig einzustufen, sodass das maßgebliche Behaglichkeitskriterium während der Heizperiode nicht durchgehend erfüllt wird.

### Optimierte Regelungsstrategie in Variante 4

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde in Variante 4 eine angepasste Regelungsstrategie implementiert, da bereits im Vorfeld der Simulation angenommen wurde, dass die in den Varianten 1 bis 3 bereitgestellte Wärmemenge für eine zufriedenstellende Beheizung des Gebäudes nicht ausreichen würde.

Der neu entwickelte Regelungsalgorithmus berücksichtigt einerseits weiterhin die Netzdienlichkeit durch das externe Netzsignal, stellt jedoch zusätzlich sicher, dass bei Unterschreitung eines vorgegebenen Zonentemperaturwertes die volle Anlagenleistung aktiviert wird, um die Behaglichkeitskriterien einzuhalten.

Infolgedessen werden in Variante 4 die Zonentemperaturen über den gesamten Heizzeitraum stabil gehalten. Der durchschnittliche Minimalwert der Zonentemperaturen beträgt 20,5 °C und entspricht damit dem des Referenzmodells, womit eine kontinuierliche Einhaltung der Behaglichkeitsanforderungen gewährleistet ist.

### Energieverbräuche

Die Gesamtenergieverbräuche der verschiedenen Modellvarianten sind in Tabelle 34 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die aufgeführten Werte ausschließlich die Energieverbräuche berücksichtigen, die aus der modellierten Anlagentechnik resultieren.

Tabelle 34 Energieverbräuche der verschiedenen Modellvarianten

| Modellvariante | Energieverbrauch [kWh] |        | Elektr. Energieverbrauch [kWh] | Gasverbrauch [kWh] | Energieerzeugung durch PV-Anlage [kWh] |
|----------------|------------------------|--------|--------------------------------|--------------------|----------------------------------------|
|                | Heizung                | Kälte  |                                |                    |                                        |
| Referenz       | 403.241                | 51.991 | 161.462                        | 285.033            | 47.376                                 |
| Var. 1         | 331.773                | 51.931 | 36.032                         | 469.602            | 47.605                                 |
| Var. 2         | 352.616                | 51.952 | 55.092                         | 438.564            | 47.606                                 |
| Var. 3         | 184.962                | 47.771 | 117.864                        | 0                  | 47.603                                 |
| Var. 4         | 398.938                | 51.973 | 50.543                         | 460.575            | 47.608                                 |

Während der Energieverbrauch für die Kühlung der Büroräume sowie die elektrische Energieerzeugung durch die modellierte Photovoltaikanlage über alle Modellvarianten hinweg nahezu konstant bleibt, zeigen sich deutliche Unterschiede im Energieverbrauch für die Beheizung des Gebäudes sowie im elektrischen Energieverbrauch der Anlagentechnik.

Eine Analyse der Werte verdeutlicht, dass die in den Varianten 1 bis 3 implementierten Einschränkungen der Anlagentechnik zur Wärmeerzeugung eine signifikante Reduktion der bereitgestellten Wärmemenge zur Folge haben. Dies führt, wie bereits dargelegt, dazu, dass die

Zonentemperaturen in diesen Varianten nicht auf einem behaglichen Niveau gehalten werden können.

Ein Vergleich des Energieverbrauchs für die Beheizung des Gebäudes zwischen dem Referenzmodell und Variante 4 zeigt hingegen, dass in beiden Fällen eine vergleichbare Wärmemenge erzeugt wurde. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Modellen liegt jedoch im elektrischen Energieverbrauch der Anlagentechnik. Während im Referenzmodell der höchste elektrische Energieverbrauch vorliegt, konnte dieser in Variante 4 trotz gleichbleibender Wärmeherzeugung um etwa 70 % reduziert werden.

Da die einzige Veränderung zwischen den beiden Modellvarianten in der Implementierung einer optimierten Regelungsstrategie besteht, ist diese für die signifikante Einsparung an elektrischer Energie verantwortlich. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass der verringerte Stromverbrauch mit einem erhöhten Einsatz fossiler Energieträger einhergeht, da die in Variante 4 verstärkt genutzten Blockheizkraftwerke (BHKW) zur Wärmeherzeugung primär auf Erdgas angewiesen sind. Dies führt im Vergleich zum Referenzmodell zu einer Erhöhung des Gasverbrauchs um etwa 40 %.

Grundsätzlich zeigt sich in den Varianten 1, 2 und 4 ein erhöhter Gasverbrauch, der auf die verlängerten Betriebszeiten der BHKW aufgrund der veränderten Regelungsstrategien zurückzuführen ist. Dies verdeutlicht, dass eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs durch optimierte Regelungsalgorithmen mit einer Verschiebung des Energiebedarfs hin zu fossilen Brennstoffen einhergeht, was in einer Gesamtbewertung der Effizienz und Nachhaltigkeit der jeweiligen Regelungsstrategie berücksichtigt werden muss.

#### **1.2.3.16 Zusammenfassung**

Die durchgeführte Simulationsstudie ermöglichte eine differenzierte Analyse der Auswirkungen verschiedener Regelungsstrategien auf die Energieverbräuche sowie die thermische Behaglichkeit des betrachteten Gebäudes. Im Fokus standen insbesondere die Implementierung und Bewertung einer netzdienlichen Regelung unter Berücksichtigung der Residuallast sowie die Auswirkungen auf die Betriebsweise der Wärmeherzeuger. Neben den Simulationsergebnissen, stand auch der Modellierungsprozess in der Simulationssoftware IDA ICE im Fokus.

#### **Bewertung der Simulationsergebnisse**

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch eine netzdienliche Regelungsstrategie eine erhebliche Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs möglich ist. In Variante 4 konnte beispielsweise trotz einer vergleichbaren erzeugten Wärmemenge eine Senkung des Stromverbrauchs um ca. 70 % gegenüber dem Referenzmodell erzielt werden. Dies zeigt das Potenzial intelligenter Regelungsalgorithmen zur Effizienzsteigerung der gebäudetechnischen Anlagensysteme. Allerdings geht diese Einsparung mit einer Erhöhung des Gasverbrauchs einher, da der verstärkte Einsatz der BHKWs zur Deckung des Wärmebedarfs beiträgt. Die Analyse zeigt eine Erhöhung des Gasverbrauchs um ca. 40 % im Vergleich zum Referenzmodell.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die unzureichende Behaglichkeitserfüllung in den Varianten 1 bis 3. Durch die Reduzierung der Betriebszeiten der Wärmeerzeuger kam es zu Temperaturabsenkungen in den Zonen, die unter die festgelegten Mindestwerte fielen. Dies verdeutlicht, dass eine reine Optimierung der Netzdienlichkeit ohne gleichzeitige Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit zu erheblichen Komforteinbußen führen kann. Erst in Variante 4 wurde durch die gezielte Anpassung der Regelungsstrategie sichergestellt, dass die Behaglichkeitskriterien in der Heizperiode dauerhaft erfüllt wurden.

### **Erkenntnisse und Optimierungspotenzial**

Trotz der Analysen blieben einige Fragestellungen aufgrund zeitlicher Einschränkungen unbeantwortet. Insbesondere konnte keine detaillierte Untersuchung zur Aufteilung der erzeugten Wärmemengen auf die einzelnen Wärmeerzeuger erfolgen, was neben zeitlichen Gründen auch mit der noch geringen Expertise in der Simulationssoftware zusammenhing. Eine genauere Betrachtung der internen Abläufe der Anlagentechnik hätte wertvolle Erkenntnisse über das Zusammenspiel der verschiedenen Erzeugungskomponenten geliefert und weitere Optimierungspotenziale aufgezeigt.

Zusätzlich wurde die Netzdienlichkeit der Regelungsstrategien nicht abschließend bewertet, da eine systematische Analyse der Netzzrückwirkungen nicht mehr innerhalb des gegebenen Zeitrahmens möglich war. Eine weiterführende Untersuchung in diesem Bereich wäre notwendig, um das volle Potenzial der entwickelten Regelungsstrategien zu bewerten und gegebenenfalls weiter zu verbessern.

### **Ausblick**

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse ergeben sich konkrete Verbesserungsvorschläge für zukünftige Untersuchungen. Eine Validierung der erstellten Modelle mit den vorliegenden realen Messdaten würde die Aussagekraft der Simulationsergebnisse weiter erhöhen und mögliche Abweichungen zwischen Modell und Realbetrieb aufzeigen. Zudem ist eine genauere Validierung der Bauteildaten, insbesondere hinsichtlich der thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle, empfehlenswert, da diese wesentliche Einflussfaktoren auf das Gesamtmodell darstellen. Ob ein Validierungsprozess auf Ebene des Gebäudemodells stattgefunden hat, war nicht endgültig nachvollziehbar.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die durchgeführten Simulationen wertvolle Erkenntnisse über die Auswirkungen verschiedener Regelungsstrategien, sowie deren Modellierungsprozess in der Simulationssoftware IDA ICE liefern konnten. Insbesondere die Möglichkeiten zur Einsparung elektrischer Energie durch netzdienliche Regelungen wurden aufgezeigt, jedoch auch deren Grenzen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit. Für eine umfassende Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen sind jedoch weiterführende Analysen sowie weitere Anpassungen in den Modellen notwendig, um eine ausgewogene Balance zwischen Energieeffizienz, Behaglichkeit und Netzdienlichkeit zu erreichen und die Thematik weiterhin realitätsnah untersuchen zu können.

### 1.2.3.17 Building User Modeling (BUM)

(HM)

Wie im Antrag des Projekts beschrieben soll hierbei der Einfluss des Nutzers auf den Energieverbrauch abgebildet werden. Der Nutzer an sich soll dabei direkt in den Energieverbrauch des Gebäudes einbezogen werden, um hier die Auswirkungen für die Minimierung der extern zugeführten Energie zu bewerten.

#### Nutzerdefinition

Nutzer sind dabei in verschiedene Nutzergruppen einzuteilen. Während der Großteil des Energieverbrauchs im untersuchten Objekt durch die Nutzer in den Wohnungen entsteht, wie die vorangegangenen Arbeitspakete gezeigt haben stellen auch die Büroeinheiten sowie das FM eine zu betrachtende Nutzergruppe dar.

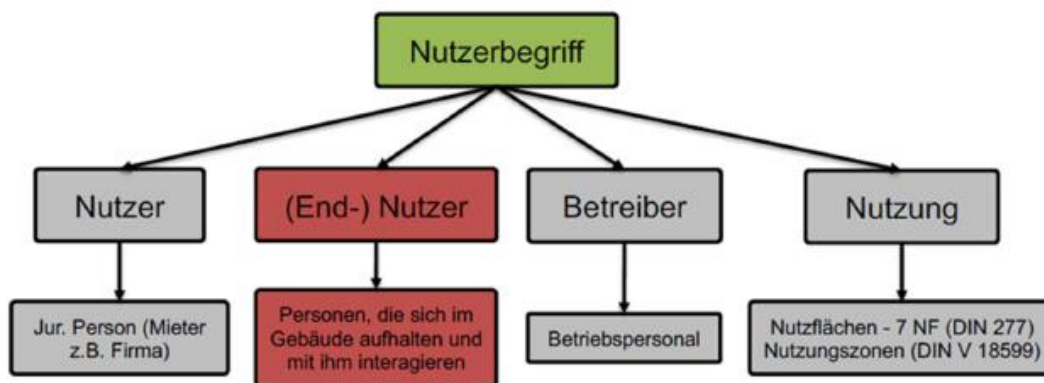


Abbildung 151 Nutzerbegriffe [32]

„Der Begriff "Nutzer" bezeichnet dabei verschiedene Gruppen von Personen oder Organisationen, die eine Immobilie oder einen Raum für unterschiedliche Zwecke nutzen können. Diese Gruppen können juristische Personen wie Unternehmen oder Mieter, aber auch kleinere Firmen sein.

Der Begriff "Endnutzer" beschreibt hingegen Personen, die sich in einem Gebäude oder Raum aufhalten und mit ihm interagieren. Hierzu können beispielsweise Kunden, Besucher oder auch Mitarbeiter zählen.

Der Begriff "Betreiber" bezieht sich auf das Personal, das für den reibungslosen Betrieb und die Wartung einer Immobilie oder eines Raums verantwortlich ist. Hierzu können beispielsweise Hausmeister, Reinigungspersonal oder Sicherheitskräfte zählen.

Der Begriff "Nutzung" beschreibt die unterschiedlichen Arten von Flächen und Zonen innerhalb einer Immobilie oder eines Raums, die für verschiedene Zwecke genutzt werden können. Hierzu können beispielsweise Wohnbereiche, Geschäftsbereiche, Lagerflächen oder Parkplätze zählen.“ [32]

Wie bereits im Vorgängerprojekt EQ-Net I (FKZ: 03ET1299) beschrieben haben die Nutzer einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und der gesamten Energieeffizienz für den Gebäudebetrieb. Dieser Aspekt ist für die Betrachtung des Projekts, um den Einfluss der Netzdienlichkeit zu erweitern. Zunächst sollte dabei die Unterscheidung in die Verschiedenen Arten der Nutzer vorgenommen, werden, welche sich im Projekt befinden. Dabei ist das Gros der Nutzer in den 66 Wohnungen vorhanden, welche unterteilt sind in die folgenden Wohnungsgrößen:

1. 1-Zimmerwohnungen (15)
2. 2-Zimmerwohnungen (22)
3. 3-Zimmerwohnungen (22)
4. 4 Zimmerwohnungen (7)

Ergänzend dazu liegen noch mehrere Büroeinheiten vor, welche durch den Einbezug in das System einen Einfluss auf die Gebäudebilanz ausweisen, jedoch im Gesamtkontext keine Übergeordnete Rolle beim Energieverbrauch der Heizung darstellen. Die Energieverbräuche hierbei sind dabei durch die quantitativ stark erhöhten Wohnungen zu benennen. Die Gewerbeeinheiten verfügen zusätzlich zu der Wohnung versorgenden Heiznetz über einen Anschluss an das Kühlnetz des Gebäudes, welches das Grundwasser als Wärmesenke nutzt.

Um hier den Nutzern eine Sichtbarkeit der Energieverbräuche zu ermöglichen, wurde daher eine Nutzervisualisierung auf Basis der Datenbank etabliert, welche die Daten der Jahre 2022-2024 beinhaltet. Diese wird aus der Übergeordneten Datenbank des AP 1 (Monitoring und Qualitätssicherung) gespeist und wurde allen Nutzergruppen zur Verfügung gestellt. Ziel dieser war es den Nutzern direkt den Energieverbrauch im Verhältnis zum Verbrauch der letzten Jahre zu Visualisieren und somit den Einfluss der Kenntnis des Energieverbrauchs auf das Nutzerverhalten zu quantifizieren.

Zunächst gilt es jedoch die Interaktion des Nutzers mit den verschiedenen Systemen zu erläutern. Nutzer interagieren zunächst passiv auf ihre Umgebung, in der sie Abwärme in die Räume abgeben, welche dann positiv auf den Energieverbrauch des Gebäudes auswirkt. Damit treten bereits ohne aktiven Eingriff in das System Nutzereingriffe auf.

Die aktiven Eingriffe des Nutzers (Öffnung der Fenster, Anpassung der Raumregelung, ...) weisen jedoch einen stärkeren Eingriff auf das Gesamtsystem auf. In den Wohngebäuden kann dabei dieser aktive Eingriff auf mehrere Handlungen erfolgen.

- Anpassung der Raumtemperatur
- Nutzung der Sanitären Anlagen: Dabei stellt die Warmwassertemperatur, welche komfortbedingt angepasst werden kann eine wichtige Stellgröße dar. Durch den Anstieg der Warmwassertemperatur einzelner Verbraucher steigt der Endenergiebedarf des gesamten Gebäudes. Die Warmwassertemperatur wird darüber hinaus auch durch hygienische Belange definiert.
- Öffnung des Fensters/Fensterlüftung: Primär dient das Fenster in Wohngebäuden, welche in der Regel nicht über eine aktive dauerhafte Be- und Entlüftung verfügen zur Verbesserung des Raumklimas und der Abfuhr von Schadstoffen. Durch die Dauer der Fensteröffnung wird dabei der Endenergiebedarf beeinflusst.
- Nutzung von elektrischen Geräten: Durch die Nutzung von elektrischen Geräten (Backöfen, Beleuchtung, Fernseher, ...) entsteht eine Abwärme der Nutzer, welche

sich je nach Nutzungsdauer stärker auf den Energieverbrauch auswirkt. Bei einer intelligenten Nutzung der Abwärme von Backöfen kann damit in den Wintermonaten die Endenergiemenge reduziert werden.

All diese Eingriffsarten wären dabei dem Nutzer zu visualisieren um die Interaktion sowie die Auswirkungen klar zu beschreiben, was jedoch in der Praxis nicht darstellbar ist.

### **Aufbau Visualisierung**

Die Visualisierung nutzt dabei die bestehende Datenbank, welche im Projekt sowie im AP 1 detailliert beschrieben ist. Auf eine Erläuterung des Aufbaus der Datenbank wird an dieser Stelle verzichtet, da dies in den dafür zugehörigen Seiten (Seite 9 ff.) erfolgt ist. Dabei sollen die Nutzer über die verschiedenen Energiesparten, welche in der Datenbank aufgeführt sind, sowie die Jährlichen sowie Stündlichen Verbräuche der folgenden Sparten informiert werden:

- Gasverbrauch
- Wärmeverbrauch und Erzeugung
- Stromverbrauch und Erzeugung
- Wasserverbrauch

Diese Werte werden dabei in verschiedene Messreihen aufgegliedert, um eine einfache Differenzierung anhand der Energie und Leistungsdaten sowie weiteren Messdaten zu ermöglichen. Neben den reinen Energieverbräuchen und Energieerzeugungsdaten wurden auch den Sparten zugeordnete Daten je Wohneinheit visualisiert. Diese Daten je Wohneinheit wurden um die für alle Wohneinheiten zentralen Daten der Energiezentrale erweitert. Damit wurde den Nutzern ermöglicht die Daten sowohl für den durch sie Bewohnten Bereich zu erfassen, aber auch den Gesamten Energieverbrauch des Gebäudes zu erfassen. Auf eine datenschutzkonforme Zuweisung wurde geachtet.

Das genaue Messkonzept, welches als Basis der Visualisierung diente wurde dabei im Vorgängerprojekt +EQ-Net (FKZ: 03ET1299) [33] bereits erarbeitet und dient als Basis der Visualisierung.

Insgesamt wurden in dem Gebäude 357 Energiezähler und Sensoren verbaut, die sich wie folgt aufteilen:

- 195 Stromzähler
- 85 Wärmemengenzähler
- 2 Gaszähler
- 75 Wasserzähler

„Das Nutzerverhalten soll über Energiezähler in den jeweiligen Nutzungseinheiten ermittelt werden. In den Wohnungseinheiten gibt es jeweils vier Energiezähler. Die Zähler sollen den Kaltwasserverbrauch, den Wärmeverbrauch, den Gesamtstromverbrauch und den Stromverbrauch des Hybrid-Trinkwarmwasser-Bereiters messen. Diese Verbräuche sollen auch in den Gewerbeeinheiten gemessen werden. Zusätzlich sollen in den Gewerbeeinheiten noch zwei weitere Stromunterzähler verbaut werden, um den Stromverbrauch für Beleuchtung und

Raumluftechnik messen zu können. Aus der Differenz der drei Unterzähler und dem Gesamtstromzähler kann der Nutzerstrom bestimmt werden. So kann ein detaillierter Einblick gewonnen werden, zu welchem Zweck die Nutzer den Strom verbrauchen.

Um die einzelnen Erzeugungsanlagen analysieren zu können, werden jeweils die der Anlage zugeführte Energiemenge/n und die erzeugte Energiemenge/n gemessen. Am Beispiel eines BHKW sind dies die zugeführte Gasmenge und die erzeugte elektrische und thermische Energie.“ [33]

Die im Vorgängerprojekt bereits erläuterten und untersuchten Zähleranforderungen, welche als Basis der Messdatenerfassung dienen sind dabei in der Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35 Daten Energiezähler [33]

| Energiezähler                  | Messintervall in Wohnungen/Ge-<br>werbe | Messintervall in Energie-<br>zentrale |
|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| WMZ, Energie                   | 15-minütlich                            | 5-minütlich                           |
| WMZ, VL/RL Tempera-<br>tur     | 15-minütlich                            | 5-minütlich                           |
| WMZ, Volumenstrom              | 15-minütlich                            | 5-minütlich                           |
| WMZ, aktuelle Leistung         | 15-minütlich                            | 5-minütlich                           |
| Strom, Energie                 | 5-minütlich                             | 5-minütlich                           |
| Strom, Leistung                | 5-minütlich                             | 5-minütlich                           |
| Strom, Frequenz                | 5-minütlich                             | 5-minütlich                           |
| Strom, Spannung                | 5-minütlich                             | 5-minütlich                           |
| Kaltwasserzähler, Volu-<br>men | 15-minütlich                            | ---                                   |

Das Abbildung 152 in dargestellte Strangschemata zeigt die finale Version des entwickelten Messkonzepts.

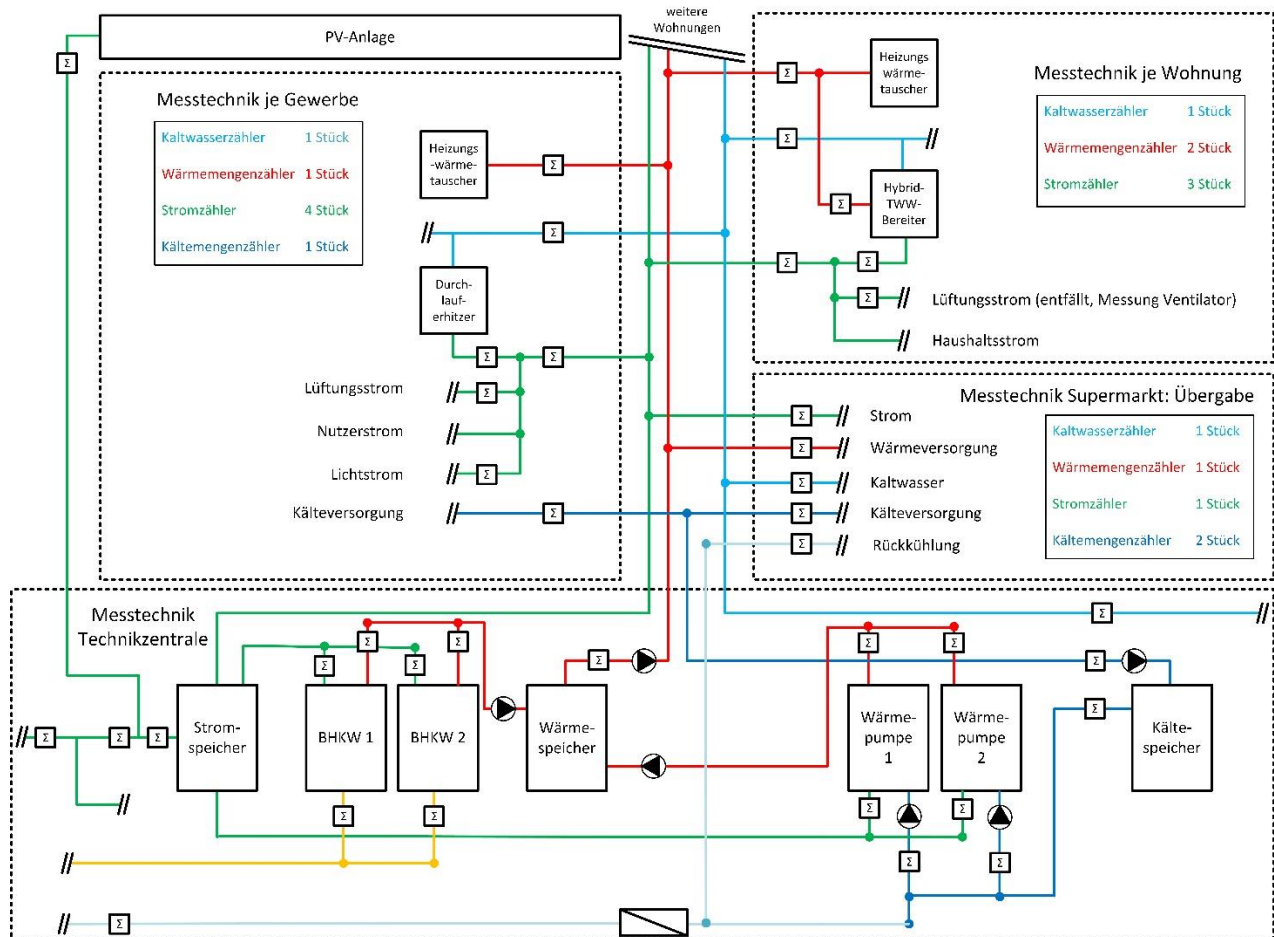


Abbildung 152 Messpunkte Datenbank zur Visualisierung [33]

Die verschiedenen Messdaten wurden dann entsprechend den Wohnungen gruppiert, wobei für die Verbrauchswerte der Wohnungen die primären Zähler herangezogen wurden und auf eine Berücksichtigung der Unterzähler (Lüftungsstrom, Hybrid WWB-Bereitung) verzichtet wurde. Dies wurde analog in den Gewerbeeinheiten durchgeführt, um hier eine zu feingliedrige Visualisierung zu verhindern, da der Energieverbrauch je Nutzungseinheit zu sehen ist.

Damit können je Wohnung die in Tabelle 36 folgenden Messdaten visualisiert werden:

Tabelle 36 Messdatenauflistung Visualisierung je Wohnung

| Messdatenart | Beschreibung                     | Einheit |
|--------------|----------------------------------|---------|
| Wärme        | Wärmeleistung                    | kW      |
| Wärme        | Energie                          | kWh     |
| Wärme        | Gesamtenergiemenge (Zählerstand) | kWh     |
| Strom        | Leistung                         | kW      |
| Strom        | Stromverbrauch                   | kWh     |
| Strom        | Gesamtenergiemenge (Zählerstand) | kWh     |
| Wasser       | Volumenstrom                     | m³/h    |
| Wasser       | Gesamtverbrauch (Zählerstand)    | m³      |

Dies wird um die Messtechnik der Technikzentrale (Tabelle 37) erweitert, welche neben den zentralen gesammelten Werten des Gesamten Gebäudes noch zusätzlich die Speichertemperaturen der Wärmespeicher enthält, welche dann als Basis der prozentualen thermischen Beladung gesehen werden können, um den Nutzern den Zustand der Beladung zu Symbolisieren.

Tabelle 37 Messdatenauflistung Technikzentrale

| Messdatenart | Beschreibung                    | Einheit |
|--------------|---------------------------------|---------|
| Wärme        | Wärmeleistung Wärmepumpe + BHKW | kW      |
| Wärme        | Energiemenge Wärmepumpe + BHKW  | kWh     |
| Strom        | Leistungsbedarf Technikzentrale | kW      |
| Strom        | Stromverbrauch Technikzentrale  | kWh     |
| Strom        | Stromerzeugung BHKW             | kW      |
| Strom        | Stromerzeugung BHKW             | kWh     |
| Strom        | Erzeugung PV-Anlage             | kW      |
| Strom        | Energiemenge PV-Anlage          | kWh     |
| Strom        | Ladezustand Batteriespeicher    | %       |
| Gas          | Gasverbrauch                    | kW      |
| Gas          | Gasverbrauch (Zählerstand)      | kWh     |

Exemplarisch möchten wir dies für den Zeitraum Juni-Juli 2024 in der untenstehenden Abbildung 153 darstellen, welche die zentrale Anlagentechnik und die Stromerzeugung in dem Zeitraum durch die PV-Anlage darstellt.

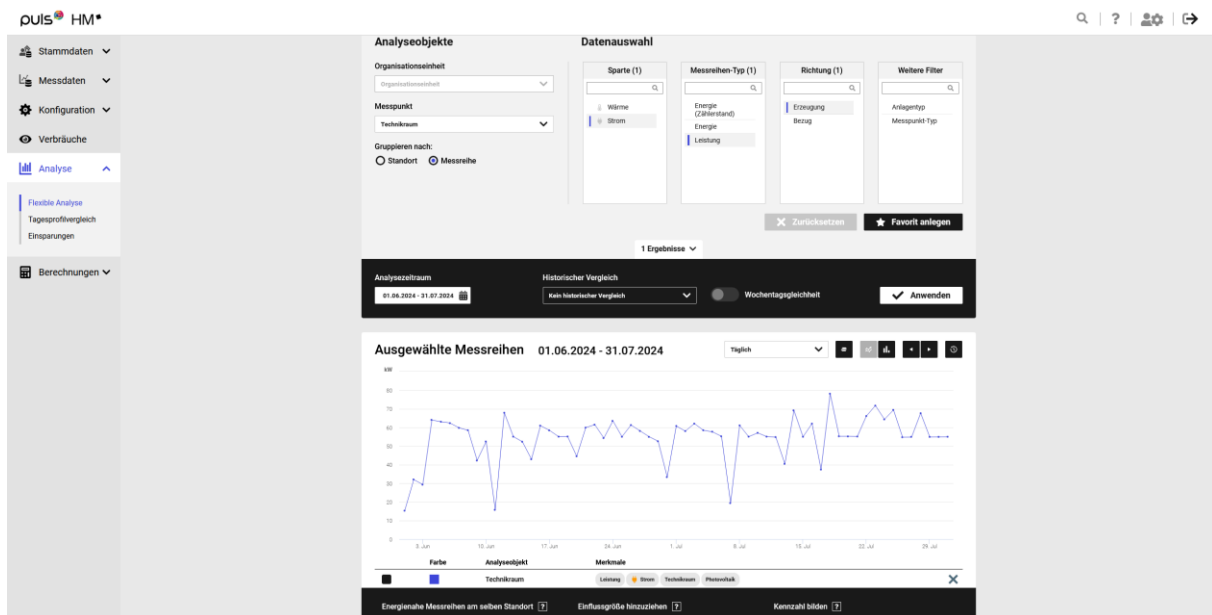


Abbildung 153 Darstellung Stromerzeugung Visualisierung

### **Bewertung Nutzereinfluss**

Aufgrund der unerwartet niedrigen Teilnahme der Nutzer (11 Teilnehmer), welche sich darüber hinaus auf diverse Wohnflächengrößen sowie Hüllflächenanteile aufteilen können diese nicht direkt miteinander verglichen werden, um den Nutzereinfluss als ein einzelnes zu differenzierbares Ergebnis zu quantifizieren und die verschiedenen Wohnungen miteinander zu vergleichen.

## 1.2.4 AP4 – Geothermie

### 1.2.4.1 Auswertung Monitoring des geothermischen Systems

(THN)

#### Aufbau der Großkollektoranlage

Unterhalb des Gebäudes puls<sup>G</sup> wurde mithilfe von 13 EWK, die eine Entzugsfläche von ca. 2.100 m<sup>2</sup> aufspannen, eine GKA errichtet. Die Verteilung der einzelnen EWK zum Gesamtsystem sowohl schematisch als auch als Foto während der Einbauphase ist in der Abbildung 154 zu sehen.

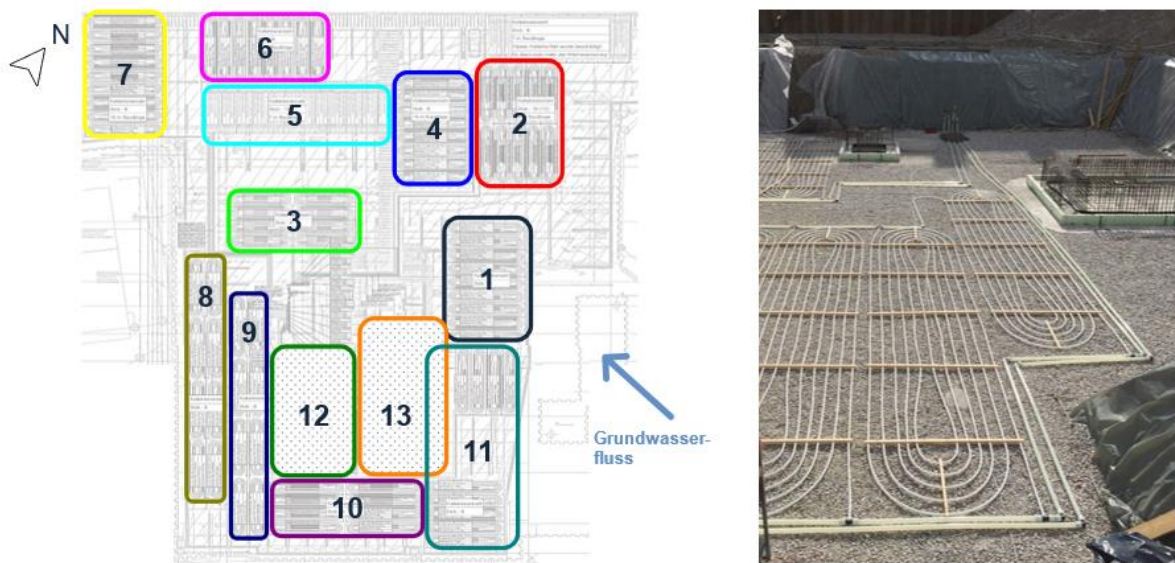


Abbildung 154 Verteilung der EWK der GKA (schematisch und Foto bei Einbau)

Die EWK sind an verschiedenen Positionen der Grundfläche als auch in verschiedenen Einbautiefen eingebracht. Die EWK 12 und EWK 13 sind auf einer größeren Tiefe – gemessen von der Geländeoberkante – installiert als die restlichen EWK. Grund ist der Aufzugschacht, sodass diese zwei EWK auf einer Tiefe von -7,93 m unterhalb der Höhenkote Fußboden liegen. Die restlichen elf EWK befinden sich im Schnitt in einer Tiefe von -4,54 m unterhalb der Höhenkote Fußboden. Die EWK sind in der Sauberkeitsschicht des Gebäudes eingebettet und mit Einkornbeton eingegossen. Darüber wird das übliche Gebäudefundament aufgebaut. Einkornbeton ermöglicht über seine Grobporigkeit eine Wasserdurchlässigkeit und damit einen Kontakt zwischen EWK und Grundwasser.

Wie in der Abbildung 154 zusätzlich illustriert, liegt im Gelände ein Grundwasserfluss aus westlicher Richtung vor. Entsprechend sind gewisse EWK im direkten Anströmbereich (z.B.: EWK 1, 2, 11) und andere EWK eher im verschatteten Bereich (z.B.: EWK 8, 9).

Nachdem der lokale Grundwasserfluss einen erheblichen Beitrag für die Regeneration der GKA leistet, die EWK durch den Verbau bezüglich Niederschlag und Sonneneinstrahlung jedoch abgeschottet sind, ist dieser Einfluss sehr genau im weiteren zu analysieren.

### **Grundwasserfluss um den Karl-Lederer-Platz in Geretsried**

Um den Karl-Lederer-Platz in Geretsried, an welchen das Gebäude puls<sup>G</sup> errichtet wurde, wurden von der Firma DHI WASY GmbH im Auftrag der Stadt Geretsried mehrere Grundwassermessstellen eingerichtet. Hintergrund für diese Maßnahme der Stadt Geretsried ist die Untersuchung der Auswirkungen aktueller Baumaßnahmen am Karl-Lederer-Platz auf das Grundwasser. Aufgrund eines niedrigen Grundwasserverlaufs in Geretsried beeinflussen Baumaßnahmen diesen sehr stark. Zudem wurde ein Düker am Karl-Lederer-Platz eingebaut, um die Beeinflussung des Grundwassers abzumildern. So wurden um den Karl-Lederer-Platz in nächster Umgebung zum Gebäude puls<sup>G</sup> sechs Grundwassermessstellen errichtet, die seit 06.04.2017 regelmäßig Messdaten liefern. Nach Absprache mit DHI WASY GmbH und der Zustimmung der Stadt Geretsried konnte die THN Zugriff auf die Messdaten erhalten, was für die Untersuchung der geothermischen Anlage unterhalb von puls<sup>G</sup> essenziell ist.

Die Verteilung der fünf Messstellen um das Gebäude puls<sup>G</sup> ist in Abbildung 155 ersichtlich. In der Darstellung sind die Messstellen durchnummeriert von MP01 (Messpunkt 01) bis MP06 (Messpunkt 06). Das Gebäude puls<sup>G</sup> ist farblich hervorgehoben. Im Unterschied zu den anderen Messstellen fehlt die Messstelle MP05. Aufgrund von Bauarbeiten wurde dieser Messpunkt beschädigt bzw. zerstört, sodass diese seit Herbst 2019 keine Messdaten mehr liefert.

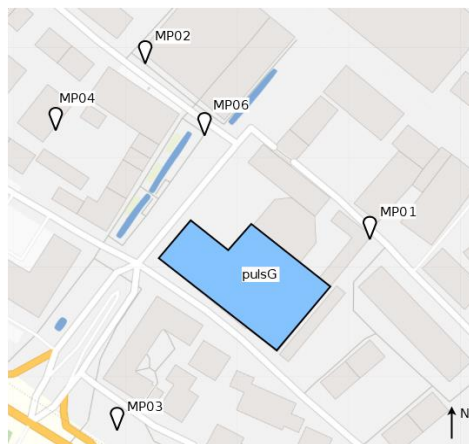


Abbildung 155 Grundwassermessstellen um das Gebäude puls<sup>G</sup> (ohne MP05)

Der Grundwasserverlauf in der Nähe des Gebäudes puls<sup>G</sup> wird durch ein sogenanntes Dükersystem beeinflusst, um eine Veränderung der Pegelmessstände außerhalb der behördlich zulässigen Bereiche zu vermeiden. Nach Voruntersuchungen vor der Bauphase wäre eine Anstauung des Grundwassers im Anströmbereich vor dem Gebäude puls<sup>G</sup> und einen Abfall des Pegelmessstandes nach dem Gebäude zu erwarten. Diese Veränderung würde im Anströmbereich die umliegenden Bestandsgebäude gefährden, sodass im schlechtesten Falle mit einem Eindringen von Grundwasser in die umliegenden Kellerräume zu rechnen gewesen wäre. Um eine Abmilderung zu schaffen, ist um den Grundriss des Gebäudes ein Dükersystem verbaut worden. Der schematische Aufbau des Dükersystems ist in Anhang A.5 dargestellt.

Wie im schematischen Aufbau dargestellt, verläuft in hellblauer Farbe ein geschlitztes Horizontalfilterrohr um den Grundriss des Gebäudes puls<sup>G</sup>. Über die Schlitze wird das Grundwasser im Anströmbereich (im Schema unten) im Horizontalfilterrohr auf einer Höhe von 592,84 m ü. NN zusammengeführt und in Sammelschächte geführt. Mithilfe von Dükerrohren

(dunkelblau, gestrichelt) wird das Grundwasser unterhalb des Gebäudes in Richtung der Horizontalrohre (im Schema oben) geleitet. Die Funktionsweise eines Dükersystems basiert auf dem physikalischen Prinzip der kommunizierenden Röhren, sodass keine Hebeanlagen oder Pumpensysteme nötig sind. Weiterhin ist aufgrund der hohen Einbaulage des Horizontalfilterrohres (592,84 m ü. NN) keine negative Beeinflussung der GKA zu erwarten, da diese unterhalb des ersten Untergeschosses auf einem niedrigeren Niveau liegen (592,58 m ü. NN bis 592,08 m ü. NN). Damit ist davon auszugehen, dass der Einfluss des Grundwassers auf die GKA weiterhin signifikant ist.

#### *Temperaturen des Grundwassers bei Grundwassermessstellen*

Die Aufzeichnungen des Temperaturverlaufs der Messstellen seit Messbeginn am 06.04.2017 ist in Abbildung 156 verdeutlicht.

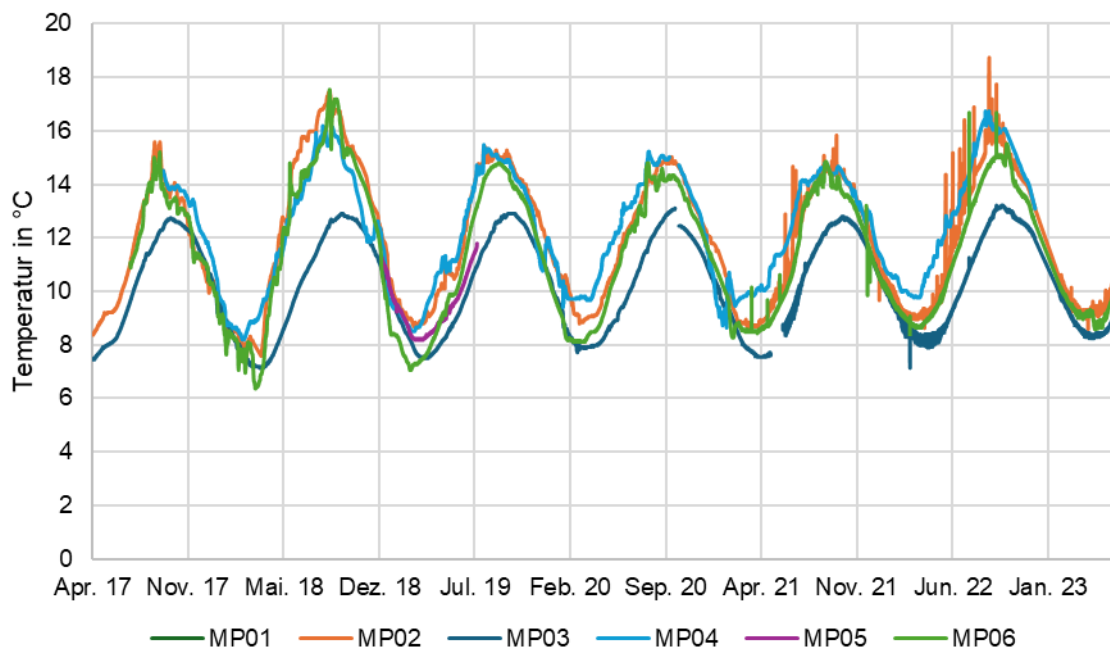


Abbildung 156 Temperaturverlauf des Grundwassers an den Messstellen

Wie im Diagramm zu erkennen, folgen die Temperaturverläufe der verschiedenen Grundwassermessstellen einem periodischen Verlauf. Die Minimal- und Maximalwerte schwanken über den mehrjährigen Verlauf zwischen ca. 7 °C und 15 °C. Besonders auffällig sind die höheren Temperaturen bei den Messstellen MP02, MP04 und MP06. Wie bereits erwähnt, stoppt die Aufzeichnungen von MP05 im Herbst 2019 aufgrund einer Beschädigung der Messsonde. Auch gab es nach Januar 2023 von der Stadt Geretsried keinen weiteren Auftrag an DHI WASY GmbH die Daten weiter auszuwerten. Damit endete auch die Messkampagne. Für die weiteren Arbeiten im Zusammenhang mit dem Grundwasserfluss wird auf Daten vor 2023 zurückgegriffen. Nachdem ein Grundwasserfluss ein sehr träges System ist, wie über das sehr periodisch gleichmäßige Verhalten z.B. der Grundwassertemperaturen gezeigt ist, können diese Daten für die weiteren Untersuchungen für eine hinreichende Genauigkeit verwendet werden.

Legt man die Temperatur des Grundwassers (hier beispielhaft mit MP03 gezeigt) und den Verlauf der Außentemperatur übereinander, so ergibt sich im Zeitraum Januar 2022 bis Dezember 2022 folgendes Abbildung 157.

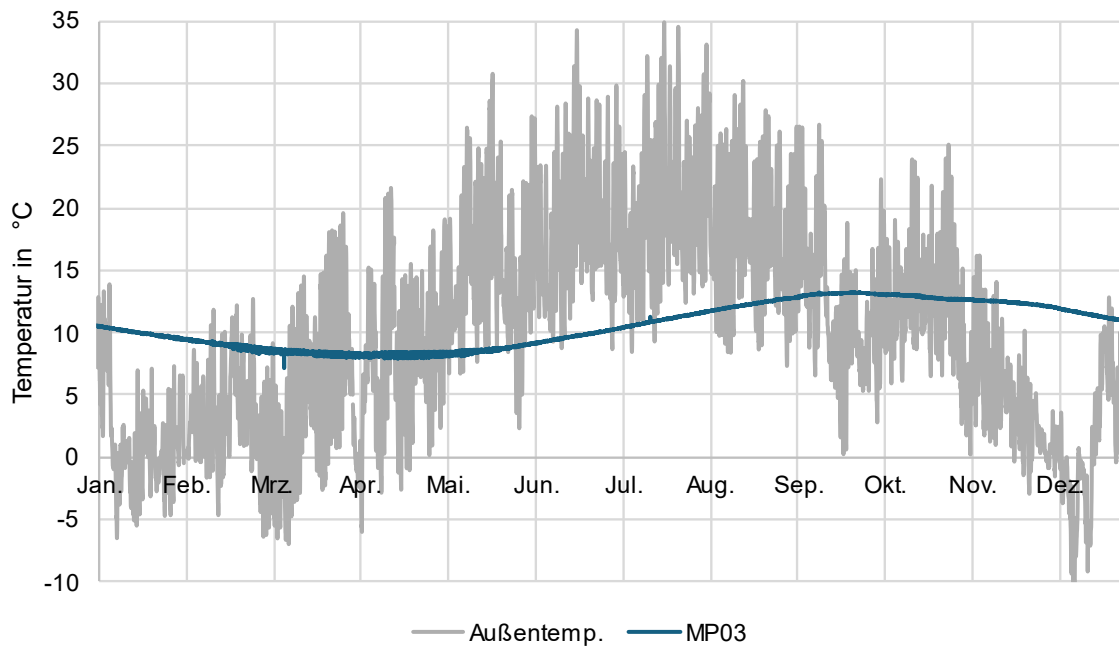


Abbildung 157 Verlauf Außentemperatur zu Grundwasser im Jahr 2022

Beide Verläufe verhalten sich wie harmonische Schwingungen, welche jedoch zueinander verschoben sind. So erreicht die Außentemperatur in den Sommermonaten (Juli) ihren Höhepunkt, wohingegen die Grundwassertemperatur erst Mitte September ihr Maximum übersteigt. Die Verschiebung beträgt damit ca. 2 Monate.

### Analyse der einzelnen Kollektorstränge

Wie bei der Darstellung der Einbausituation der EWK bereits angedeutet, befinden sich einige EWK im direkten Anströmbereich des Grundwasserflusses, wohingegen wiederum andere eher „im Schatten“ dazu liegen. Die Auswirkungen in der spez. Entzugsleistung der jeweiligen Stränge sind für das Jahr 2021 in Abbildung 158 abgebildet.

Über eine horizontale Linie ist die durchschnittliche Entzugsleistung in diesem Betrachtungszeitraum angedeutet. Diese beträgt 66,02 kWh/m<sup>2</sup>. Deutlich zeigt sich, dass die EWK 8 bis EWK 12 unterdurchschnittlich performen als die restlichen EWK. Dies kann eine Auswirkung der Positionierung der EWK zum Grundwasserfluss sein.

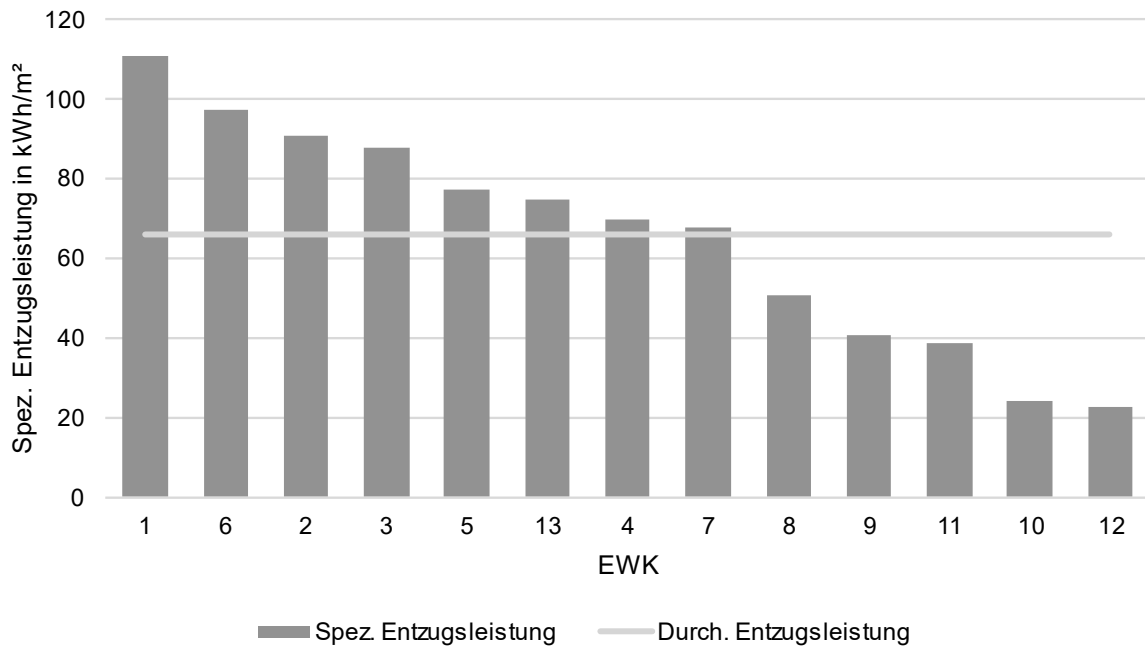


Abbildung 158 Durchschnittliche und spezifische Entzugsleistung der GKA im Jahr 2021

Des Weiteren lässt sich als weitere Ursache die Höhe der durch die einzelnen Stränge strömenden Massenströme des Wärmeträgermediums identifizieren. Hierzu werden die monatlichen, durchschnittlichen Massenströme der einzelnen EWK über einen Messzeitraum von einem Jahr von Januar 2021 bis Dezember 2021 analysiert (vgl. hierzu Abbildung 159).

Es ist deutlich zu erkennen, dass im Jahresverlauf gewisse EWK (vornehmlich 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 13) einen höheren Massenstrom aufweisen als die EWK 8, 9, 10, 11 und 12 (im Diagramm grau hinterlegt). Dies geht mit der Beobachtung einher, dass genau diese EWK mit einem höheren Massenstrom eine höhere spezifische Entzugsleistung aufzeigen. Dieser Zusammenhang wird bei Vergleich der spezifischen Entzugsleistungen im selben Betrachtungszeitraum deutlich wie in Abbildung 158 bereits dargestellt.

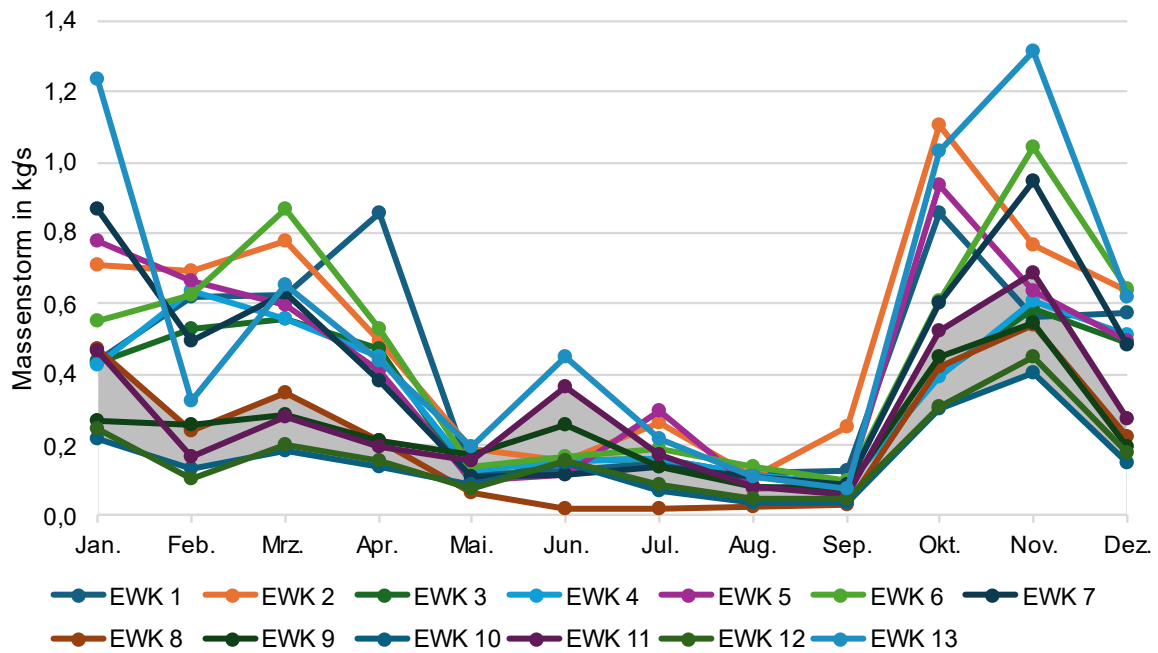


Abbildung 159 Durchschnittliche, monatliche Massenströme der einzelnen EWK im Jahr 2021

Mithilfe einer Anpassung der Durchströmungsverhältnisse durch die einzelnen EWK-Stränge werden voraussichtlich höhere spez. Energieentzüge auch bei den EWK erzielt, die bisher einen nur untergeordneten Beitrag leisten. Der gesamte Energieentzug der GKA kann damit erhöht werden.

Diese Optimierung soll mithilfe einer simulativen Modellierung der GKA in einem validierten Simulationsprogramm für hygrothermische Untersuchungen erfolgen. Es können damit Grenzen der realen GKA abgeleitet werden. Des Weiteren sind simulative Analysen zu tätigen, die mithilfe optimierter Durchströmungsbedingungen erreichen, dass der gesamte spez. GKA-Entzug sich steigert.

Ausgehend davon ist ein Regelalgorithmus zu entwickeln. Dieser soll in einem weiteren Schritt über die Gebäudeleittechnik auf speziell hierfür eingebaute elektrisch ansteuerbare Regelventile an den einzelnen EWK-Strängen implementiert werden. Damit lassen sich aus den Erkenntnissen der simulativen Untersuchung diese in die reale Anlage übertragen. Die Entwicklung der spez. Entzugsenergie der GKA ist anschließend zu bewerten.

### 1.2.4.2 Rechnergestützte Analyse des geothermischen Systems

(THN)

#### Simulationsprogramm DELPHIN

**DELPHIN** ist ein lizenziertes, closed-source Simulationsprogramm für Wärme-, Feuchte- und Stoffübertragung, welches von der Technischen Universität Dresden entwickelt und fortlaufend weiterentwickelt wird. Es ist in C++ geschrieben und kann über eine XML-Schnittstelle automatisiert werden. Die Berechnung der finiten Volumen kann instationär durchgeführt werden. Ursprünglich ist DELPHIN für die Simulation von Gebäudehüllen verwendet worden. Da aus einer physikalischen Sicht der Energietransport in einer Gebäudehülle übertragbar auf den Energietransport in einem Erdreich ist, eignet sich DELPHIN auch für die Simulation von EWK. Im Laufe der Zeit ist das Simulationswerkzeug sukzessive für die Simulation von EWK optimiert worden, indem beispielsweise Messergebnisse der Projekte +Eins (FKZ: 0327431R, 2010), EnVisaGe-Plus (FKZ: 03ET1465, 2017), ErdEis II (FKZ: 03ET1634, 2019) und KNW-Opt (FKZ: 03EN3020, 2020) in die Entwicklung eingeflossen sind. Dies resultiert darin, dass sich DELPHIN mittlerweile als Standardwerkzeug für die Simulation von EWK etabliert hat.

#### Erstellung des Simulationsmodells

Als erstes ist eine dreidimensionale Matrix zu erstellen. Mit dieser Matrix wird die Geometrie festgelegt, die von der Bodenzusammensetzung, der Grundwasserhöhe, der -richtung sowie der Gebäudegeometrie vorgegeben wird.

Zur Ermittlung der **Bodenzusammensetzung** sind vier Bohrstellen aus Voruntersuchungen während der Planungsphase ausgewertet worden, die sich allesamt im Bereich des EWK-Systems befinden. Um eine bessere Vorstellung über die Messstellen der Bodenzusammensetzung zu bekommen, wird in Abbildung 160 beispielhaft das Resultat einer der vier Messstellen dargestellt.

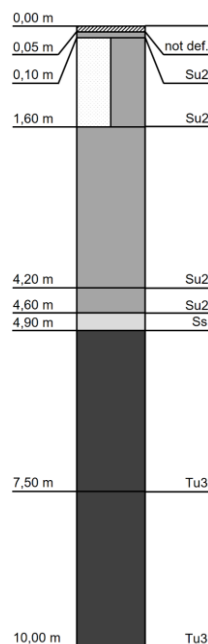


Abbildung 160 Bodenzusammensetzung einer Messstelle mit Klassifikation nach DIN 4220

Es ist zu erkennen, dass die Messung bis zu einer Tiefe von 10 m durchgeführt worden ist. Diese Tiefe entspricht auch der Tiefe des Simulationsmodells. Überall dort, wo sich Tiefenangaben befinden, verändert sich die Bodenzusammensetzung. Jede Bodenschicht ist anschließend mit der DIN 4220 zu vergleichen. In dieser Norm wird zunächst zwischen Sand, Lehm, Schluff und Ton unterschieden. Abhängig von den weiteren Bestandteilen der Böden kann aus insgesamt 31 verschiedenen Bodenarten gewählt werden. Da die Norm nicht alle Unterschiede in den Bodenzusammensetzungen berücksichtigt, sind Annahmen mit ähnlichen Bodenarten zu treffen. So kommt es beispielsweise dazu, dass die Bodenart Tu3 für die beiden unteren Schichten gewählt worden ist. Anschließend sind alle vier Messstellen gemittelt worden. Auf diese Weise sind insgesamt vier verschiedene Bodenarten für das Simulationsmodell erstellt worden.

Neben der Bodenzusammensetzung spielt auch die **Tiefe des Grundwassers** eine Rolle bei der Geometrie. Denn in DELPHIN muss für Grundwasser ebenfalls eine Schicht berücksichtigt werden. Aufgrund von Niederschlag und Verdunstung ändert sich die Höhe des Grundwassers über ein Jahr wie Abbildung 161 zeigt.

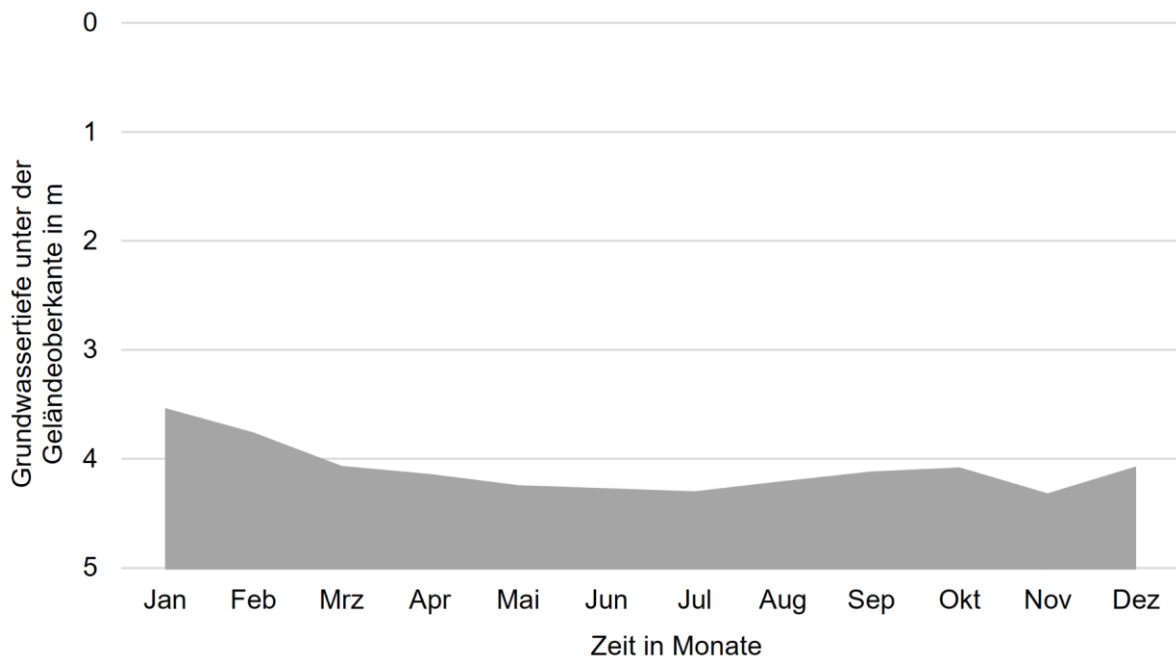


Abbildung 161 Tiefe des Grundwassers einer nahegelegenen Messstation aus dem Jahr 2018

Diese Daten sind von einer Grundwassermessstelle der Stadt Geretsried ermittelt (MP01, vgl. hierzu Abbildung 155). Im Allgemeinen wird im Untersuchungsgebiet ein Düker eingesetzt, damit sich das Grundwasser vor dem Gebäude nicht anstaut. DHI WASY GmbH hat dafür im Auftrag der Stadt Geretsried eine Simulation durchgeführt, in der die Höhe des Grundwassers mit Düker ermittelt worden ist. Das Ergebnis ist in Abbildung 162 zu erkennen.

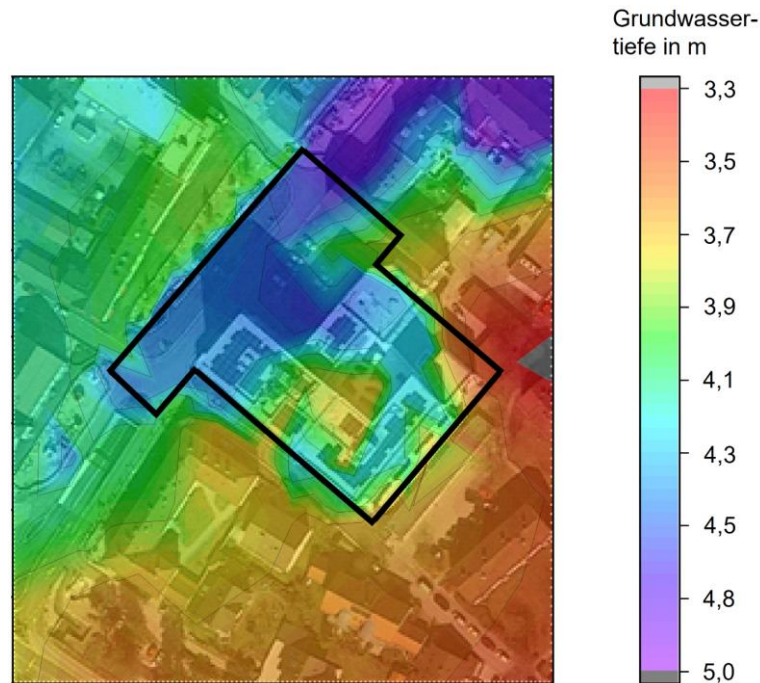


Abbildung 162 Mittlere Grundwassertiefe mit Düker (2019, in Anlehnung an DHI WASY GmbH)

Die schwarze Form kennzeichnet den Umriss des EWK-Systems. Um das Simulationsmodell einfach zu halten, ist eine konstante Grundwassertiefe von 4,4 m unter der Geländeoberkante angenommen worden.

Außerdem ist die **Richtung des Grundwassers** für die Geometrie des Simulationsmodells zu berücksichtigen. Denn dort, wo das Grundwasser ausströmt, wird üblicherweise das Simulationsmodell um etwa 10 m erweitert, sodass die Beeinflussung des Grundwassers nach dem EWK-System nachvollzogen werden kann. Auf der ausströmenden Seite sollte das Grundwasser nach möglichst wenigen Metern näherungsweise wieder die Temperatur annehmen, die es beim Einströmen in das EWK-System gehabt hat. Wäre dies nicht der Fall, könnten beispielsweise Organismen im Erdreich zu Schaden kommen.

Die restlichen Kanten sind dagegen nur um 2 m verlängert worden. An diesen Kantenerweiterungen ist später das Außenklima zuzuweisen. Denn die restlichen Oberflächen des Simulationsmodells werden bereits durch die Klimabedingungen des Gebäudes beansprucht. Für zweidimensionale Simulationen ist ebenfalls die Grundwasserfließrichtung entscheidend; denn bei solchen Simulationen ist üblicherweise der vertikale Schnitt so zu legen, dass der komplette Grundwasserfluss abgebildet werden kann.

Um die Geometrie zu vervollständigen, fehlt noch das **Gebäude**. Für das Modell werden jedoch nur die Gebäudeteile benötigt, die sich unterhalb der Geländeoberkante befinden, da das Simulationsmodell erst bei der Geländeoberkante beginnt. Somit sind nur die beiden Untergeschosse relevant. Das erste Untergeschoss wird als Tiefgarage, das zweite als Keller beziehungsweise Energiezentrale verwendet. Die verwendeten Maße sind den Plänen der Steinhäuser GmbH & Co. KG entnommen worden. Damit lassen sich die Wände, die Bodenplatten, die Kiesschichten, die Dämmung sowie die EWK geometrisch nachbilden. Insbesondere die Bodenplatten sind unterschiedlich dick. Um dies zu vereinfachen, sind die verschiedenen Bodenschichten aufeinander, statt untereinander gelegt worden, wie Abbildung 163 illustriert.

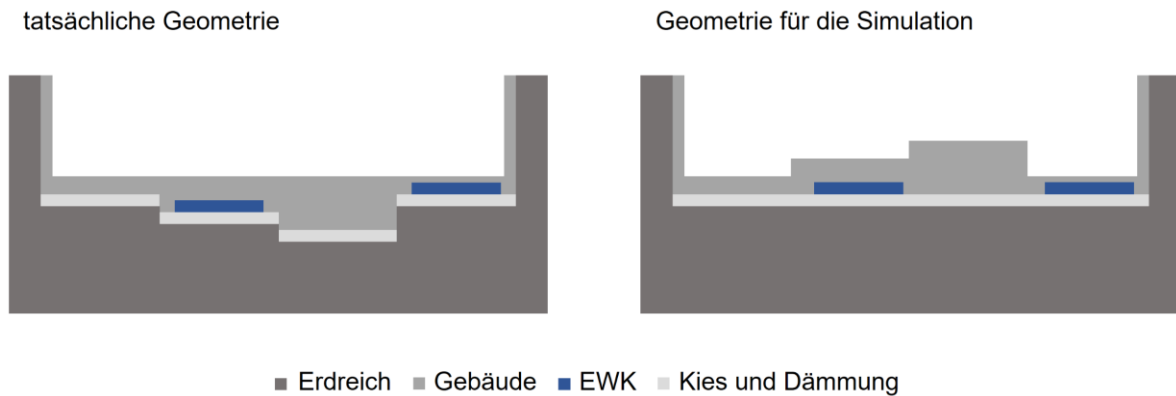


Abbildung 163 Tatsächliche Geometrie vs. Geometrie für die Simulation (Bodenplatten) [29]

Dies hat zur Folge, dass alle EWK in die gleiche horizontale Schicht gelegt werden können. Dadurch lassen sich die EWK einer Ebene graphisch besser vergleichen. Denn die visuellen Ausgaben in DELPHIN lassen sich immer nur auf einzelne, orthogonale Schichten beziehen. Ebenfalls ist die Decke des zweiten Untergeschosses vernachlässigt worden, da aus Sicht eines EWK nur die Bauteile entscheidend sind, die an den Untergrund angrenzen. Dies kann Abbildung 164 entnommen werden.

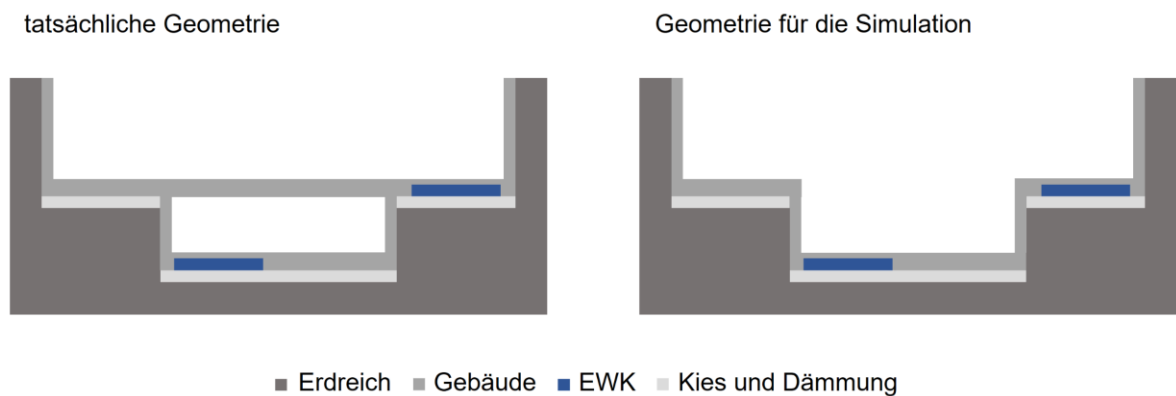


Abbildung 164 Tatsächliche Geometrie vs. Geometrie für die Simulation (Deckenentfernung) [29]

### *Dreidimensionale Modellierung*

Zum Zeitpunkt der Arbeit hat es in DELPHIN keine graphische Oberfläche zur Erstellung eines dreidimensionalen Simulationsprogramm gegeben. Um dennoch dreidimensional simulieren zu können, ist eine Matrix mit den Schichtdicken im Programmcode von DELPHIN vorzugeben. Da das zu simulierende Modell relativ umfangreich ist, ist zunächst eine dreidimensionale Zeichnung mit dem CAD-Programm Creo Parametrics erstellt worden. Die Explosionsansicht ist in Abbildung 165 ersichtlich.

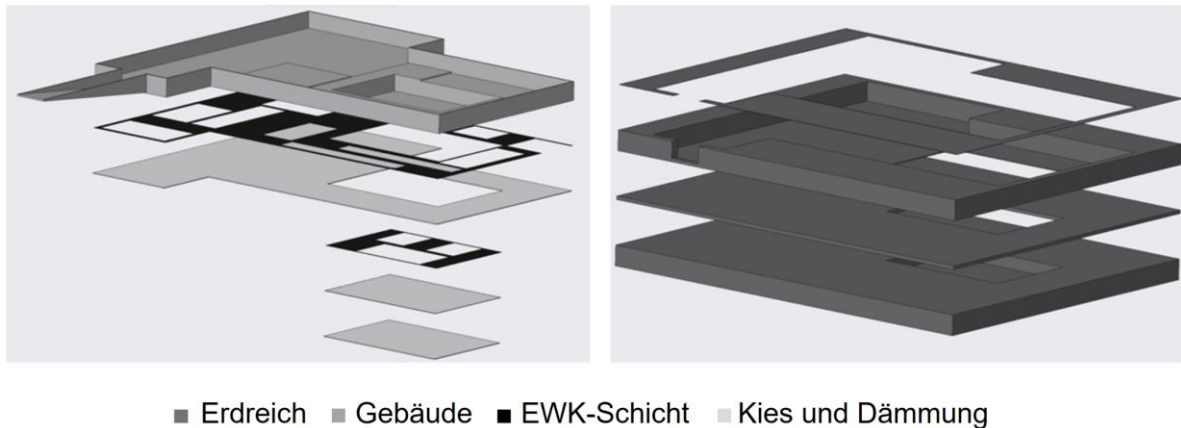


Abbildung 165 Explosionszeichnung des Gebäudes (links) und der Bodenschichten (rechts) [29]

Im linken Bild ist in der obersten Schicht das Gebäude dargestellt, das aus Beton besteht. In dieser Schicht kann zum Beispiel die Einfahrt in die Tiefgarage gesehen werden. Darauf folgt die EWK-Schicht des ersten Untergeschosses. Die EWK sind in die Bodenplatte eingegossen worden. Sie befinden sich dort, wo die leeren Stellen der schwarzen Platte zu sehen sind. Anschließend kommt eine Kiesschicht. Beim zweiten Untergeschoss liegt weitestgehend der gleiche Aufbau vor. Der einzige Unterschied besteht darin, dass neben der Kiesschicht auch ein Teil des zweiten Untergeschosses mit einer Dämmschicht ausgestattet worden ist.

## Physikalische Größen

Im Anschluss sind in DELPHIN die Start-, Klimabedingungen sowie das Grundwasser zuzuweisen.

Die **Startbedingungen** für die Erdreichsimulation umfassen die **Temperatur** und die **Feuchte**, die zum Startzeitpunkt dem Simulationsmodell vorgegeben werden. Die gewählte Starttemperatur von 6 °C erstreckt sich über alle Schichten, sogar über die Aussparungen, wie die linke Hälfte der Abbildung 166 anhand der gelben Punkte zeigt.

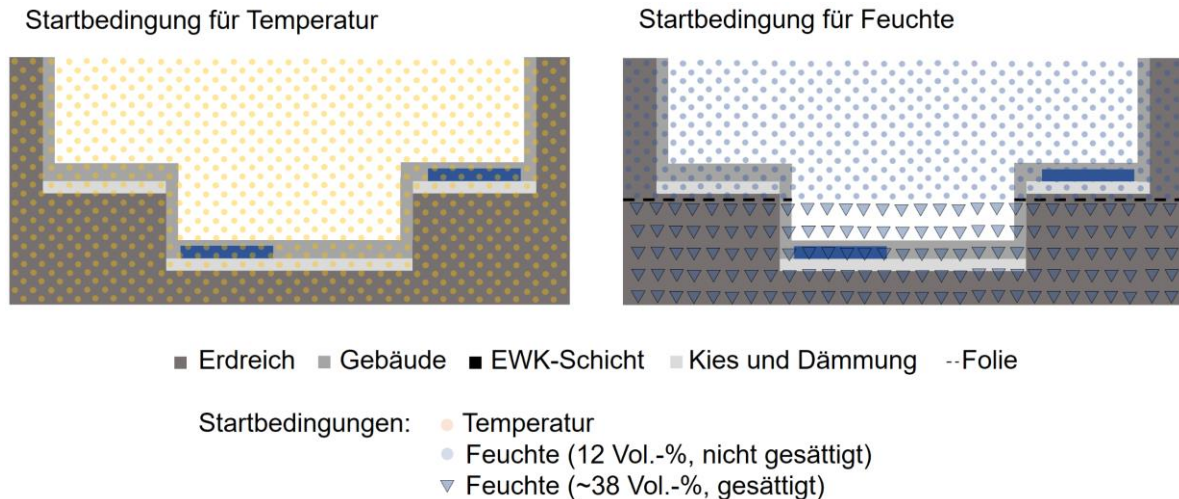


Abbildung 166 Zuweisung der Startbedingungen [29]

Bei der **Feuchte** wird ähnlich verfahren, wie die rechte Hälfte der Abbildung 166 verdeutlichen soll. Da die ausgewählten Materialien für Beton und die Dämmung nicht für den Feuchtetransport geeignet sind, kann ebenfalls über die Aussparung zugewiesen werden. Im Gegensatz zur Temperatur muss bei der Feuchte noch zwischen nicht gesättigtem (blaue Punkte) und gesättigtem Erdreich (blaue Dreiecke) unterschieden werden. Das Erdreich ist gesättigt, wenn alle Poren mit Wasser voll sind. Somit ist das Erdreich dort gesättigt, wo Grundwasser fließt. In diesem Fall kann das Erdreich kein weiteres Wasser mehr aufnehmen. Da sich die Porengrößen verschiedener Bodenarten unterscheiden, kann jede Bodenart unterschiedlich viel Wasser aufnehmen. Im Projekt können die gesättigten Böden etwa 38 Vol.-% Wasser halten. Für die Bodenarten, die oberhalb des Grundwasserstroms liegen, ist eine Feuchte von 12 Vol.-% angenommen worden. Außerdem ist im Simulationsmodell eine Folie zwischen gesättigte und nicht gesättigte Schichten zu legen. Dies dient dazu, dass über den kompletten Simulationszeitraum gleichbleibende Feuchtebedingungen vorliegen.

Anschließend an die Startbedingungen ist das **Grundwasser** in das Simulationsmodell einzufügen. Für die Zuweisung des Grundwassers sind die Tiefe, die Richtung, die Geschwindigkeit und die Temperatur entscheidend. Da die Tiefe und die Richtung bereits auf die Geometrie Einfluss nehmen, sind sie dort bereits thematisiert worden. Aufgrund dessen sind sie an dieser Stelle nicht mehr visualisiert. Um eine Grundwasserbedingung zu erstellen, wird im ersten Schritt die Geschwindigkeit vorgegeben. Wie schon bei der Tiefe sind hierzu die Simulationsergebnisse von DHI WASY GmbH genutzt worden. Das Resultat der Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Tiefe ist in Abbildung 167 dargestellt.

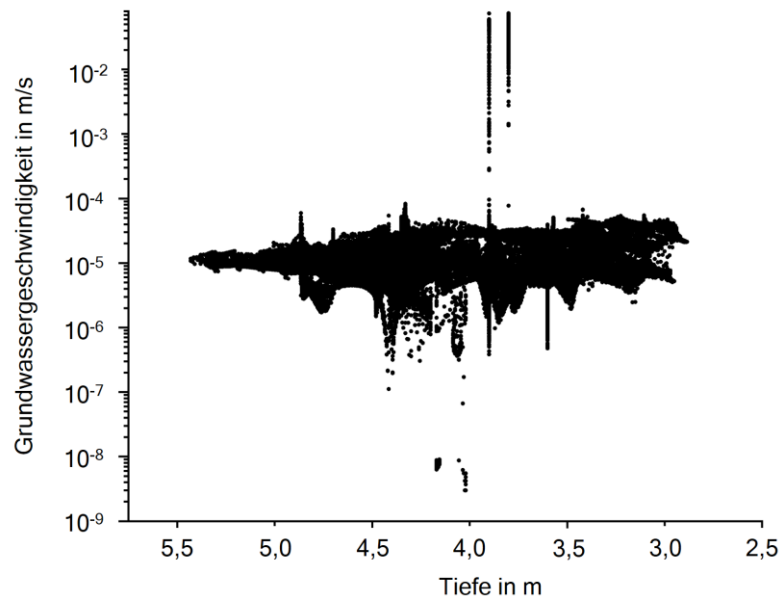


Abbildung 167 Grundwassergeschwindigkeit in Bezug auf die Tiefe (in Anlehnung an DHI WASY GmbH)

Es wird deutlich, dass der überwiegende Anteil der simulierten Geschwindigkeiten bei ca.  $10^{-5}$  m/s beziehungsweise 3,6 cm/h gelegen ist. Diese gemittelte Geschwindigkeit ist als konstante Geschwindigkeit in das Simulationsprogramm übertragen worden.

Da die **Grundwassertemperatur** über ein Jahr hinweg um mehrere Kelvin schwankt, ist eine Messreihe in DELPHIN einzulesen. Diese Messreihe beschreibt die Temperatur einer nahe gelegenen Grundwassermessstation und ist in Abbildung 168 ersichtlich.

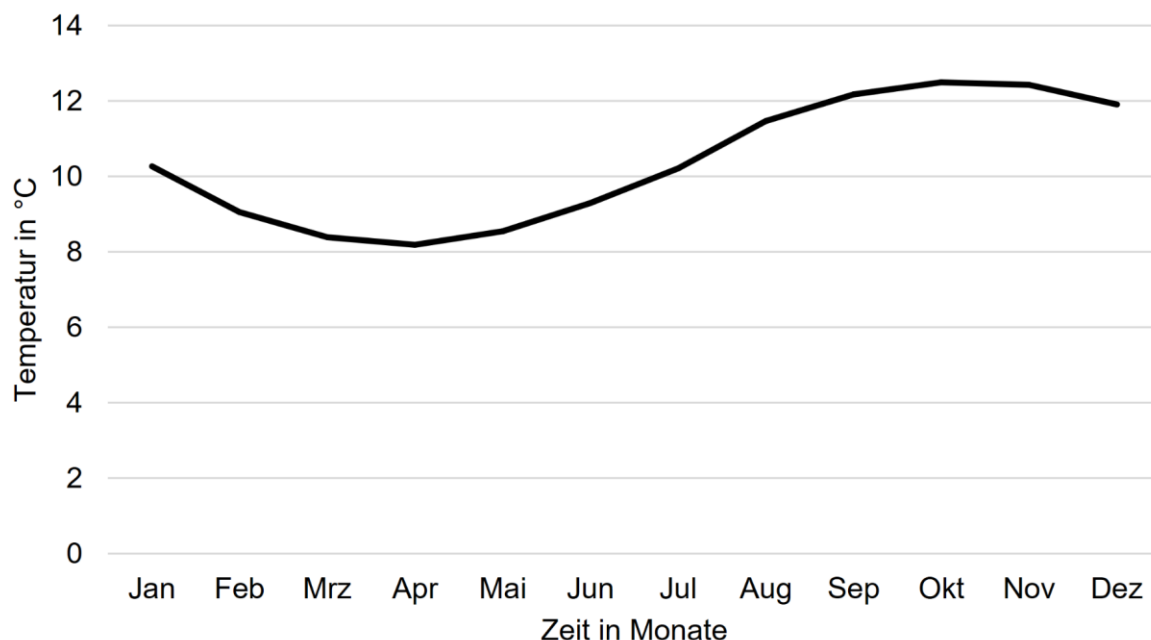


Abbildung 168 Grundwassertemperatur als Mittelwert von 2018, 2019 und 2020

Die Messstation befindet sich in etwa dort, wo das Grundwasser in das Simulationsmodell einströmt (MP01, vgl. hierzu Abbildung 156). Diese Position ist gewählt worden, da in DELPHIN nur die Eintrittstemperatur des Grundwassers in das Simulationsmodell vorgegeben werden kann. Die Messung zeigt, dass die Temperatur zwischen 8 °C und 13 °C mäandert. Nachdem vier Grundwasserparameter, Tiefe, Richtung, Geschwindigkeit und Temperatur, als Bedingung in DELPHIN zusammengefasst worden waren, ist das Grundwasser zuweisen. Die Zuweisung ist in Abbildung 169 dargestellt.



Abbildung 169 Zuweisung des Grundwassers [29]

Zunächst ist zu erkennen, dass das Grundwasser von links zugewiesen worden ist (dunkelblaue Pfeile). Am Rand des Simulationsmodells ist die Temperatur der nahegelegenen Messstelle vorgegeben. Die Temperatur des Grundwassers verändert sich von links nach rechts, abhängig davon wie sie beispielsweise durch die EWK beeinflusst wird. Anhand der dunkelblauen Punkte wird deutlich, dass das Grundwasser bis zur Folie ansteht. Zu bemerken ist, dass das Grundwasser durch den Beton und die Dämmung fließt. Dies widerspricht der Realität, ist jedoch in DELPHIN nötig, damit Grundwasser in dem linken Bereich der Abbildung 169 (schwarzes Kästchen) fließt. Dadurch wird ein Fehler erzeugt, der jedoch marginal sein sollte, da die Beton- und Dämmschichten verhältnismäßig dünn sind. Außerdem ist in DELPHIN nach einer Aussparung durch das zweite Untergeschoss das Grundwasser erneut zuzuwiesen (hellblaue Pfeile und Punkte). An den hellblauen Pfeilen ist dazu zum zweiten Mal eine Temperatur vorgegeben worden. Da sich über die Simulationen herausgestellt hat, dass der Einfluss dieser Temperatur gering ist, ist hier die gleiche Temperatur vorgegeben worden, die bereits bei der ersten Zuweisung angenommen worden war. Dieses Vorgehen ist für jede Bodenart durchgeführt worden. Denn in DELPHIN muss für jede Bodenart eine neue Grundwasserbedingung erstellt werden.

Nachdem das Grundwasser zugewiesen ist, sind die **Klimabedingungen** in das Simulationsmodell integriert worden. Wie Abbildung 170 zeigt, ist damit das Außenklima, zwei Innenraumklimata und der terrestrische Wärmestrom dem Simulationsmodell hinzugefügt worden.

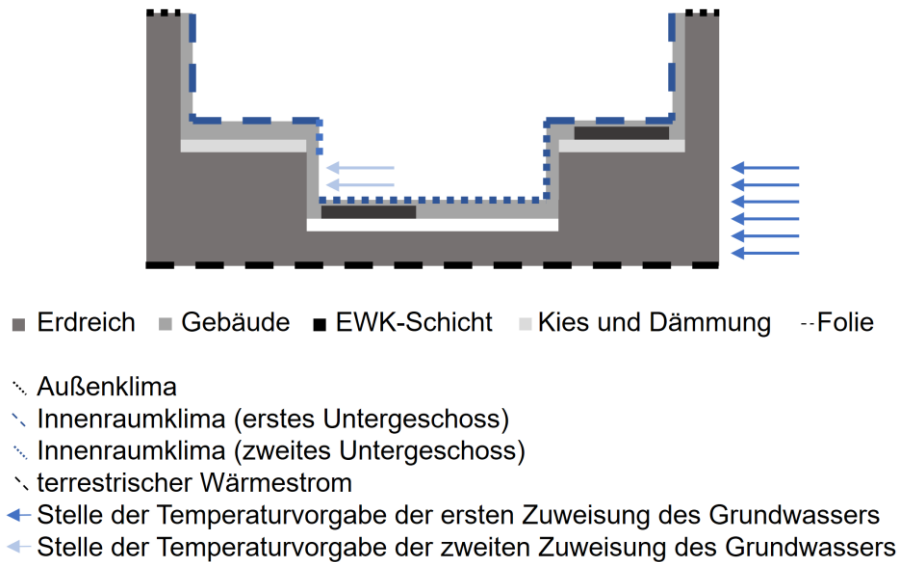


Abbildung 170 Klimabedingungen (und Grundwasser) [29]

Das **Außenklima** ist mithilfe von Daten des Deutschen Wetter Dienstes erstellt worden. Beim Außenklima wird die Temperatur, die relative Feuchte, die Globalstrahlung, die Windrichtung und –geschwindigkeit, die langwellige Gegenstrahlung, der Luftdruck sowie der Niederschlag vorgegeben. Das Außenklima wird oben auf das Simulationsmodell, dort wo kein Gebäude vorhanden ist, aufgeprägt (schwarz-gepunktete Linien). Daneben sind zwei **Innenraumklimata**, eins für das erste und eins für das zweite Untergeschoss, zu erstellen. Bei diesen Klimabedingungen handelt es sich um Temperaturverläufe. Die Temperaturverläufe sind anhand der ermittelten Messdaten der eingebauten Temperatursensoren oben auf die Bodenplatten und von innen auf die Wände aufzuprägen (blaue Linien). Auffallend ist, dass das Innenraumklima des zweiten Untergeschosses nur teilweise der linken Wand zugewiesen ist. Dies liegt daran, dass die zweite Zuweisung des Grundwassers (hellblaue Pfeile) nicht funktioniert hätte und davon ausgegangen worden ist, dass das Grundwasser einen größeren Einfluss auf das Simulationsergebnis nimmt als die Klimabedingung an der Wand. Als letztes ist der terrestrische Wärmestrom in das Simulationsmodell aufgenommen worden. Da dieser nahezu konstant bleibt, wird er mit  $0,065 \text{ W/m}^2$  nachgebildet. Der terrestrische Wärmestrom ist von unten aufzuprägen (schwarz-gestrichelte Linie).

### Kalibrierung

Eine Kalibrierung ist dazu da, die Feuchte im Erdreich so einzustellen, dass ein Gleichgewichtszustand erzielt wird. In der Realität geschieht dies über die Wasseraufnahme der Vegetation. Im Gegensatz dazu wird in der Simulation der Gleichgewichtszustand über einen Abminderungskoeffizient des Schlagregens eingestellt. Je größer dieser Koeffizient ist, desto feuchter ist das Erdreich. Da sich das simulierte EWK-System unter einer versiegelten Fläche befindet und somit der Regen kaum Einfluss auf das Erdreich nimmt, ist der Schlagregen und die Dampfdiffusion für die Simulation ausgeschaltet worden. Dies führt dazu, dass die Startbedingungen der Feuchte über die gesamte Simulationsdauer nahezu gleich bleiben und keine Kalibrierung durchzuführen ist.

### Zweidimensionale EWK-Simulationsmodelle

Im nächsten Schritt folgt üblicherweise die Aufprägung der Energieentzüge und -beaufschlagungen der EWK. Da im Projekt jedoch nur die kompletten Energiemengen bestehend aus EWK und Anbindeleitung gemessen werden, sind zunächst die Energiemengen der Anbindeleitungen zu ermitteln. Damit lassen sich die Energiemengen der EWK bestimmen, indem die Energiemengen der Anbindeleitungen von den kompletten, gemessenen Energiemengen abgezogen werden. Dies ist mithilfe mehrere zweidimensionaler Simulationsmodelle realisiert worden, wie Abbildung 171 anhand der schwarzen Linien illustriert.

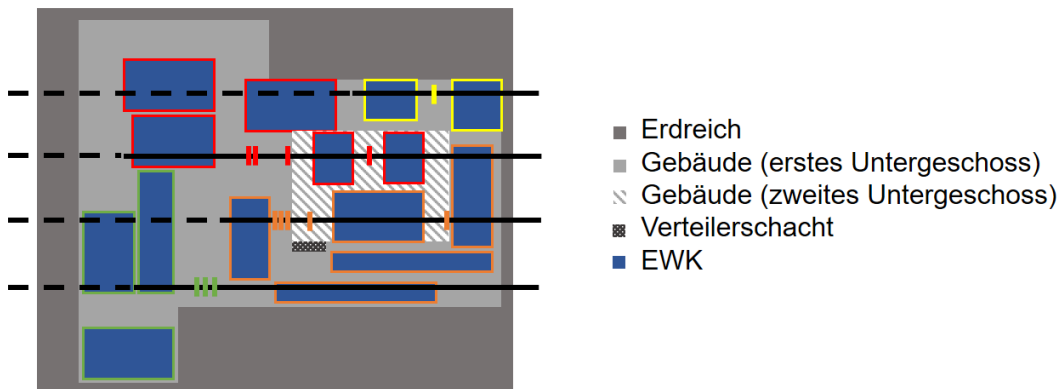


Abbildung 171 Darstellung der zweidimensionalen Schnitte zur Ermittlung der Rohrmodelle [29]

Die schwarzen Linien stellen jeweils die vertikalen Schnitte der vier zweidimensionalen Simulationsmodelle aus der Vogelperspektive dar. Für jeden EWK sind die Verläufe der Anbindeleitungen analysiert worden. Die Anbindeleitungen führen von den einzelnen EWK zu dem Verteilerschacht (schwarz, gepunktete Box). Zur Ermittlung der Anbindeleitungsenergiemengen sind charakteristische Stellen für die Anbindeleitungen ausgewählt worden (gelb, rot, orange und grüne Balken). Zur Verdeutlichung des Vorgehens ist EWK 11 herangezogen. EWK 11 setzt sich aus zwei EWK-Flächen zusammen, die mit dem gelben Rahmen gekennzeichnet sind. Im Falle von EWK 11 ist die Stelle zwischen den beiden EWK-Flächen als charakteristische Position für die Anbindeleitungen gewählt (gelber Balken).

Mithilfe der zweidimensionalen Simulationsmodelle können bereits die ersten Auswertungen durchgeführt werden. Als erstes lassen sich die Energieentzüge der Anbindeleitungen ermitteln.

Um die Anbindeleitungen trotz unterschiedlicher Länge miteinander vergleichen zu können, sind die Energiemengen eines EWK für Abbildung 172 aus VL und RL bilanziell addiert und auf die Trassenlänge bezogen.

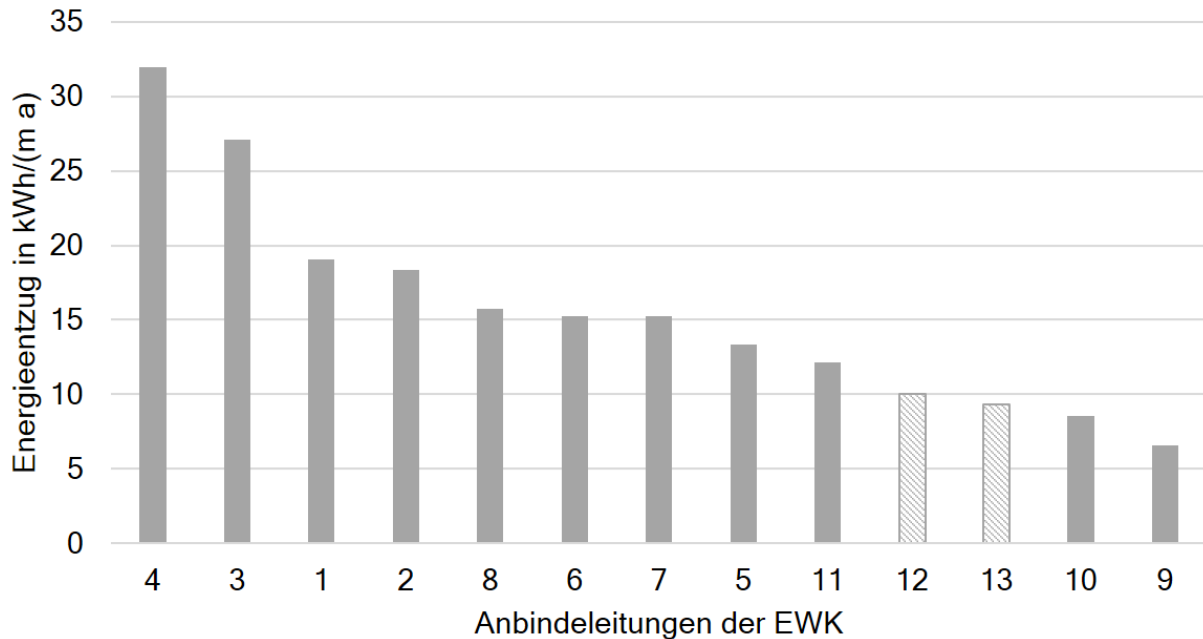


Abbildung 172 Gegenüberstellung der bilanziellen Anbindeleistungsentzüge [29]

EWK 12 und EWK 13 sind durch die gestrichelte Musterfüllung gekennzeichnet, da die beiden EWK in die Bodenplatte des zweiten Untergeschosses eingegossen worden sind. Die restlichen EWK sind Teil der Bodenplatte des ersten Untergeschosses. Es ist auffallend, dass die EWK der Bodenplatte des zweiten Untergeschosses tendenziell weniger Energie entziehen als die EWK der Bodenplatte des ersten Untergeschosses. Die Anbindeleitung von EWK 4 hat laut Simulation mit 32 kWh/(m·a) die meiste Energie entzogen. Damit hat diese Anbindeleitung bezogen auf ihre Rohrleitungslänge fast doppelt so viel Energie entzogen wie der Durchschnitt (17 kWh/(m·a)). Im Kontrast dazu wird bei kalten Nahwärmenetzen häufig mit einem bilanziellen Energieentzug von 150 kWh/(m·a) gerechnet. Durch die kleineren Rohrleitungsdimensionen, das stärker beeinflusste Erdreich und die verschlechterten Regenerationsmöglichkeiten haben die Anbindeleitungen von puls<sup>G</sup> nur rund 11 % des spezifischen Rohrleitungsentzug eines kalte Nahwärmenetzes erbringen können. Im Diagramm handelt es sich jeweils um Energiebilanzen. Somit wird klar, dass die Anbindeleitungen mehr Energie entzogen als beaufschlagt haben. Um auch die Energiebeaufschlagung auf den Erd- und Gebäudekörper zu visualisieren, sind die monatlichen Energiesummen eines EWK in Abbildung 173 gebildet worden.

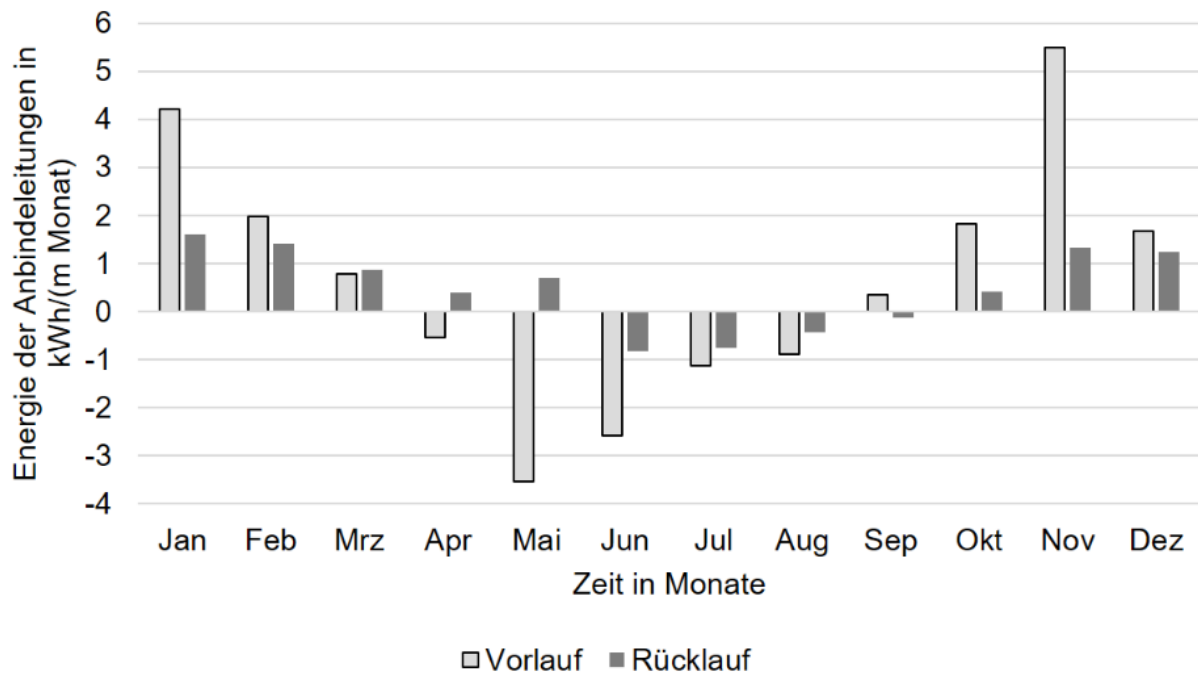


Abbildung 173 Jahresverlauf der Energien des Vor- und Rücklaufes von EWK 5 [29]

Die Balken mit positiven Werten repräsentieren die Energieentzüge, die Balken mit negativen Werten die Energiebeaufschlagungen auf das Erdreich. Es zeigt sich, dass die Anbindeleitungen in den Wintermonaten dem Erd- und Gebäudekörper Energie entziehen. In den Sommermonaten wird der Untergrund dagegen aufgeheizt. Auch wird deutlich, dass der VL stärkeren Schwankungen unterliegt als der RL. Dies liegt daran, dass der RL von den speichernden Eigenschaften des EWK geprägt ist.

Zur Ermittlung der EWK-Energiemengen ist die Abwärme berücksichtigt worden. Abwärme ist Energie, die durch aktive oder passive Kühlung zustande kommt und in das EWK-System gegeben wird. Dieser Anteil der Energie stammt somit nicht (direkt) aus den EWK, sondern von den Verbrauchern selbst.

Insgesamt haben allein die EWK, ohne Anbindeleitungen und ohne Abwärme, gemeinsam 92.000 kWh/a entzogen. Dies entspricht einem spezifischen Entzug von 43 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Wie ungleich diese Entzüge auf das EWK-System verteilt gewesen sind, verdeutlicht Abbildung 174.

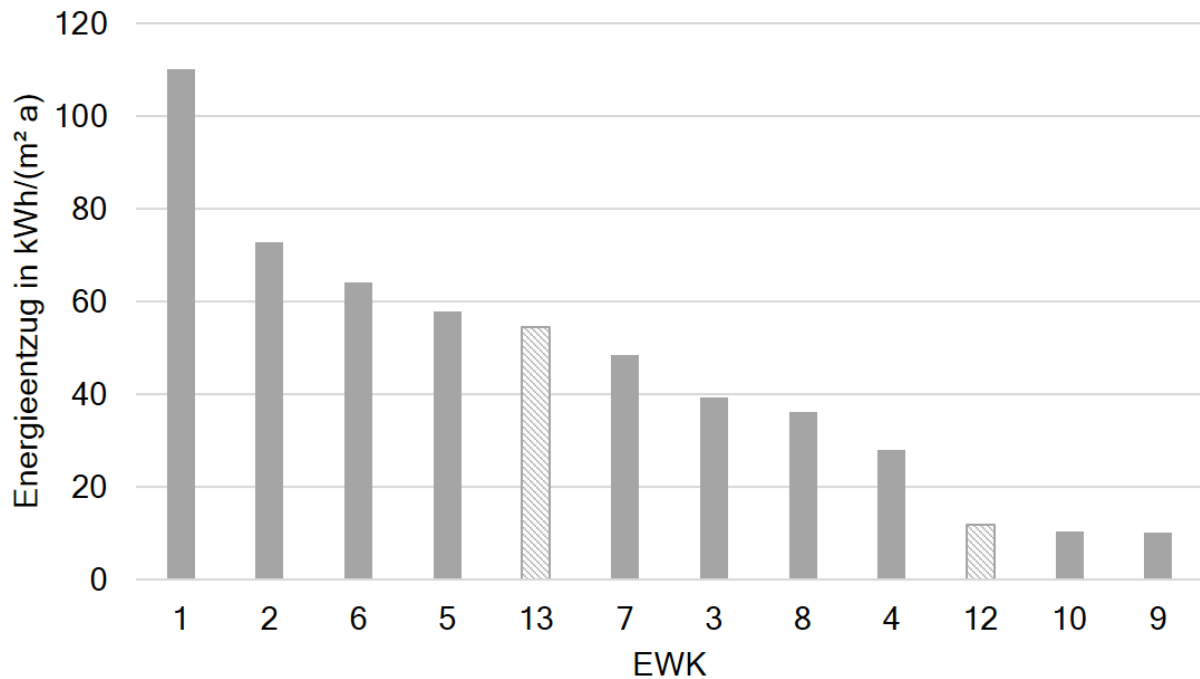


Abbildung 174 Spezifische Energieentzüge der EWK [29]

Ursprünglich ist erwartet worden, dass alle EWK einer Bodenplatte in etwa die gleiche Energiemenge bezogen auf die Fläche entziehen. Da jedoch noch kein hydraulischer Abgleich durchgeführt worden ist, unterscheiden sich die Energieentzüge stark. So hat laut Messdaten und Simulationsergebnissen EWK 1 fast elfmal so viel Energie entzogen wie EWK 9. Aus diesem Grund sind während des Projektzeitraums elektrisch ansteuerbare Ventile für die einzelnen EWK-Stränge zu verbauen, um überall den gleichen Druckverlust und somit ähnliche Energieentzüge einzustellen. Auch in handelt es sich um die Energiebilanzen des kompletten Jahres. Dadurch wird klar, dass die EWK allesamt dem Erd- und Gebäudekörper mehr Energie entzogen als beaufschlagt haben. In Abbildung 175 ist erneut ein exemplarischer EWK des Projekts aufgeführt.

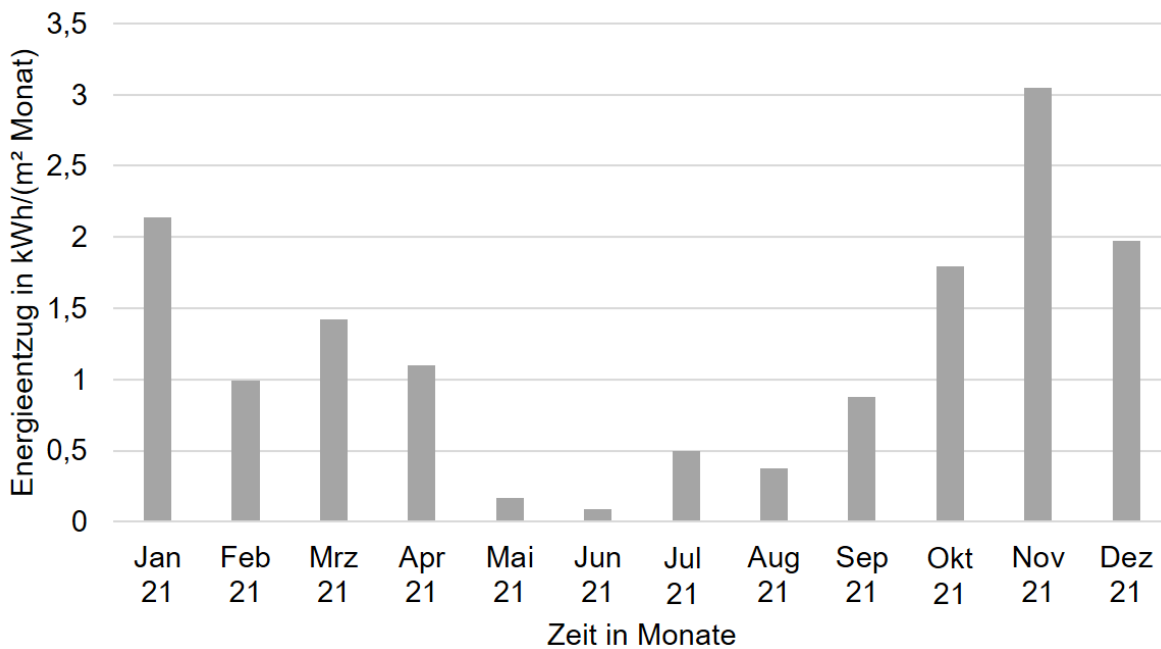


Abbildung 175 Jahresverlauf der bilanziellen Energieentzüge von EWK 5 [29]

Auch hier sind monatsweise die Energiebilanzen gebildet. Es fällt auf, dass dieser EWK vor allem in den Monaten Mai bis August bilanziell wenig Energie dem Untergrund entnimmt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in diesen Monaten der Wärmeverbrauch des Gebäudes nicht so hoch ist und gleichzeitig viel Abwärme in den EWK eingespeist wurde. So sind innerhalb dieser vier Monate  $0,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{-Monat})$  entzogen worden, während der EWK mit  $0,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{-Monat})$  aufgeheizt worden ist.

#### *Dreidimensionales EWK-Simulationsmodell*

Die ermittelten EWK-Energiemengen und die Innenraumtemperaturen sind nun in das dreidimensionale Simulationsmodell übertragen worden. Die EWK-Energiemengen sind, wie bereits bei den zweidimensionalen Simulationsmodellen, als Energiequellen dem Material Beton zugewiesen worden. Auch dieses Simulationsmodell ist diskretisiert. Aufgrund der dritten Dimension ist es jedoch weniger fein diskretisiert worden als bei den zweidimensionalen Modellen. So kommt es, dass das kleinste Volumen bei der dreidimensionalen Simulation  $1 \text{ l}$  und das größte Volumen  $2 \text{ m}^3$  groß gewesen ist. Damit sind die Volumina verhältnismäßig groß. Dennoch sind knapp eine halbe Millionen Volumenelemente durch die Diskretisierung erzeugt worden. Üblicherweise lässt man eine Simulation über zehn Simulationsjahre laufen, um ein eingeschwungenes System zu gewährleisten. Insgesamt hat die Simulation über zehn Simulationsjahre rund 22 Tage in Anspruch genommen. An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass die Simulation sich bereits nach dem ersten Simulationsjahre eingeschwungen hatte. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass ohne Schlagregen und ohne Dampfdiffusion gerechnet worden ist, weil sich das EWK-System unter einem Gebäude befindet. Somit hat es keine Einschwingzeit für die Feuchte gegeben, da diese konstant geblieben ist, wie Abbildung 176 verdeutlicht.

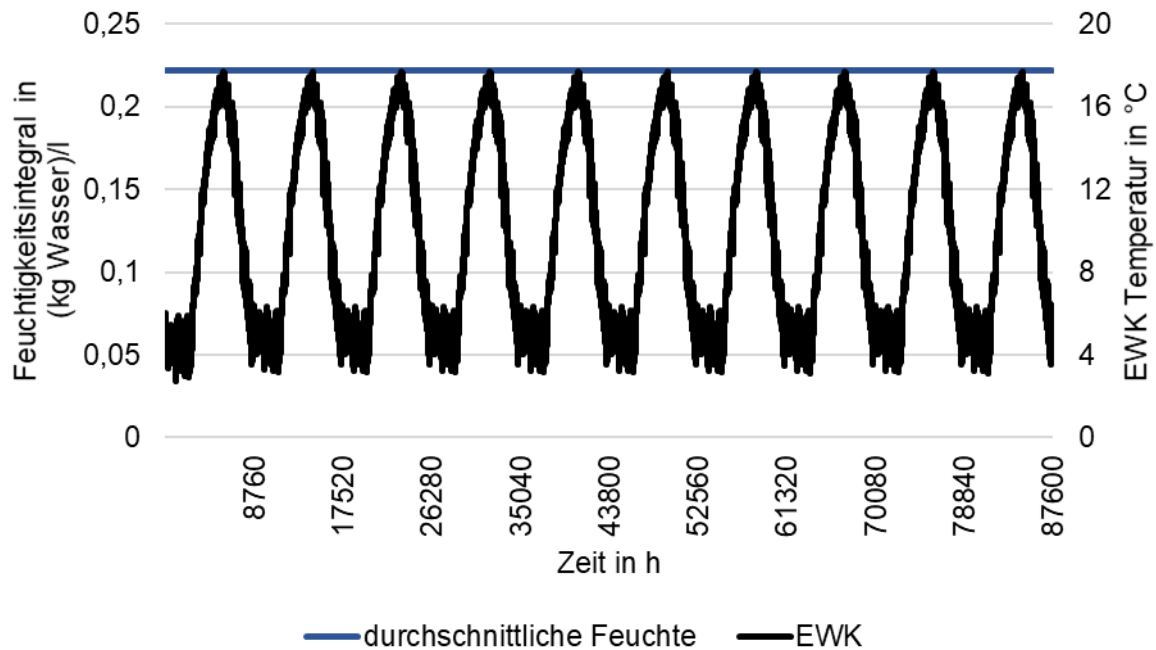


Abbildung 176 Einschwingverhalten des Feuchtigkeitsintegrals und der EWK-Temperatur [29]

Neben der Feuchte ist auch die Temperatur eines EWK ein Indiz dafür, ob sich eine Simulation eingeschwungen hat oder nicht. Vergleicht man nun die Amplituden der Temperatur eines EWK, so fällt auf, dass das erste Minimum im ersten Simulationsjahr tiefer ausgeschlagen ist als die restlichen. Ab dem zweiten Simulationsjahr weisen die Temperaturamplituden keine Dämpfungen oder Streckungen mehr auf. Somit ist das System seit dem Beginn des zweiten Simulationsjahres eingeschwungen. Ab diesem Zeitpunkt unterscheiden sich die Ergebnisse nur noch marginal.

Das eingeschwungene System kann anschließend validiert werden, indem die simulativ ermittelten Temperaturen den tatsächlichen Messdaten gegenübergestellt werden, wie Abbildung 177 darstellt.

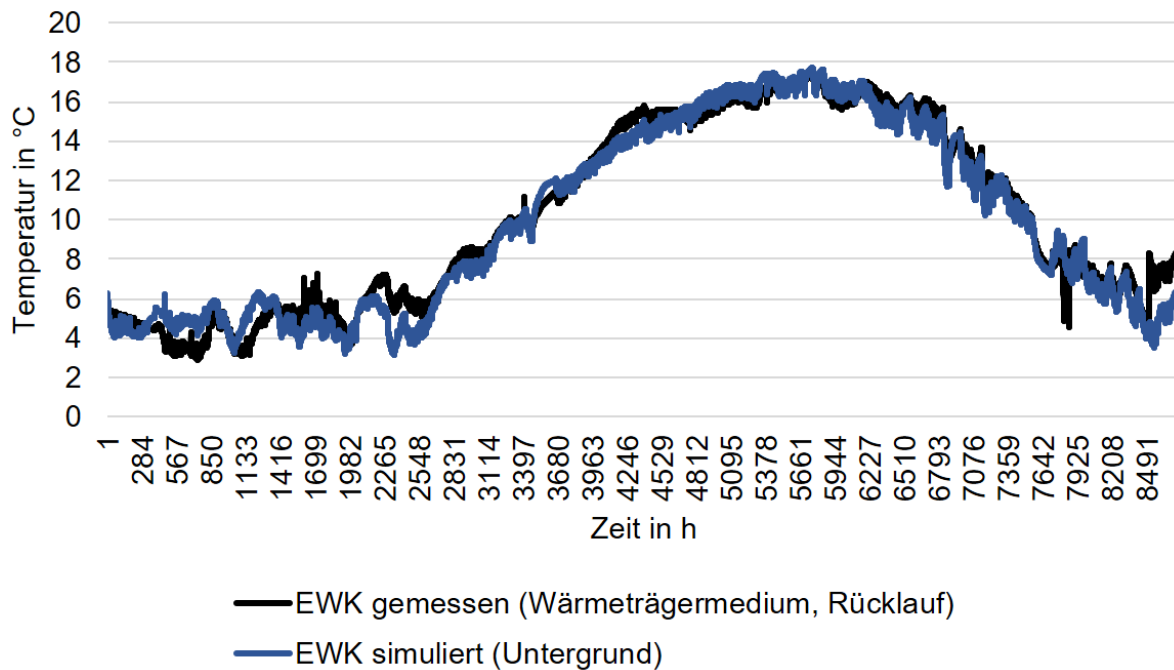


Abbildung 177 Gemessene vs. simulierte Temperatur eines EWK (EWK 5) [29]

Dazu sind die gemessenen RL-Temperaturen des Wärmeträgermediums der EWK mit den Temperaturen des Untergrunds, an dem das Wärmeenergieentzugsprofil angesetzt worden ist, zu vergleichen.

Insgesamt haben sich neun von 13 EWK bereits ähnlich gut nachbilden lassen wie in Abbildung 177. Die anderen vier EWK haben Verläufe aufgezeigt wie Abbildung 178 verdeutlicht.

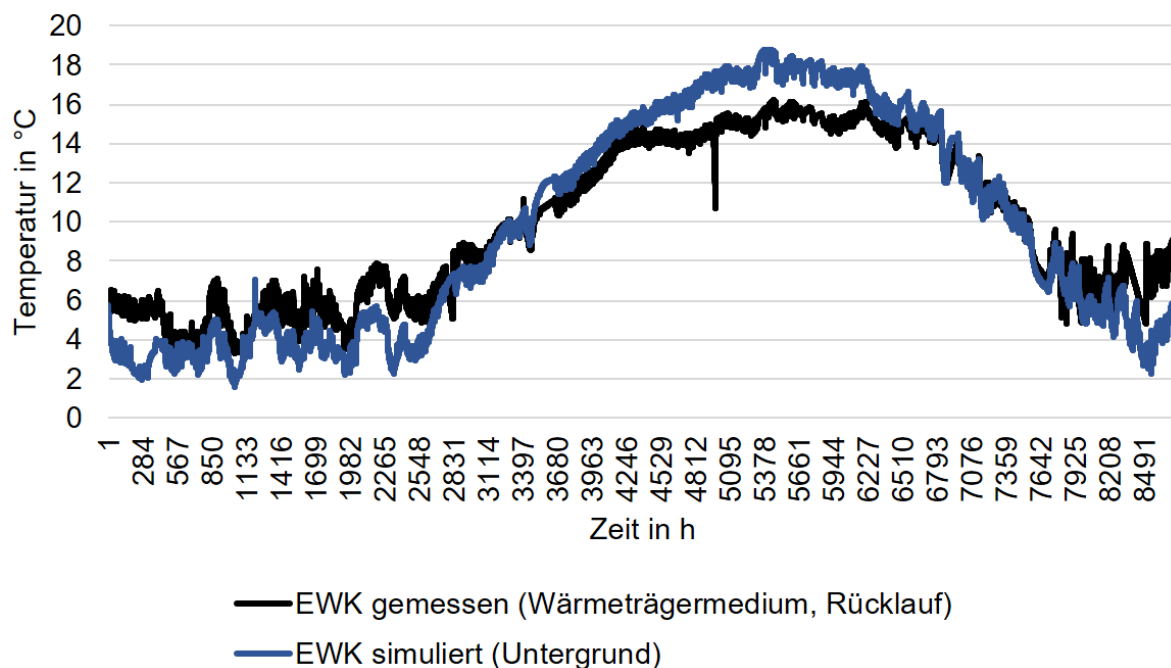
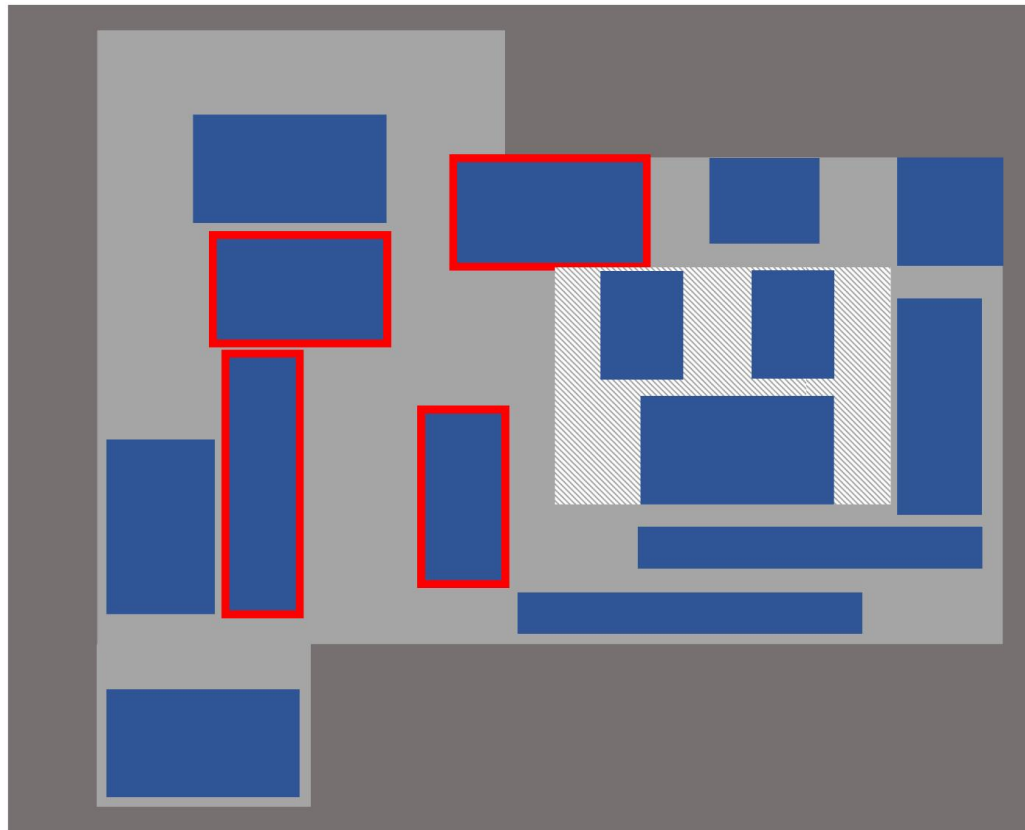


Abbildung 178 Gemessene vs. simulierte Temperatur eines EWK (Abweichungen, EWK 6) [29]

In den Übergangsphasen ist es ebenfalls gelungen, das Verhalten nachzubilden. Jedoch lassen sich in den Winter- und Sommermonaten bei den unzureichend nachgebildeten EWK noch Abweichungen erkennen. Die Position der unzureichend nachgebildeten EWK ist in Abbildung 179 zu erkennen.



- Erdreich ■ Gebäude (erstes Untergeschoss) ■ Gebäude (zweites Untergeschoss)
- EWK, gut nachgebildet ■ EWK, unzureichend abgebildet

Abbildung 179 Gut vs. unzureichend nachgebildete EWK [29]

Trotzdem ist anzumerken, dass selbst bei den unzureichend nachgebildeten EWK qualitativ die gleichen Temperaturschwankungen bei den Messdaten und den Simulationsergebnissen ersichtlich sind.

Als Nächstes soll die Beeinflussung der EWK thematisiert werden. Dazu ist in Abbildung 180 das Temperaturprofil des ersten Untergeschosses im November 2021 abgebildet worden.

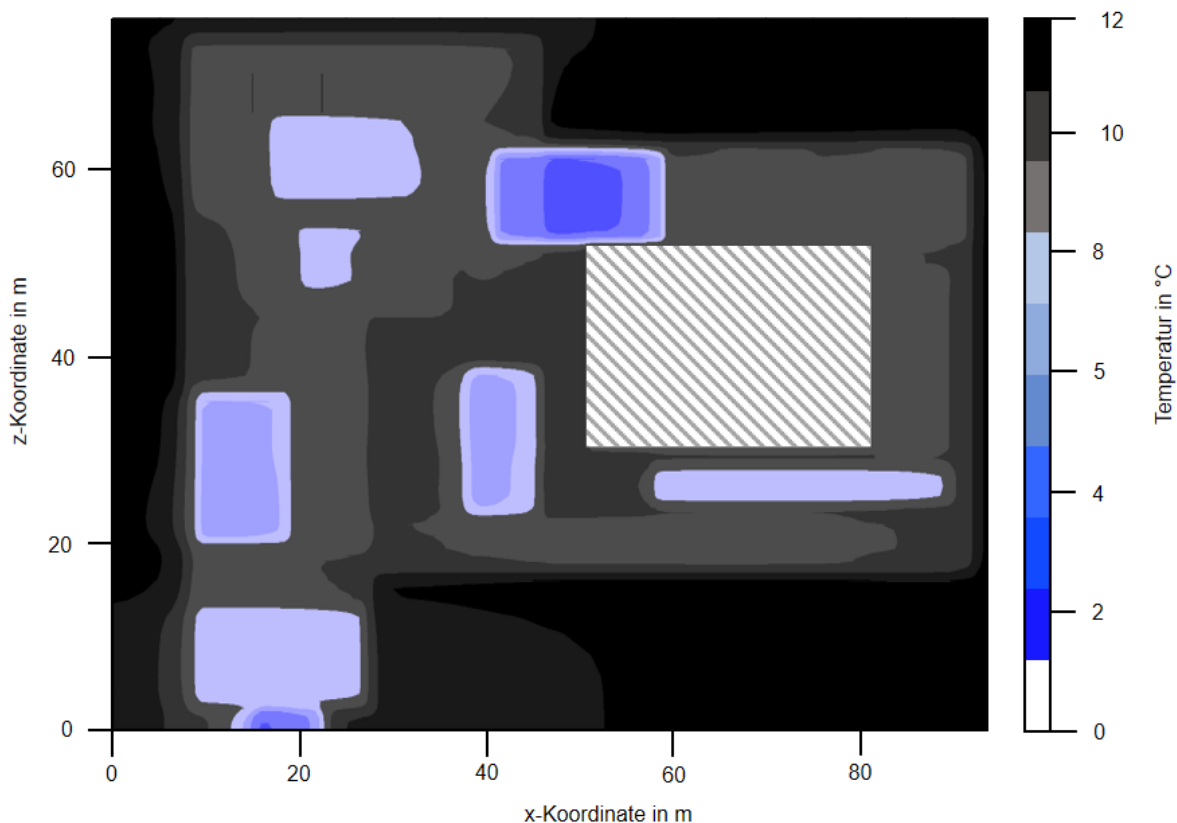


Abbildung 180 Temperaturprofil des ersten Untergeschosses im November 2021 [29]

Zu erkennen ist zunächst, dass der Gebäudekörper unterschiedlich stark von den EWK ausgekühlt wird. Tendenziell ist es so, dass je kühler ein EWK ist, desto mehr Energie ist aus ihm gezogen worden. So wird auch über das Temperaturprofil deutlich, dass der Energieentzug der EWK ungleich verteilt ist. Durch den Grundwasserfluss von rechts nach links wird auch die Kälte von rechts nach links transportiert. Ebenso wird deutlich, dass die Temperaturfahnen der einzelnen EWK teilweise zusammenwachsen und sich somit gegenseitig beeinflussen. Zusätzlich zu den EWK und dem Grundwasserfluss ist links unten der Einfluss der Tiefgarageneinfahrt auf einen EWK (EWK 7) zu sehen.

Abschließend soll erneut der Fokus auf die Energien des EWK-Systems gelegt werden. Dazu sind die Energiemengen aufgeteilt und auf die Flächen der EWK bezogen. Man stellt fest, dass die EWK mit  $43 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  den größten Anteil an der Energiegewinnung ausgemacht haben wie Abbildung 181 zeigt.

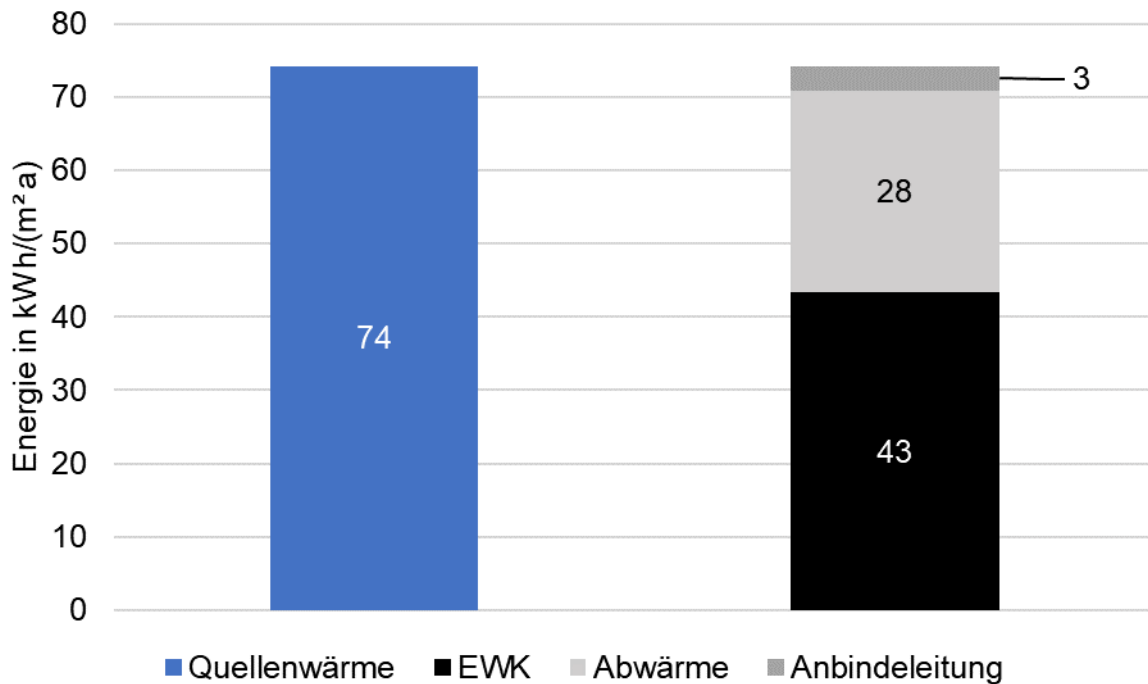


Abbildung 181 Aufteilung der spezifischen Quellwärme [29]

Für die Auslegung von EWK ist die **VDI 4640 Blatt 2** entscheidend. Abhängig von der Bodenart und der Klimazone des Standorts lassen sich hier die jährlichen, spezifischen Energieentzüge tabellarisch ablesen. Da im Projekt überwiegend Sand und Schluff vorhanden ist, lässt sich für die entsprechende Klimazone sagen, dass sich mit einem EWK unter einer Freifläche zwischen 28 kWh/(m²·a) und 48 kWh/(m²·a) entziehen lassen. Die 28 kWh/(m²·a) entsprechen dem Energieentzug eines EWK, der sich im Sand befindet; die 48 kWh/(m²·a) werden dagegen für einen EWK im Schluff angegeben. In dieser Spannweite sind die 43 kWh/(m²·a) eher am oberen Limit zu verorten. So lässt sich zunächst festhalten, dass laut Richtlinie ein EWK unter einem Gebäude **mit EWK unter einer Freifläche konkurrieren** kann, wenn ausreichend Grundwasser vorhanden ist. Da im Projekt der Hauptbestandteil des Bodens Sand ist und sich das EWK-System unter einem Gebäude befindet, würde man in Bezug auf die Richtlinie vermuten, dass er weniger Energie bereitstellen kann als er tatsächlich kann. Dies verdeutlicht, dass die Richtlinie eine konservative Abschätzung ist und sie gegebenenfalls angepasst werden kann. Aus Abbildung 181 lässt sich ebenfalls erkennen, dass 28 kWh/(m²·a) von der Abwärme stammen. So eignet sich ein EWK nicht nur für die **Energiegewinnung**, sondern auch für die **Energieverschiebung**. Die Rohrleitungen haben mit 3 kWh/(m²·a) beziehungsweise 17 kWh/(m²·a) nur einen geringen Teil zum Energieentzug beigetragen.

### Entwicklung einer Regelstrategie für die GKA

Nachdem der Ist-Zustand des EWK-Systems mit einem 3D-Simulationsmodell nachgebildet worden ist, sollen nun Regelstrategien für das EWK-System entwickelt werden. Das EWK-System soll geregelt werden, indem die Öffnung der elektrisch ansteuerbaren Ventile vorgegeben wird. Folglich soll der Volumenstrom geregelt werden.

Das beschriebene 3D-Simulationsmodell ist ausschließlich mit dem Simulationsprogramm DELPHIN nachgebildet worden. Zur Einbindung einer Regelstrategie wird nun zusätzlich das Simulationsprogramm MasterSim eingesetzt. MasterSim ermöglicht die Kopplung mehrere Simulationsmodelle und die Einbindung von Regeln.

Für dieses Vorhaben sollen die Daten aus dem Jahr 2022 verwendet werden, da seit diesem Jahr die Innenraumtemperatur erfasst wird und die Innenraumtemperatur einen erheblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat. In Abhängigkeit von der Temperaturverteilung sind zunächst Klimazonen für die Simulation voneinander abzugrenzen. Die farbigen Bereiche aus Abbildung 182 verkörpern links den Grundriss des ersten und rechts den Grundriss des zweiten Untergeschosses.

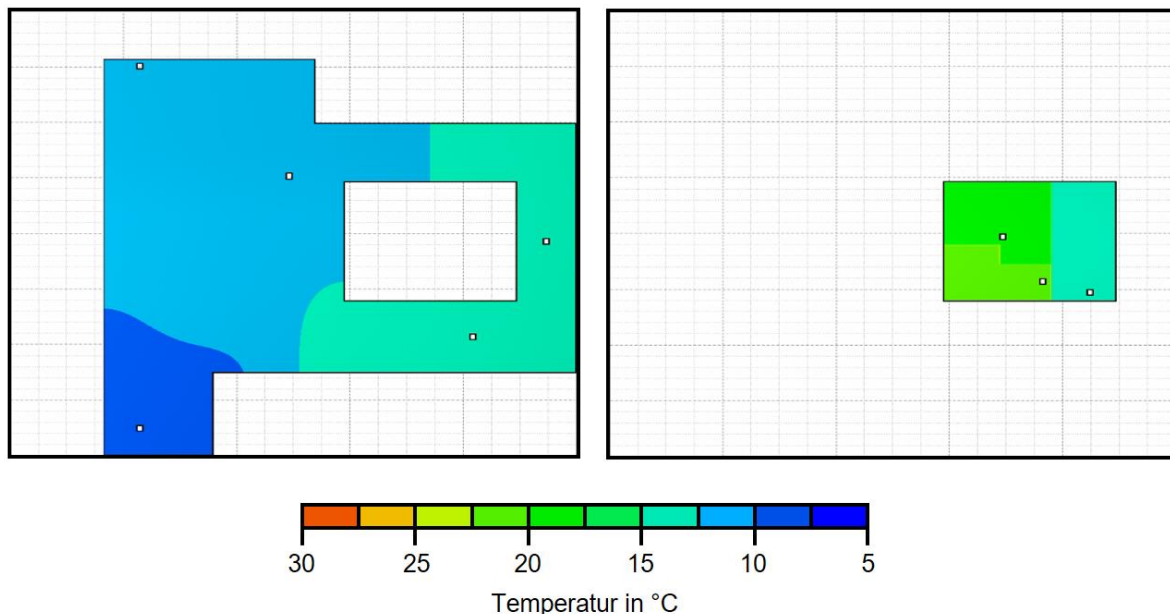


Abbildung 182 Klimazonen des ersten (links) und des zweiten Untergeschosses (rechts) [29]

Die weißen Vierecke innerhalb der mit Farbe gefüllten Grundrisse repräsentieren die verschiedenen Temperatursensoren. In 1,5 Tagesschritten sind die Temperaturmessungen ausgewertet worden. Abbildung 182 zeigt exemplarisch die Temperaturverteilung der beiden Untergeschosse für den 08.10.2022. Es fällt auf, dass sich das erste Untergeschoss (links) in drei Klimazonen unterteilen lässt. So lässt sich links unten die Einfahrt (dunkelblau) erkennen. Darauf folgt der erste Parkplatz (hellblau) und der zweite Parkplatz (türkis, Bewohnerparkplatz). Im zweiten Untergeschoss (rechts) sind ebenfalls drei Klimazonen ersichtlich. Der hellgrüne Bereich spiegelt die Energiezentrale, der dunkelgrüne Bereich die Wäschekammer und der türkise Bereich das Kellerabteil wider.

Für das 3D-Simulationsmodell ist für das erste Untergeschoss lediglich eine Klimazone verwendet worden. Nun sollen drei verschiedene Klimazonen eingebunden werden. Zur Ermittlung von Korrelationen ist die Außentemperatur als Prädiktor für die Untergeschosstemperaturen zu überprüfen.

Die Tabelle 38 zeigt hierfür die verschiedenen Korrelationen zwischen der Außentemperatur und den Innenraumtemperaturen der Untergeschosse in Abhängigkeit der Auflösung.

Tabelle 38 Korrelation zwischen Außentemperatur und Innenraumtemperatur der Untergeschosse

| Auflösung          |                                    | Sensor | 1 h  | 1 d  | 5 d  | 10 d | 1 Monat |
|--------------------|------------------------------------|--------|------|------|------|------|---------|
| <b>Korrelation</b> | Einfahrt zu Außentemperatur        | TEMP05 | 0,89 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99    |
|                    | Parkplatz 1 zu Außentemperatur     | TEMP06 | 0,79 | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,98    |
|                    | Parkplatz 2 zu Außentemperatur     | TEMP04 | 0,76 | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,97    |
|                    | Energiezentrale zu Außentemperatur | TEMP07 | 0,68 | 0,84 | 0,88 | 0,91 | 0,91    |
|                    | Wäschekammer zu Außentemperatur    | TEMP02 | 0,73 | 0,88 | 0,91 | 0,93 | 0,94    |
|                    | Kellerabteil zu Außentemperatur    | TEMP08 | 0,73 | 0,89 | 0,92 | 0,95 | 0,95    |

Die Korrelationen zwischen Außentemperatur und den Untergeschosstemperaturen ist abhängig von der Auflösung. Je niedriger die Auflösung, desto stärker korreliert die Außentemperatur mit den Innenraumtemperaturen der Untergeschosse. Jedoch wird mit kleiner werdender Auflösung der Informationsgehalt reduziert, sodass Schwankungen weniger berücksichtigt werden. Da die Temperaturschwankungen in Tiefgaragen durch das umgebene Erdreich weniger stark ausgeprägt sind, kann eine niedrigere Auflösung gewählt werden. Es ist sich für eine Auflösung von 10 d entschieden worden.

Da die Korrelationen zwischen der Außentemperatur und den Temperaturen des zweiten Untergeschosses niedriger sind als die Korrelation zwischen der Außentemperatur, ist nach einer anderen Temperatur als Prädiktor gesucht worden. Grund dafür ist, dass das zweite Untergeschoss weniger stark von der Außentemperatur beeinflusst wird als das erste. In Abbildung 183 Korrelationen verschiedenerer Temperaturen [29] sind die Korrelationen zwischen den Innenraumtemperaturen, der Außentemperatur und den Fluid-RL-Temperaturen der EWK dargestellt. Auch für diese Abbildung sind 10 d-Mittelwerte verwendet worden.

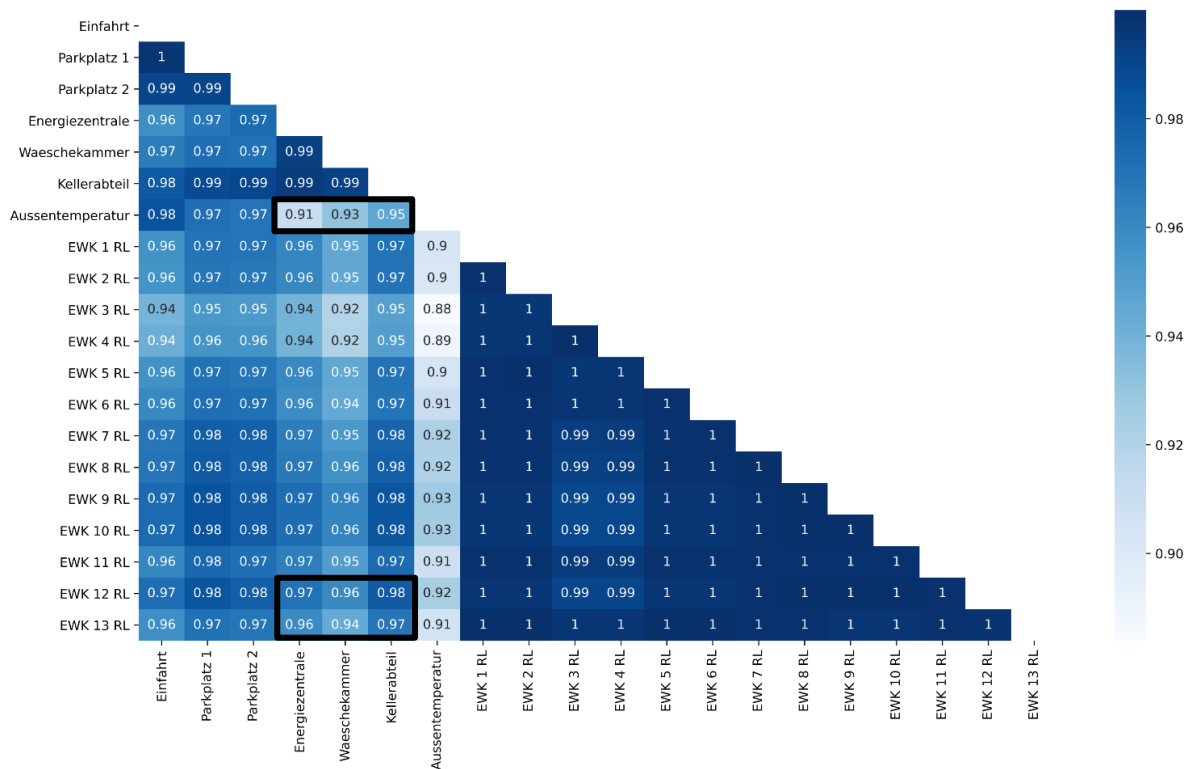


Abbildung 183 Korrelationen verschiedene Temperaturen [29]

Die Fluid-RL-Temperaturen der EWK repräsentieren in guter Näherung die Temperaturen des Bereichs im Untergrund, in dem sich der jeweilige EWK befindet. Die EWK 12 und EWK 13 sind in der Bodenplatte im zweiten Untergeschoss vorhanden. Daher liegt es nahe, diese als Referenztemperatur heranzuziehen.

Für die Wäschekammer wurde beispielsweise nur die RL-Temperatur von EWK 13 verwendet, da nur dieser EWK in der Bodenplatte unter der Wäschekammer liegt.

Neben den Innenraumtemperaturen sind auch die Wetterdaten, die Grundwasserdaten und die EWK-Daten aufzubereiten.

Die Wetterdaten bestehen aus den folgenden Größen:

- Außentemperatur in °C
- Relative Luftfeuchte in %
- Direkte Normalstrahlung in W/m<sup>2</sup>
- Diffuse Horizontalstrahlung in W/m<sup>2</sup>
- Windrichtung in °
- Windgeschwindigkeit in m/s
- Langwellige Himmelsgegenstrahlung in W/m<sup>2</sup>
- Luftdruck in Pa
- Regen in l/(m<sup>2</sup> h)

Die Außentemperatur ist über eine projektinterne Messung ermittelt worden. Bei Messaussetzern ist linear zu interpolieren.

Die restlichen Wetterdaten können vom Deutschen Wetterdienst als auch von der auf dem Dach des Gebäudes puls<sup>G</sup> installierten Wetterstation bezogen werden. Für den Datenbezug vom Deutschen Wetterdienst ist ein für das Projekt passender Standort zu finden. In Abbildung 184 Bestimmung der Wetterdaten [29] ist der Standort mit einem roten Kreuz und der Bereich des Referenzjahrs grau dargestellt.

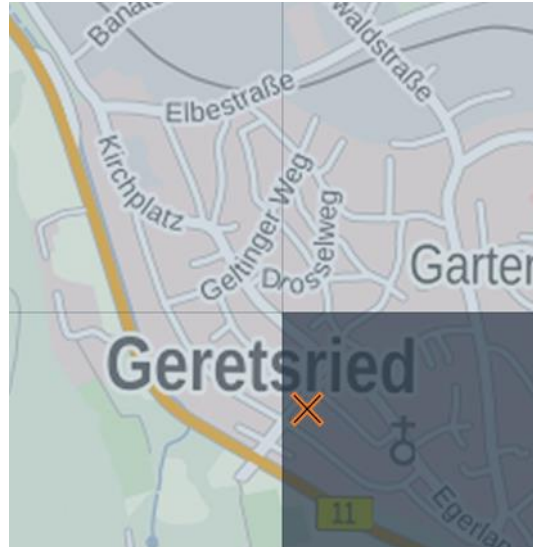


Abbildung 184 Bestimmung der Wetterdaten [29]

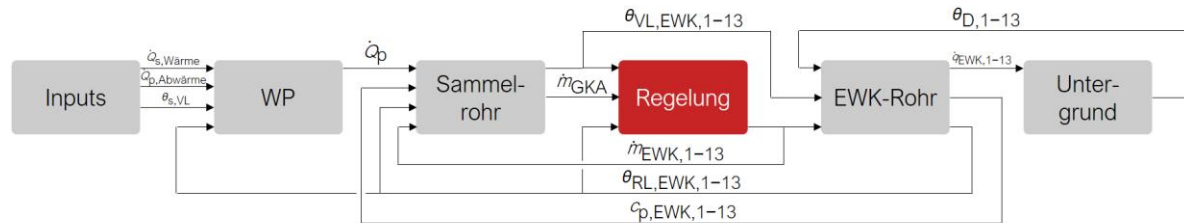
Nach der Auswahl des Standorts lässt sich ein Datensatz herunterladen, der das Testreferenzjahr von 2015 enthält. Jedoch fehlt bei diesem Datensatz der Niederschlag. Der Niederschlag lässt sich ebenfalls über den Deutschen Wetterdienst beziehen. Hierzu muss nach einer Messstelle gesucht werden, die sich möglichst nahe an dem tatsächlichen Standort befindet. Die nächste Niederschlagsmessung des Deutschen Wetterdienstes liegt in Holzkirchen. Holzkirchen befindet sich etwa 16 km östlich vom Projektstandort Geretsried. Um aus den gemessenen Niederschlagswerten ein repräsentativen Verlauf zu erstellen, sind die Jahre 2018, 2019, 2020 und 2021 gemittelt worden. Dies ergäbe allerdings einen abgeflachten Verlauf. Daher ist die Intensität berücksichtigt worden, indem der Verlauf von 2021 mithilfe der Mittelwerte nachgeahmt worden ist. 2021 hat es etwas mehr geregnet als im Mittel von 2018 bis 2021, weshalb für das repräsentative Jahr der Niederschlag von 2021 für jeden Zeitschritt um einen konstanten Prozentsatz (9 %) verkleinert worden ist.

Für die Validierung der Simulationsmodelle muss anschließend eine Simulation durchgeführt werden, die den realen Anlagenbetrieb des Jahres 2022 widerspiegelt. Dies gelingt, indem die gemessenen EWK-Leistungen in das DELPHIN-Simulationsmodell aufgenommen und die simulierten Untergrundtemperaturen mit den gemessenen RL-Temperaturen verglichen werden. Die EWK-Leistungen werden mithilfe eines Python-Skripts erstellt. Hierzu wird jeweils der WMZ verwendet. Dieser zählt jedoch nicht bidirektional, sodass nur die Wärmemenge erfasst wird. Die Kälteleistung wird über die gemessene Leistung bestimmt. Mit der Leistung ließe sich auch die Wärmeleistung bestimmen. Jedoch können Messaussetzer mit dem WMZ besser rekonstruiert werden, weshalb sich dazu entschieden worden ist, die thermische Leistung der EWK über die Wärmemenge und die Kälteleistung zu bestimmen. Sowohl die Wärmemengen als auch die Leistungen sind gefiltert und linear interpoliert worden. Die absoluten Leistungen

sind anschließend durch die Volumina, in denen die EWK im Untergrund liegen, geteilt worden, um volumenspezifische Leistungen zu erhalten.

### Struktur des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell für die Regelung der GKA wurde mit dem Programm MasterSim durch die Komponenten, die in Abbildung 185 dargestellt sind, nachgebildet.



Legende:

|                        |                                                                |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $c_{p,EWK,1-13}$       | spezifische, isobare Wärmekapazität, für jeden EWK individuell |
| $\dot{m}_{EWK,1-13}$   | Massenstrom der EWK, für jeden EWK individuell                 |
| $\dot{m}_{GKA}$        | Massenstrom der GKA bzw. auf der Primärseite der WP            |
| $\dot{Q}_{EWK,1-13}$   | spezifische EWK-Leistung, für jeden EWK individuell            |
| $\dot{Q}_p$            | thermische Leistung auf der Primärseite der WP                 |
| $\dot{Q}_{p,Abwärme}$  | thermische Leistung der Abwärme auf der Primärseite der WP     |
| $\dot{Q}_{s,Wärme}$    | thermische Leistung der Wärme auf der Sekundärseite der WP     |
| $\theta_{D,1-13}$      | Temperatur der Außenrohrwand, für jeden EWK individuell        |
| $\theta_{RL,EWK,1-13}$ | Temperatur des Rücklaufs der EWK, für jeden EWK individuell    |
| $\theta_{VL,EWK,1-13}$ | Temperatur des Vorlaufs in die EWK, für jeden EWK individuell  |
| $\theta_{VL,s}$        | Temperatur des Vorlaufs auf der Sekundärseite der WP           |

Abbildung 185 Schematisches Regelungsmodell (MasterSim) [29]

Bei den Inputs handelt es sich um Zeitreihen an Informationen. Sie geben vor, wie viel thermische Energie das Gebäude benötigt und welche VL-Temperatur auf der Sekundärseite der WP vorliegt.

Die restlichen Komponenten wurden als Functional Mock-up Interfaces (FMI) in MasterSim implementiert. Dazu wurden das Programm DELPHIN sowie der FMICodeGenerator verwendet.

Die WP-Komponente berechnet die thermische Energie, welche die GKA zur Verfügung stellt. Zur Erstellung dieser Komponente wurden die Herstellerangaben bezüglich der Leistungszahlen und der thermischen Leistung in Abhängigkeit der Quelltemperatur und der Temperatur auf der Sekundärseite der WP berücksichtigt.

Die Komponente „Sammelrohr“ bildet das massenstromgewichtete Mittel der RL-Temperaturen von den einzelnen EWK-Strängen. Außerdem ermittelt das Sammelrohr über eine konstante Temperaturspreizung zwischen der VL- und der RL-Temperatur die VL-Temperatur des Sammelrohrs. Diese VL-Temperatur entspricht auch der VL-Temperatur aller EWK-Stränge, da alle EWK-Stränge vom gleichen Sammelrohr gespeist werden. Daneben berechnet das Sammelrohr den Massenstrom, der durch das Sammelrohr fließt. Dies geschieht, indem die thermische Leistung durch die spezifische Wärmekapazität und die Temperaturspreizung geteilt wird.

Die EWK-Rohre werden dazu benötigt, die volumenspezifischen Leistungen aus dem Teilmassenstrom, der durch einen EWK-Strang fließt, zu kalkulieren. Hierzu werden die Geometrie, das Material sowie die Temperatur der Rohraußenwand und Stoffwerte benötigt. Bei diesem Vorgehen werden als Teilergebnisse auch die spezifische Wärmekapazität und die RL-Temperatur ausgegeben. Hervorzuheben ist, dass mithilfe von PPDS-Gleichungen temperaturabhängige Stoffwerte verwendet wurden.

Bei der Untergrund-Komponente handelt es sich um sechs DELPHIN-Modelle, die gemeinsam den Untergrund des Systems nachbilden. Aus diesen Modellen wird die Temperatur der Rohraußenwand bestimmt.

Das Modell der Regelung baut auf dem Validierungsmodell auf. Dieses Modell hat eine Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) von 0,94 K und einen Kendall'schen Rangkorrelationskoeffizienten von 0,84, was einen starken Zusammenhang postuliert [29].

### **Funktionsweise der Regelung**

Das Herzstück dieser Untersuchung stellt die Komponente dar, welche die Regelung modelliert. Die Umsetzung der Regelung erfolgt mithilfe folgender Punkte:

- Ermitteln des individuellen Status für jeden EWK
- Ermitteln des Status der GKA (ggf. Anpassen der individuellen Status für jeden EWK)
- Limitieren des Gesamtmassenstroms der GKA, falls GKA im Spül- oder Testfall
- Berechnen (und ggf. Diskretisieren) der Faktoren für jeden EWK
- Aufteilen des Gesamtmassenstroms der GKA auf die EWK

Für die Regelung bekommt jeder EWK-Strang und die GKA selbst einen eigenen Status. Die verschiedenen Status können der entnommen werden.

Tabelle 39 Individuelle EWK-Status

| Status                                                                             | kodierter Status |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| an                                                                                 | 1                |
| aus, weil Wärme entzogen wird und die EWK-Temperatur zu kalt ist                   | 0                |
| aus, weil Abwärme eingespeist wird und die EWK-Temperatur zu warm ist              | -1               |
| an und im Spülmodus, nachdem der EWK wegen Wärmeentzug ausgeschaltet worden ist    | 4                |
| an und im Spülmodus, nachdem der EWK wegen Abwärmeeintrag ausgeschaltet worden ist | 5                |
| an und im Testmodus, nachdem der EWK wegen Wärmeentzug ausgeschaltet worden ist    | 2                |

an und im Testmodus, nachdem der EWK wegen Abwärmeeintrag ausgeschaltet worden ist

3

Neben der Beschreibung sind in Tabelle 39 auch die kodierten Status ersichtlich. Die Statusmeldungen werden benötigt, um die Zustände zu beschreiben, wenn ein EWK-Strang oder die gesamte GKA ausgeschaltet ist und durch den Spül- bzw. Testmodus wieder angefahren wird. Wird ein solcher Status aktiviert, so läuft eine vordefinierte Zeit ab, bis in einen anderen Status übergeleitet wird.

Im Folgenden wird das Verhalten der EWK-Stränge in Abhängigkeit des GKA-Status beschrieben.

#### Eingeschaltete GKA (Status = 1)

Wenn die GKA eingeschaltet ist, werden die Durchflüsse der einzelnen EWK-Stränge durch die Ventile entsprechend der jeweiligen RL-Temperatur eines EWK-Strangs reguliert. Dabei wird die RL-Temperatur eines EWK-Strangs mit der RL-Temperatur der GKA verglichen.

Ist die RL-Temperatur des Sammelrohrs wärmer als dessen VL-Temperatur, so entnimmt die GKA dem Untergrund Wärme. Wenn Wärme entzogen wird und die RL-Temperatur eines EWK-Strangs größer als RL-Temperatur der GKA ist, eignet sich der EWK-Strang überdurchschnittlich gut. In diesem Fall befindet sich die RL-Temperatur des EWK-Strangs über der Schwelle und das entsprechende Ventil wird vollständig geöffnet. Ein vollständig geöffnetes Ventil entspricht einem (Durchfluss-) Faktor von 1. Ist die RL-Temperatur eines Strangs, wie in Abbildung 186, nur marginal kleiner als die RL-Temperatur der GKA, so ist der EWK unterdurchschnittlich gut. Allerdings kann aus diesem EWK-Strang immer noch viel Energie entzogen werden, weshalb hier das entsprechende Ventil laut Abbildung 186 noch zu 50 % geöffnet ist.

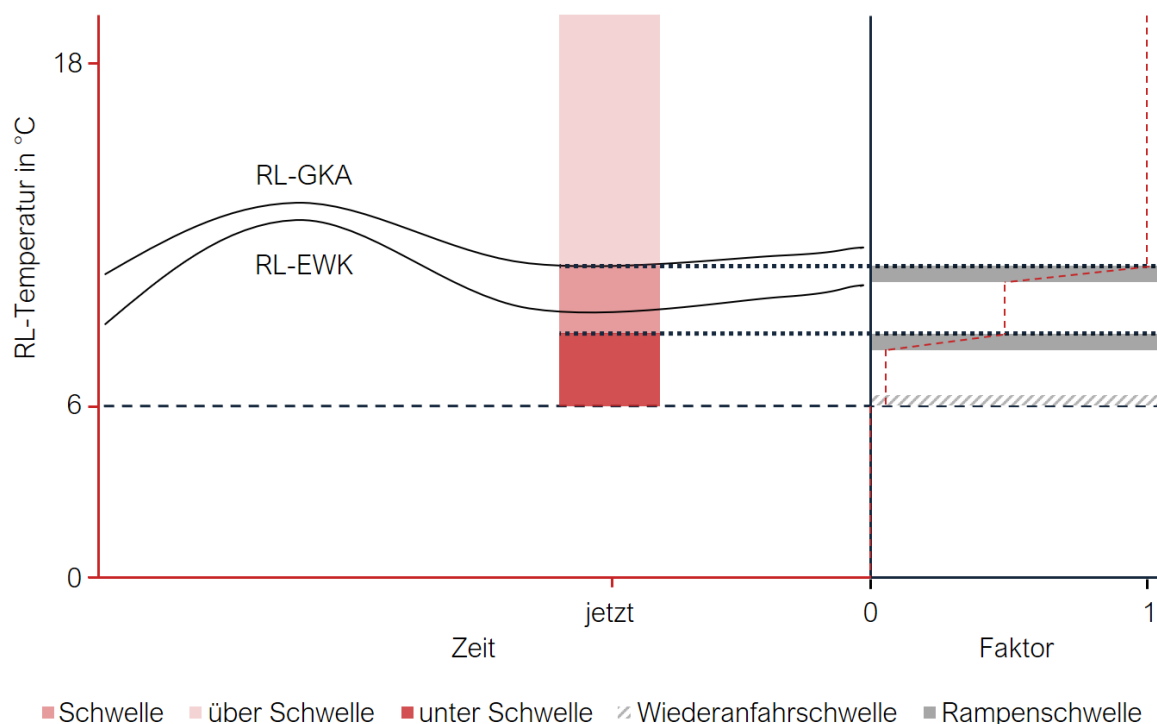


Abbildung 186 Faktorvergabe bei Wärmeentzug [29]

Ist die RL-Temperatur eines EWK-Strangs deutlich kleiner als die RL-Temperatur der GKA, aber noch größer als die untere Temperaturgrenze, kann wenig Energie mehr entzogen werden. In diesem Fall befindet sich die RL-Temperatur des EWK-Strangs unter der Schwelle. Als Folge dessen wird der Volumenstrom noch weiter reduziert. Dadurch wird die RL-Temperatur im Sammelrohr der GKA kaum von der des unterdurchschnittlichen EWK-Strangs verringert. Der Vorteil dabei ist allerdings, dass die RL-Temperatur des EWK-Strangs immer noch messtechnisch erfasst wird. Zwischen den Schwellen gibt es die als Rampenschwellen betitelte Hysterese. Diese verhindern, dass die Ventile bei RL-Temperaturen, die zwischen zwei Bereichen (z.B. zwischen Schwelle und unter Schwelle) oszillieren, häufig auf- und zugehen.

Um die Bodenplatte und die WP vor Beschädigung zu schützen, gibt es die untere Temperaturgrenze. Sie ist nur relevant, wenn aus dem Untergrund Wärme extrahiert wird. Entscheidend für diese Temperaturgrenze ist die VL-Temperatur auf der Primärseite der WP. Allerdings ist diese Temperatur für alle EWK-Stränge gleich, da jeder EWK-Strang aus demselben Sammelrohr gespeist wird. Um trotzdem beim Abschalten der EWK-Stränge zwischen den einzelnen EWK-Strängen differenzieren zu können, werden die RL-Temperaturen der EWK-Stränge verwendet. Der Vorteil liegt nämlich darin, dass sich die RL-Temperaturen der EWK-Stränge voneinander unterscheiden. Um aus den RL-Temperaturen der EWK-Stränge die kritischen VL-Temperaturen zu berechnen, wird die primärseitige Temperaturspreizung der WP benötigt. Weil beim Energieentzug die RL-Temperaturen wärmer als die VL-Temperaturen der EWK-Stränge sind, muss von den RL-Temperaturen die primärseitige Temperaturspreizung der WP abgezogen werden, um die VL-Temperatur zu erhalten. Die VL-Temperatur soll 2 °C bei einer primärseitigen Temperaturspreizung der WP von 4 K nicht unterschreiten, sodass die untere Temperaturgrenze die RL-Temperatur auf 6 °C begrenzt.

Wird Wärme bereitgestellt und unterschreitet ein EWK-Strang die untere Temperaturgrenze, wird dieser EWK-Strang für eine bestimmte Zeit ausgeschaltet. Um zu ermitteln, für wie lange ein EWK-Strang ausgeschaltet werden soll, wurde das Regenerationsverhalten analysiert, das sich exemplarisch in Abbildung 187 zeigt.

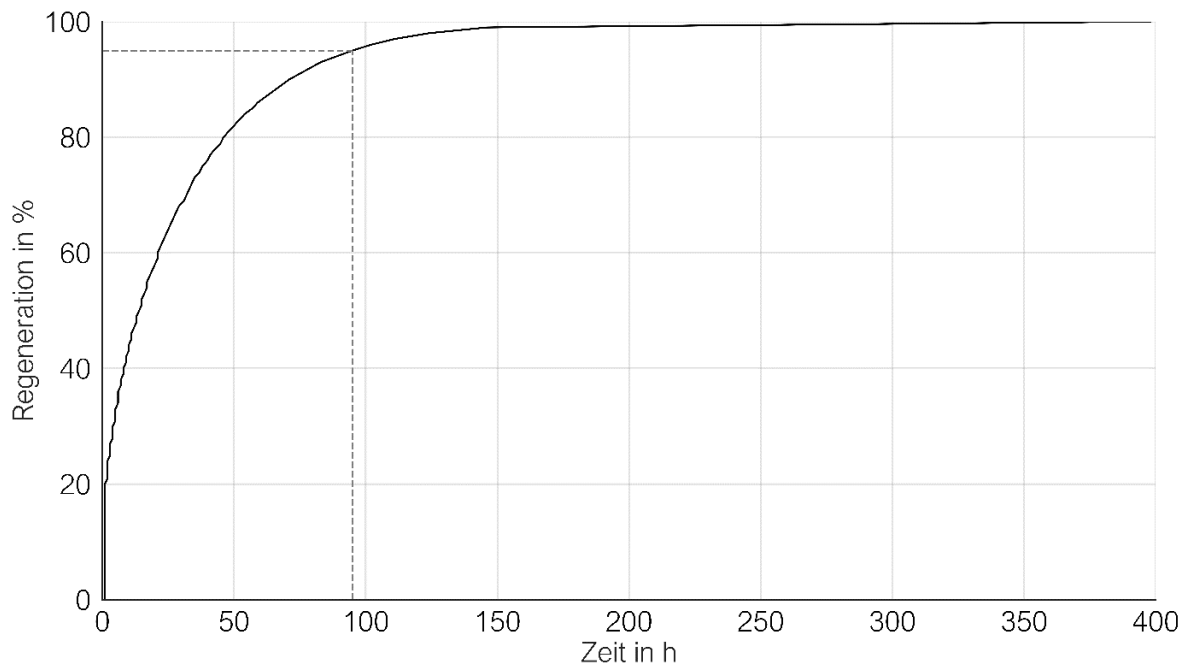


Abbildung 187 Sprungantwort eines Simulationsmodells [29]

Dabei wurden ein stark vereinfachtes Modell mit einem EWK und konstanten, repräsentativen Bedingungen verwendet. Beispielsweise wurde dem Modell eine konstante Temperatur für das Innenraumklima aufgeprägt. Außerdem wurde ein repräsentatives Energieprofil auf einen EWK für ein halbes Jahr aufgeprägt. Nach Ablauf des halben Jahres, wurde der EWK ausgeschaltet. Dabei wurde die Zeit gemessen, bis der Untergrund sich vollständig regeneriert hat. Die Regenerationszeit wurde in [29] als die Zeit definiert, die zwischen dem Ausschalten des EWK und dem Erreichen der 95 % des Temperaturunterschieds zwischen dem be- und dem entlasteten Untergrund vergangen ist. In Abbildung 187 ist die Regenerationszeit durch die gestrichelte Linie dargestellt. Sie beträgt 95 h. Hinzukommend ist zu erkennen, dass bei der Regeneration ein PT1-Verhalten vorliegt. D.h., dass sich der EWK am Anfang schnell und mit zunehmender Zeit immer langsamer regeneriert. Aufgrund dessen wird für die Regelung nicht die komplette Regenerationszeit benötigt. Dieser Versuch wurde mit repräsentativen Bedingungen für den Winter und den Sommer durchgeführt. Außerdem wurde das Simulationsmodell so erweitert, dass neben dem zu analysierenden EWK noch zwei weitere EWK aufgenommen wurden. Diese EWK dienten dazu, die Beeinflussung durch andere EWK ebenfalls zu simulieren. Allerdings zeigte sich, dass das Regenerationsverhalten unabhängig von der Jahreszeit und der Beeinflussung nahezu identisch war.

Unterschreitet ein EWK-Strang also die Temperaturgrenzen, wird er für eine bestimmte Zeit ausgeschaltet, indem das Ventil geschlossen wird. Nachdem die Zeit zum Regenerieren abgelaufen ist, wird der Spülmodus ausgelöst. Dabei wird das Fluid umgewälzt, um Temperaturverzerrungen durch anstehendes Fluid beim Messen auszuschließen. Während des Spülens erfasst die Regelung die Fluidtemperatur nicht. Ist der Spülmodus beendet, folgt der Testmodus. In diesem Modus wird die Temperatur so wie im eingeschalteten Modus überwacht. Im Testmodus muss allerdings noch eine zusätzliche Bedingung erfüllt sein. Hier muss innerhalb der Testzeit die in Abbildung 186 als Wiederanfahrswelle gekennzeichnete Hysterese überschritten werden, damit der EWK-Strang wieder eingeschaltet wird. Ist dies nach Ablauf der

Testzeit nicht der Fall, wird der EWK-Strang erneut für die eingestellte Zeit zum Regenerieren ausgeschaltet und der Ablauf beginnt erneut.

Genau umgekehrt verhält es sich bei der Faktorvergabe bei Abwärmeeintrag. Abwärme wird in den Untergrund gegeben, wenn die RL-Temperatur kälter als die VL-Temperatur ist. Die kritische Temperatur ist dabei die RL-Temperatur. Sie wird mit der oberen Temperaturgrenze verglichen, die in Abbildung 188 auf 18 °C gesetzt ist.

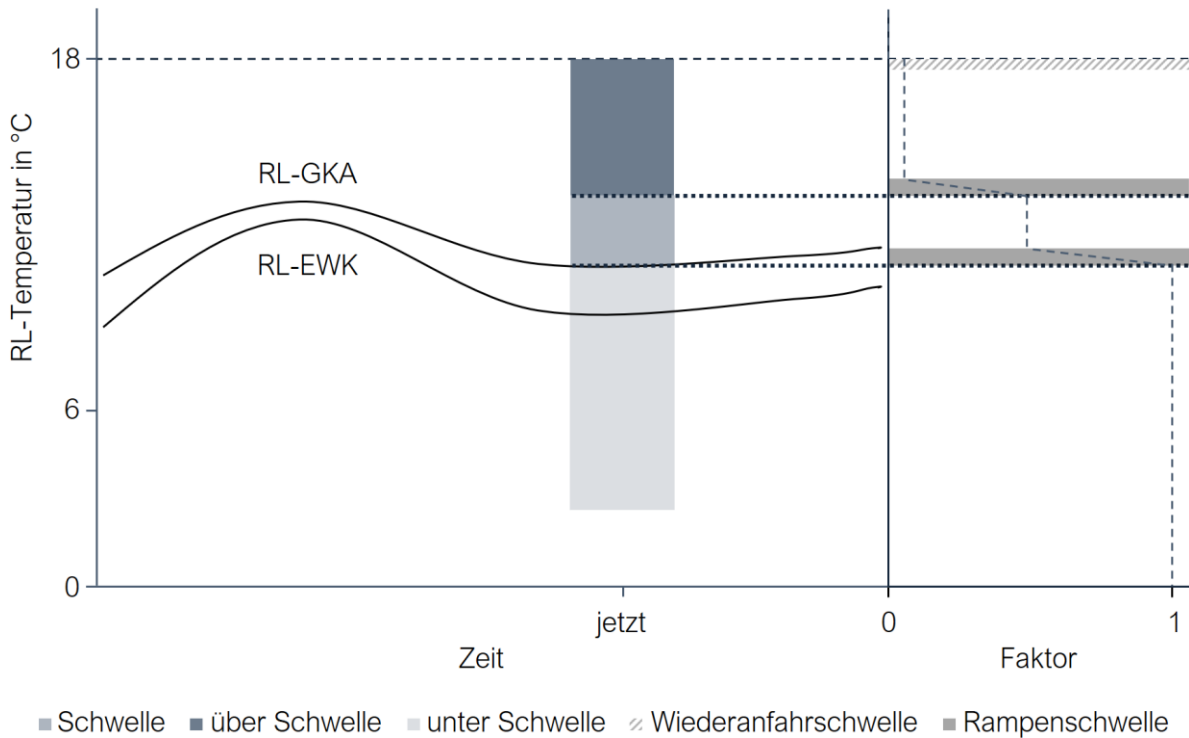


Abbildung 188 Faktorvergabe bei Abwärmeeintrag [29]

Die obere Temperaturgrenze stellt sicher, dass effektiv passiv gekühlt werden kann. Wird diese überschritten, so wird der entsprechende EWK-Strang für eine bestimmte Zeit ausgeschaltet. Daraufhin folgt der Spül- und der Testmodus. Im Testmodus wird entschieden, ob der EWK-Strang wieder ein- oder ausgeschaltet wird.

Ausgeschaltete GKA (Status = 0 oder Status = -1)

Zu beachten ist zusätzlich, dass alle EWK-Stränge ausgeschaltet werden, sobald die Minimalanzahl der EWK-Stränge unterschritten wird; denn wenn zu wenige EWK-Stränge eingeschaltet sind, wird bei gleicher thermischer Leistung und gleicher Temperaturspreizung der gleiche Gesamtvolumenstrom auf weniger EWK-Stränge verteilt. Dadurch steigt der Druckverlust des Systems. Die Minimalanzahl stellt also sicher, dass die verbaute Umwälzpumpe den Druckverlust des Systems überwinden kann. Dafür ist eine überschlägige Druckverlustberechnung für Leitungen und Einbauten durchgeführt worden, dessen zugrundeliegendes Schema in Abbildung 189 dargestellt ist.

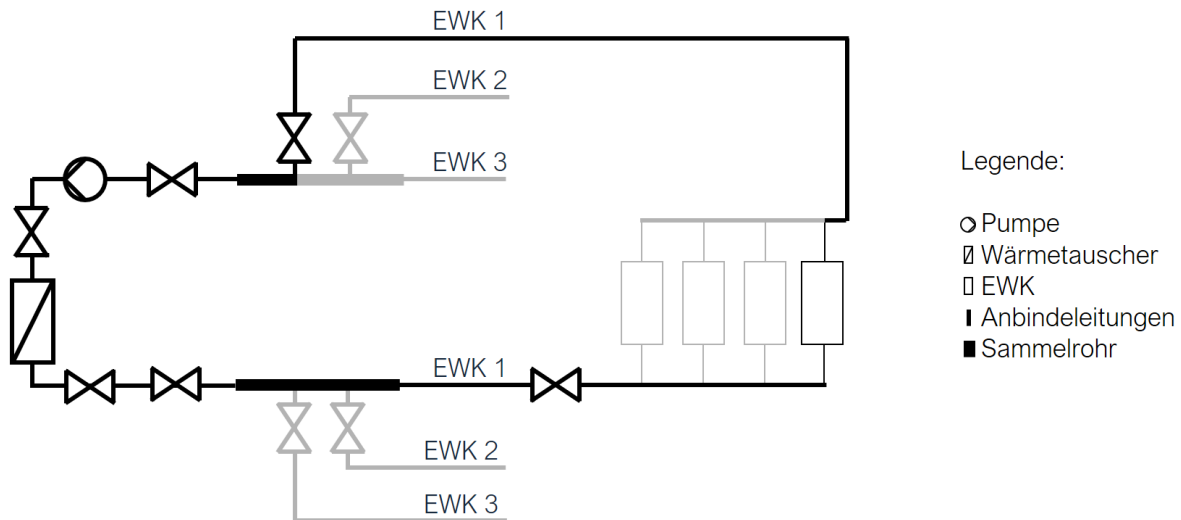


Abbildung 189 Leitungen und Einbauten für die Druckverlustbestimmung [29]

Bei einer sekundärseitigen VL-Temperatur von etwa 55 °C, einer primärseitigen Temperaturspreizung von 3 K und einer Leistungszahl von 4 lässt sich mithilfe von Rohrkenmlinien und Pumpenkenmlinie festhalten, dass durch die GKA maximal 13,7 m³/h fließen und die Mindestanzahl eingeschalteter EWK-Stränge auf 3 zu stellen ist.

Zu beachten ist allerdings, dass die Mindestanzahl eingeschalteter EWK-Stränge abhängig von der sekundärseitigen VL-Temperatur ist. Zu beachten ist, dass beispielsweise eine Reduzierung dieser VL-Temperatur die Leistungszahl erhöht, wodurch ein höherer, maximaler Volumenstrom entsteht. Der erhöhte maximale Volumenstrom führt schließlich dazu, dass die Mindestanzahl eingeschalteter EWK-Stränge erhöht werden muss, damit die Umwälzpumpe die Druckverluste überwinden kann.

Aufgrund dessen und aufgrund der überschlägigen Berechnung der Druckverluste, wird die Mindestanzahl eingeschalteter EWK-Stränge nicht auf 3, sondern auf 4 gesetzt.

### **Beispiel der Regelung**

Um die Regelung besser nachvollziehen zu können, wird im Folgenden ein Test der Regelung als Beispiel vorgestellt. Dabei wurde mit fiktiven Werten die Regelung getestet. In Abbildung 190 sind die Temperaturen und deren Grenzen dargestellt, die für den Test verwendet wurden.

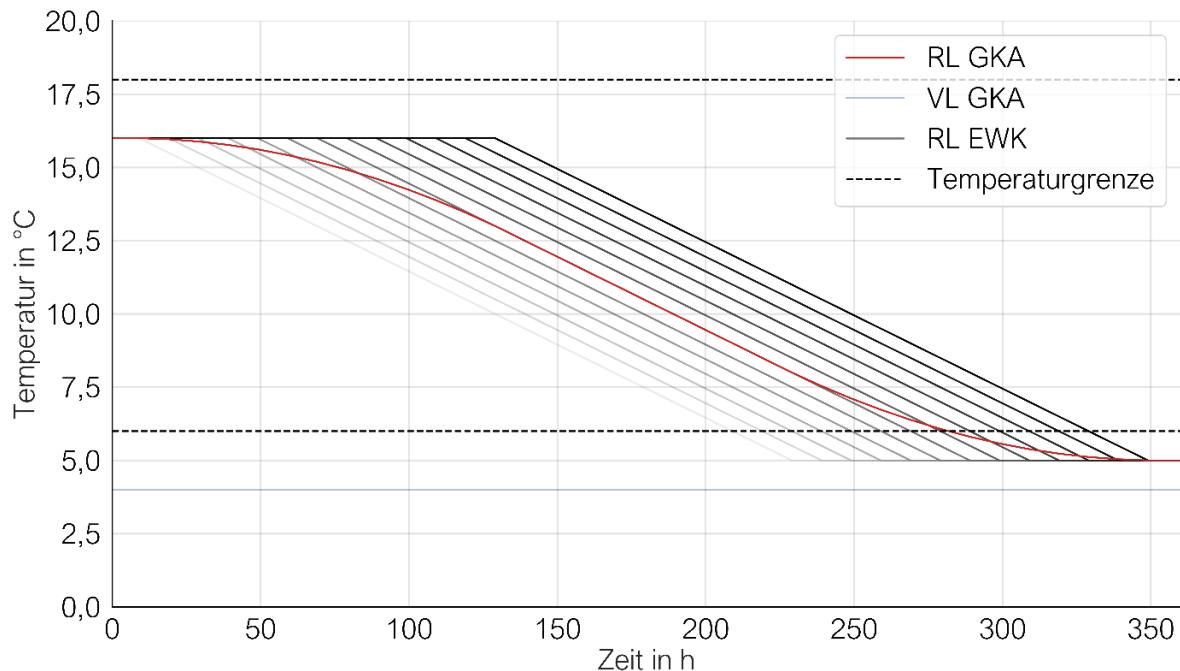


Abbildung 190 Beispiel einer Temperaturvorgabe für einen Reglertest [29]

Die VL-Temperatur (blau) wurde konstant auf 4 °C gestellt. Die RL-Temperaturen sind durchgehen höher. Deshalb wird bei diesem Beispiel dem Untergrund durchgehend Wärme entnommen. Die RL-Temperaturen fallen nacheinander, mit einer negativen, konstanten Steigung von 16 °C auf 5 °C ab. Die RL-Temperatur der GKA (rot) wird hier vereinfacht gebildet, indem der Mittelwert von allen RL-Temperaturen der EWK-Stränge (grau) berechnet wird. Der Volumenstrom und die Temperaturgrenzen werden bei der Mittelung nicht beachtet.

Zusätzlich sind die Temperaturgrenzen durch gestrichelte Linien dargestellt. Sie liegen bei 6 °C und bei 18 °C. Da Wärme entnommen wird, ist allerdings nur die untere Temperaturgrenze von Belangen.

Solange die GKA an ist, wird der Gesamtmassenstrom, der durch das Sammelrohr der GKA fließt, konstant auf 13 kg/s gehalten. Es wurde sich für 13 kg/s entschieden, da bei diesem Test 13 EWK-Stränge betrachtet wurden und bei einer gleichen Aufteilung durch jeden EWK-Strang 1 kg/s strömt.

Zum Zeitpunkt 0 h sind alle EWK-Stänge an, da keine RL-Temperatur die untere Temperaturgrenze unterschreitet. Somit haben zum Zeitpunkt 0 h alle EWK-Stränge sowie die GKA einen Status von 1. Dies lässt sich auch in den oberen beiden Diagrammen von Abbildung 191 nachvollziehen.

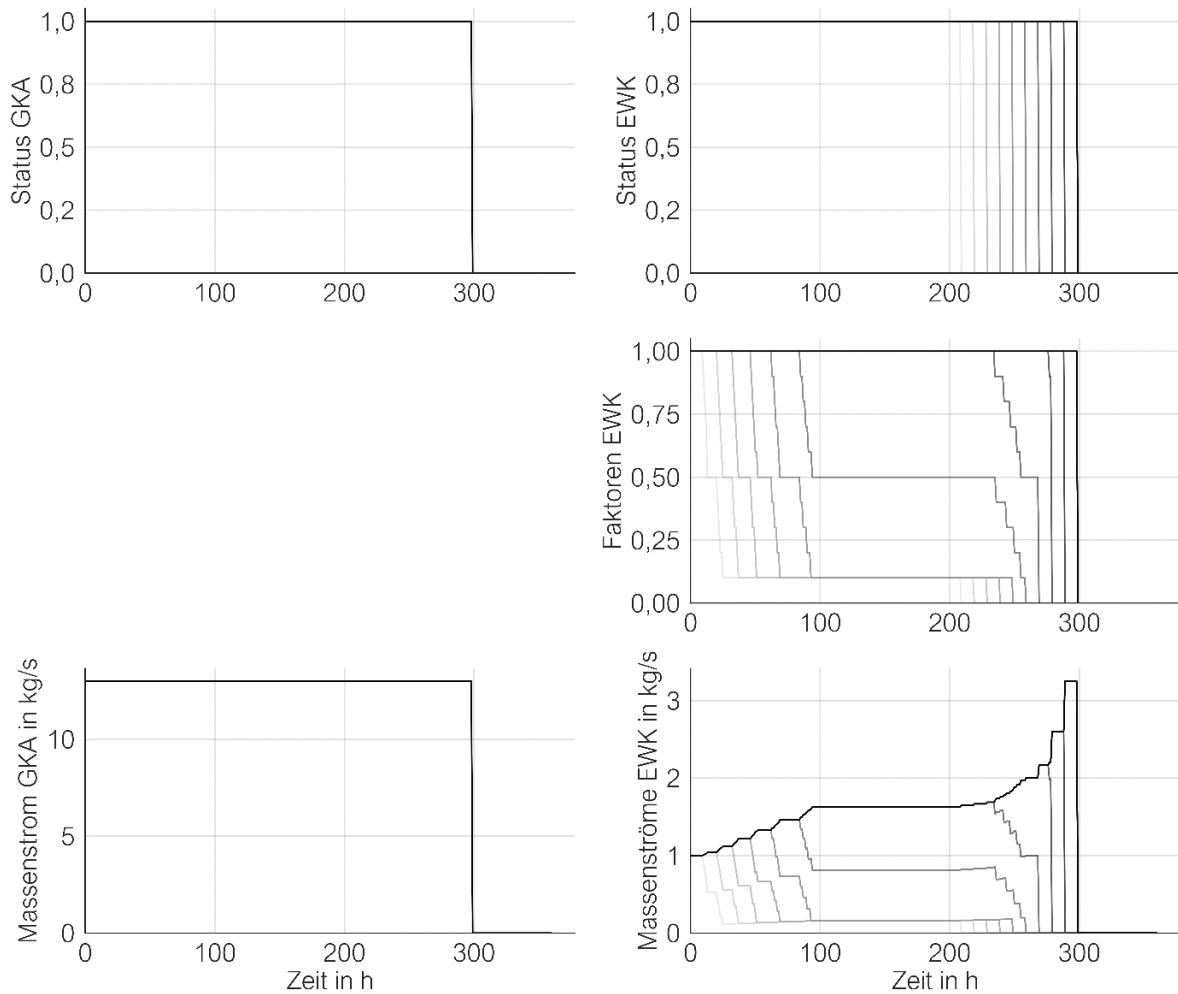


Abbildung 191 Status, Faktoren und Massenströme des Reglertests [29]

Verfolgt man die RL-Temperatur, die nach den ersten 10 h abfällt, fällt auf, dass diese sich zunächst immer stärker von der RL-Temperatur der GKA distanziert. Folglich wird das entsprechende Ventil immer weiter zuge dreht. Wie stark ein Ventil zuge dreht ist, wird durch die Faktoren vorgegeben. Ein Faktor von 1 entspricht einem vollständig (= 100 %) geöffneten Ventil, während z.B. ein Faktor von 0,4 einem zu 40 % geöffneten Ventil. Welche Faktoren die Regelung bei den entsprechenden Temperaturen ausgibt, wird im mittleren, rechten Diagramm deutlich. Der Faktor des EWK-Strangs, dessen RL-Temperatur als erstes abfällt, fällt zunächst mit einer nahezu konstanten Steigung und erreicht ein Plateau bei 0,5. Anschließend verringert sich der Faktor des EWK-Strangs weiter, bis erneut ein Plateau bei 0,1 erreicht wird. Dies liegt daran, dass dessen RL-Temperatur aus der Schwelle fällt und anschließend unter der Schwelle liegt. Nach 210 h wird der Faktor schließlich von 0,1 auf 0 gesetzt wird. Denn nach 210 h unterschreitet die RL-Temperatur des EWK die untere Temperaturgrenze unterschreitet. Ab diesem Zeitpunkt wird der Status des betrachteten EWK von 1 auf 0 gestellt.

Die drei Plateaus entsprechen somit den drei Temperaturbändern aus Abbildung 187. Um Oszillieren zu vermeiden, werden die Rampenschwellen verwendet. Sie sind dafür verantwortlich, dass die Werte zwischen den Plateaus nicht direkt von einem auf den anderen Wert fallen, sondern sich sukzessive an den anderen Wert annähern.

Da ab der zehnten Stunde der Massenstrom eines EWK-Strangs durch den Faktor verkleinert wird und der Massenstrom der GKA konstant gehalten wird, wird durch die restlichen EWK-Stränge mehr Massenstrom gepumpt. Dieses Verhalten zeigt sich nach zehn Stunden in dem Diagramm rechts unten in Abbildung 191.

Bei den restlichen EWK-Strängen verhält es sich ähnlich. Die Verläufe können ebenfalls dem Abbildung 191 entnommen werden. Hervorzuheben ist noch, dass nach 300 h der viertletzte EWK-Strang ausgeschaltet wird. Da die minimale Anzahl eingeschalteter EWK-Stränge im Test vier beträgt und ab 300 h weniger als vier EWK-Stränge eingeschaltet sind, werden auch die restlichen EWK-Stränge ausgeschaltet. Dies führt dazu, dass der Status der GKA von 1 auf 0 geändert wird und der Massenstrom der GKA von 13 kg/s auf 0 kg/s fällt. Auch dieses Verhalten lässt sich in nachvollziehen.

### Variantenanalyse der Regelung

Für die Regelung wurden verschiedene Parameter variiert und die Varianten wurden anhand der nutzbargemachten thermischen Energie miteinander verglichen. Je mehr thermische Energie die GKA in Kombination mit der WP zur Verfügung stellen kann, desto besser ist die Variante. Da die Berechnung der Modelle viel Echtzeit in Anspruch genommen hat, konnte nicht jeder Faktor mit jedem verglichen werden. Deshalb wurden Parameter selektiert, bei denen ein größerer Einfluss vermutet wird [29]. Sind zwei Parameter voneinander abhängig, so werden entsprechende Kombinationen analysiert. Ansonsten wird nur der zu analysierende Parameter variiert. Der Parameter einer Kategorie, mit dem am meisten Energie bereitgestellt werden kann, wird anschließend als der beste Parameter der Kategorie titulierte und für alle weiteren Modelle eingestellt. Dies wird solange fortgeführt, bis für jede Kategorie die optimalen Parameter bestimmt wurden.

Der tatsächliche Pfad zur Bestimmung der optimalen Parameter ist in Abbildung 192 mit roten Pfeilen akzentuiert.

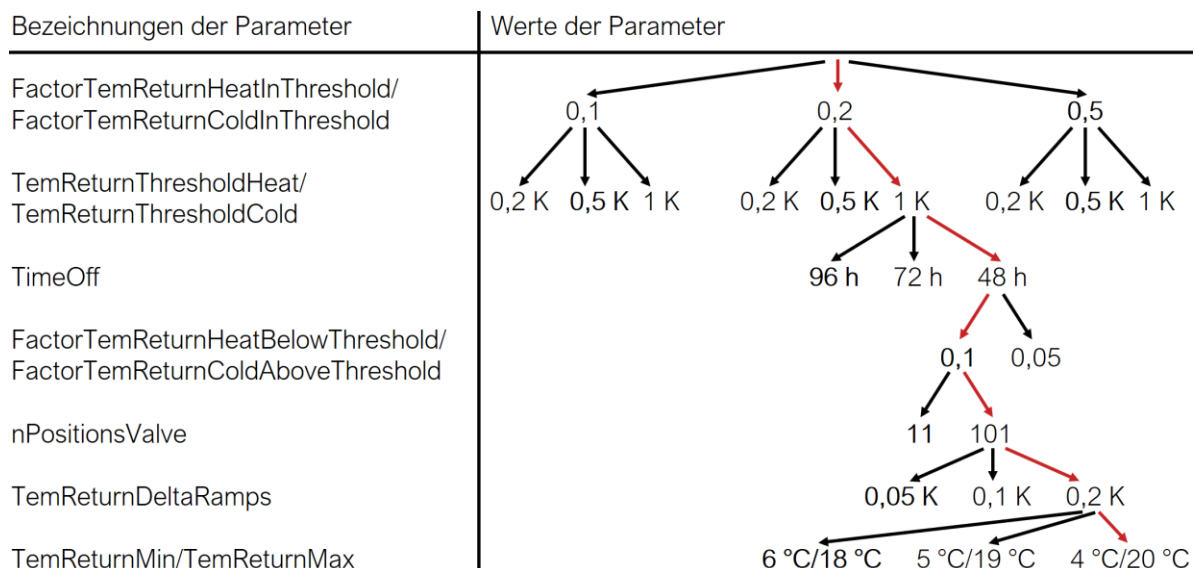


Abbildung 192 Variantenpfad zur Ermittlung optimierter Reglerparameter [29]

Durch die Parameterstudie konnte im Vergleich zu den anfangs eingestellten Parametern eine Verbesserung von 66 % erzielt werden. V.a. die Verkürzung der Regenerationszeit und die Herabsetzung der unteren Temperaturgrenze von 6 °C auf 4 °C waren ausschlaggebend für die Optimierung.

Alle einzustellenden Parameter für den Regler sind in Tabelle 40 zusammengefasst.

Tabelle 40 Zusammenfassung der Reglerparameter

| Parameter                                                               | Wert               |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| TemReturnMin                                                            | 6 °C → 5 °C → 4 °C |
| TemReturnMax                                                            | 20 °C              |
| TemReturnThresholdHeat/<br>TemReturnThresholdCold                       | 1,0 K              |
| TemReturnDeltaRamps                                                     | 0,2 K              |
| TemHysteresisTest                                                       | 0,2 K              |
| FactorTemReturnHeatAboveThreshold/<br>FactorTemReturnColdBelowThreshold | 1,0                |
| FactorTemReturnHeatInThreshold/<br>FactorTemReturnColdInThreshold       | 0,2                |
| FactorTemReturnHeatBelowThreshold/<br>FactorTemReturnColdAboveThreshold | 0,1                |
| FactorFlushTest                                                         | 0,2                |
| TimeOff                                                                 | 48 h               |
| TimeFlush                                                               | 1 h                |
| TimeTest                                                                | 3 h                |
| nGHEMin                                                                 | 4                  |
| nPositionsValve                                                         | 101                |

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die untere Temperaturgrenze sukzessive von 6 °C auf 4 °C herabgesetzt werden soll, um mehr Energie aus der GKA bereitstellen zu können.

Weil die gemessene, thermische Leistung bereits durch die Priorisierung anderer Anlagen und durch die Temperaturgrenzen des Wärmeträgermediums der GKA die Messwerte beeinflusst werden, können die simulierten Daten nicht direkt dazu genutzt werden, um allein die Verbesserung durch die Regelung zu bewerten. Der Vergleich eignet sich allerdings dafür, das Potenzial der GKA-priorisierten, optimierten Regelung aufzuzeigen. Wird die untere Temperaturgrenze auf 4 °C gestellt, dann kann mit der geregelten GKA 1,5-mal mehr Quellwärme der GKA entnommen (192.000 kWh/a) werden als die Messwerte (129.000 kWh/a) anzeigen [29]. Die Unterschiede zeigen sich in Abbildung 193 anhand der durchgezogenen Linien.

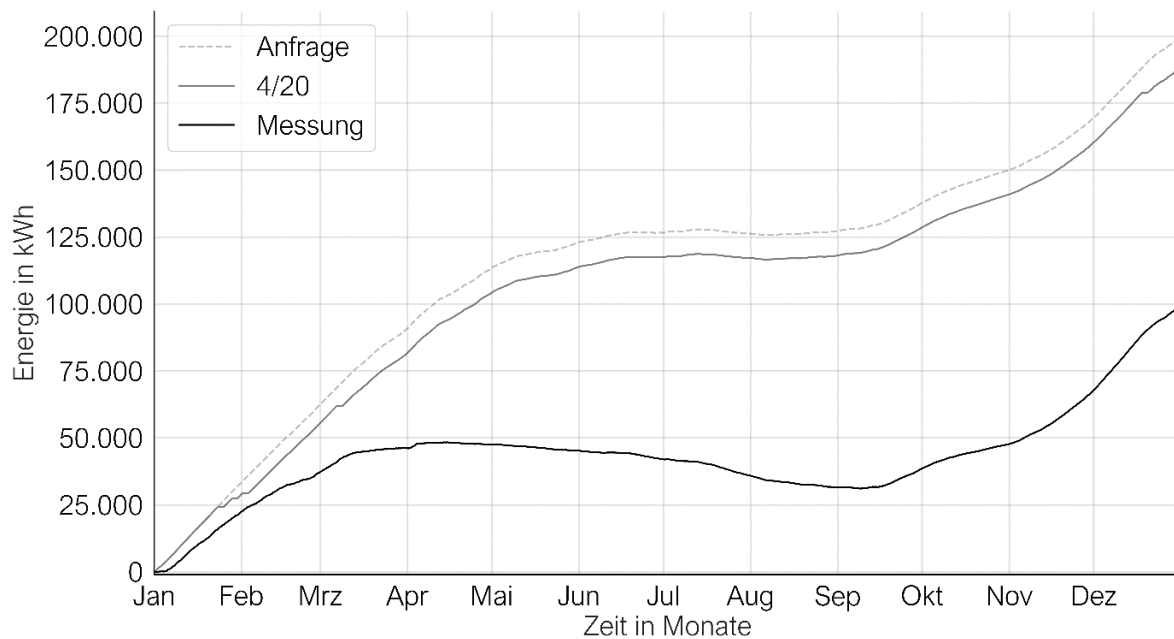


Abbildung 193 Summenkurve der gemessenen und der simulierten, geregelten GKA-Leistung [29]

Die gestrichelte Linie repräsentiert die Energiemenge, die maximal von der WP im Verbund mit der GKA bereitgestellt werden kann. Sie wird von der Leistungsfähigkeit der WP begrenzt. Aufgrund dessen können maximal 91 % der thermischen Energie von dem System aus WP und GKA bereitgestellt werden. Davon kann die geregelte GKA 95 % bereitstellen, da die GKA an ihre Systemgrenzen kommt und deshalb ausgeschaltet werden muss. Dies ist in Abbildung 193 anhand der horizontalen Linien der durchgezogenen, grauen Kurve zu erkennen. Im Vergleich zu Messdaten kann durch die GKA priorisierende, optimierten Regelung der Quellwärmeentzug von 129 MWh/a auf 192 MWh/a gesteigert werden [29].

### 1.2.4.3 Optimierung des geothermischen Systems

(THN)

#### **Hydraulischer Umbau am geothermischen System**

Wie erläutert, zeigen die EWK 1 bis 7 und 13 höhere Massenströme auf als die EWK 8 bis 12. Es wird eine Anpassung der Druckverluste und somit der fließenden Massenströme durch die einzelnen EWK-Stränge empfohlen. Aus diesem Grund wird der Einbau von einzeln ansteuerbaren Regelventilen geplant. Diese sollen mithilfe von Stellmotoren eingestellt werden können, indem sie des Weiteren eine Anbindung an die gesamte Anlagensteuerung aufweisen. Nach Rücksprache mit EREA und dem Hersteller der EWK wurde sich auf die folgenden Komponenten verständigt:

- Regelventile der Modellreihen VLA100, Fa. ESBE (Lineares Stellgerät)



Abbildung 194 Regelventil Modellreihe VLA100 [30]

- Stellantrieb der Serie ALF, Fa. ESBE (Linearer Stellantrieb)



Abbildung 195 Stellmotor Serie ALF [31]

Insgesamt soll jeder einzelne EWK-Strang (13 Stück) mit diesen Komponenten ausgestattet werden. Damit sind die einzelnen EWK-Stränge individuell ansteuerbar und die entsprechenden Druckverluste können eingestellt werden. Die aus den simulativen Ergebnissen entwickelte Regelung kann anschließend über die Gebäudeleittechnik implementiert.

Der Einbau dieser Komponenten erfolgte am 29.06.2022 und 30.06.2022 unter Aufsicht von EREA. Die elektronische Verbindung der Bauteile mit der Steuerung erfolgt im Juli 2022. Die

Regelventile mit Stellmotoren an den EWK-Strängen der Energiezentrale sind in Abbildung 196 dargestellt.



Abbildung 196 Regelventile mit Stellmotoren an EWK-Strängen

### **Umsetzung und Einbindung der Regelung in die Gebäudeleittechnik**

Die Regelung wird über Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) zum Datentransfer in Richtung der Gebäudeleittechnik umgesetzt. Mit MQTT können Controller oder Skripte Daten auf Topics publishen und subscriben. Der dazu benötigte Server wird in Europa gehostet. MQTT bietet den Vorteil, dass die Regelung somit direkt von der THN entworfen und angepasst werden kann. Sollte es zu einem Verbindungsabbruch kommen, wird als Rückfallebene auf die bereits implementierte Regelung vor Ort zurückgegriffen.

Der meiste Code für die Regelung ist bereits in der FMI der Regelung geschrieben worden. Jedoch wurde sich dazu entschieden, die Regelung mit MQTT mit der Programmiersprache Python umzusetzen, da es in Python eine einfach zu benutzende Bibliothek für MQTT gibt. Nach der Übersetzung des Codes wurden noch weitere Anpassungen vorgenommen:

- Berechnung der VL- und RL-Temperatur des Sammelrohrs aus subscribten Temperaturen der EWK-Stränge
- Umrechnung des Faktors in Hubweg des Ventils
- Publishen der Ventilstellungen der EWK-Stränge
- Versenden von warnenden E-Mails
- Implementierung einer Nutzeroberfläche

Da im Projekt lediglich die VL- und RL-Temperaturen der Stränge erfasst werden und nicht die Fluidtemperaturen im Sammelrohr, muss die Regelung die VL- und RL-Temperaturen der ein-

zelenen EWK-Stränge subscriben. Um die VL- und RL-Temperatur des Sammelrohrs zu erhalten, werden die Temperaturen abhängig davon, wie stark der jeweilige EWK-Strang durchflutet wird, gewichtet.

Anschließend wird für jedes Ventil der Hubweg berechnet, indem die Ventilkennlinie aus Abbildung 197 verwendet wird.

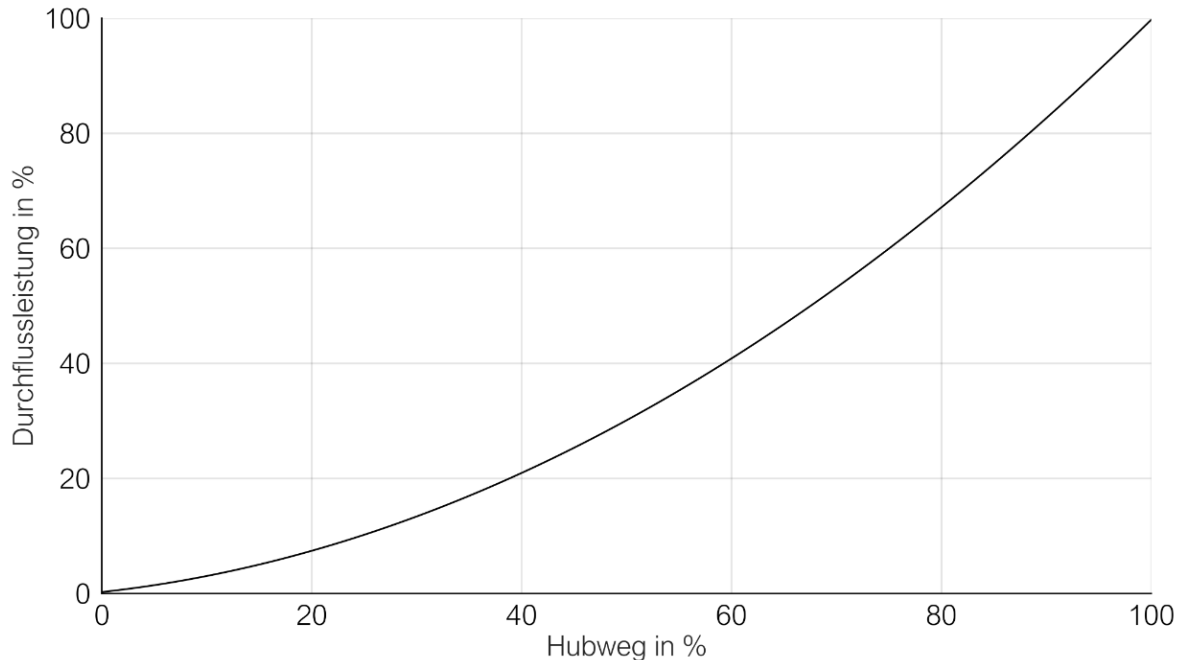


Abbildung 197 Ventilkennlinie [29]

Die Ventilkennlinie gibt an, wie groß die Durchflussleistung bzw. der Faktor im Vergleich zum Hub ist. Aus der Ventilkennlinie lässt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Faktor und Hub ableiten. Mit diesem Zusammenhang kann für einen beliebigen Faktor ein Hub bestimmt werden.

Für jeden EWK-Strang wird der entsprechende Hub via MQTT gepublisiert.

Liegt ein Fehler bei den mit MQTT übermittelten Zeitstempeln vor, weicht eine übermittelte Temperatur zu stark von den restlichen ab oder schaltet sich die komplette GKA aus, weil zu wenige EWK-Stränge noch eingeschaltet sind, so wird eine E-Mail mit einer entsprechenden Warnung an die eingegeben Adressaten verschickt. Damit kein Spam entsteht, wird jede Warnung frühestens nach einem Tag erneut verschickt. Sollten Warnungen öfter auftreten, ist entsprechend einzugreifen.

Hinzukommend ist eine Benutzeroberfläche in der Befehlszeile erstellt worden. Mit ihr können visuell Überprüfungen durchgeführt werden. Dazu werden die VL- und RL-Temperaturen der EWK-Stränge sowie die berechneten Temperaturen des Sammelrohrs als Diagramm dargestellt. Außerdem werden die kodierten Statusmeldungen, die Faktoren sowie die Ventilstellungen ausgegeben. Die Benutzeroberfläche ist im Anhang A.6 zu sehen.

#### 1.2.4.4 Bewertung des geothermischen Systems

(THN)

##### Energiebereitstellung der Großkollektoranlage

Die Bereitstellung thermischer Energie aus der GKA ist ein entscheidender Energielieferant für das Energiekonzept des Gebäudes puls<sup>G</sup>. Eine über das Jahr hinweg gleichmäßige, angepasste Energieentnahme aus der GKA ist für eine optimierte Betriebsweise essenziell.

Die Energiebereitstellung der GKA von August 2021 bis Juli 2024 ist in Abbildung 198 verdeutlicht.

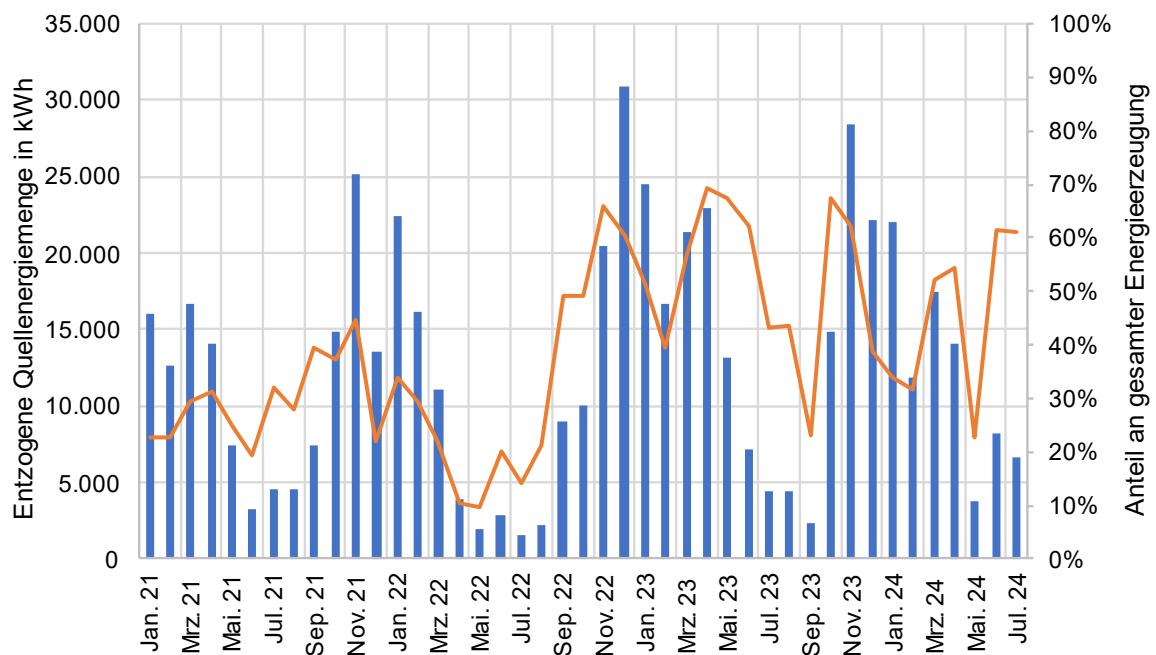


Abbildung 198 Entzogene Quellenergie aus GKA und Anteil an gesamter Energiebereitstellung

Im Diagramm sind zum einen die monatlich entzogenen Quellenergie aus der GKA als auch der relative Anteil an der gesamten thermischen Energieerzeugung im jeweiligen Monat dargestellt. Im Jahr 2021 lag die thermische Energiemenge bei ca. 140.000 kWh. Wie im Diagramm zu erkennen, steigt die absolut entnommene Energie aus der GKA ab Herbst 2021 stetig an. Der relativ betrachtet größte Anteil an der Energieerzeugung im Jahresverlauf ist dabei vor allem im Herbst bis Anfang des Winters 2021/2022 zu finden. Danach sinkt der relative Anteil ab, da die GKA zum einen zeitweise ihre untere Betriebstemperatur erreicht, aber auch am März/April 2022 weniger Nachfrage an Heizwärme erfolgt. Die entzogene Energiemenge bleibt im Sommer 2022 konstant niedrig, da aufgrund einer noch nicht umgestellten Regelung die WP AWRGA einen beträchtlichen Anteil einnahm. Im Hinblick auf verbesserte AZ und einer Minimierung der Laufzeiten der BHKW infolge der Gaskrise sind die WP GKA priorisiert eingebunden worden.

Über die Anpassung der Regelung der Anlagentechnik in Zusammenarbeit zwischen THN und EREA zeigt sich, dass die GKA von Herbst bis Winter 2022 50 % bis hin zu knapp 66 % im November 2022 des gesamten thermischen Energiebedarfs decken kann.

Dieser Trend setzt sich positiv im Jahr 2023 fort, indem sich ein Anteil bei der Deckung für das gesamte Jahr 2023 allein durch die Quellwärme von 52,10 % ergibt. Nach Hub durch die WP GKA nehmen diese einen Anteil von 72,3 % an der gesamten Erzeugung im Jahr 2023 ein. Für das erste Halbjahr 2024 (Januar bis Juni 2024) nehmen die WP GKA einen Anteil von 61,6 % an der Gesamtwärmebereitung ein.

Von besonderer Bedeutung für eine weitergehende Analyse ist die Betrachtung der normierten entzogenen thermischen Energie je EWK. Die Aufteilung der normiert entzogenen Energie je Monat und EWK ist in Abbildung 199 veranschaulicht.

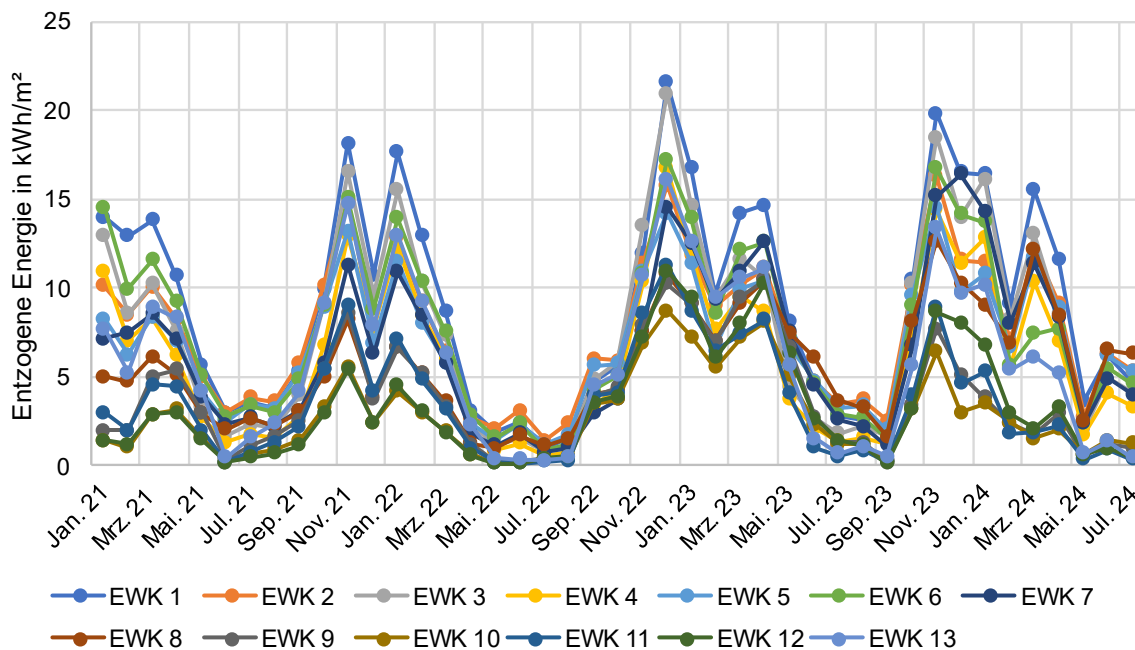


Abbildung 199 Normierte entzogene Energiemengen je EWK

Es zeigt sich im Diagramm für das Jahr 2021 eine sehr unterschiedliche Auslastung der jeweiligen EWK. Besonders der Anstieg des Entzugs in den Wintermonaten ist zu erkennen. Während der Sommermonate (August und September) sinkt die Energie aufgrund eines geringeren Wärmeverbrauchs ab. Im Diagramm sticht vor allem EWK 1 hervor, da dieser die höchste normierte Energiemenge aufweist. Im unteren Teil zeigen die EWK 10 und 12 nur geringe normierte Entzugsenergien auf. Ab Juli 2022 gleichen sich die spez. Entzugsenergien der EWK weiterhin infolge des Einbaus von elektrisch steuerbaren Regelventilen an. Dies hat bewirkt, dass das EWK-System gleichmäßiger durchströmt wird. Folglich sind die spez. Entzugsenergien homogener verteilt. In Richtung Winter 2022 verteilen sich die spez. Entzugsenergien der einzelnen EWK wieder stärker. Besonders die EWK 1 und 3 stechen durch besonders hohe Entzugsleistungen im Dezember 2022 hervor, wohingegen EWK 9 und 10 in ihrem Potenzial absinken, aber dennoch weiterhin auf einem höheren Niveau als im Jahr 2021 sind.

Die gesamte durchschnittliche, normierte Entzugsleistung je EWK für die Jahre 2021, 2022 2023 teilt sich auf wie in Abbildung 200 visualisiert.

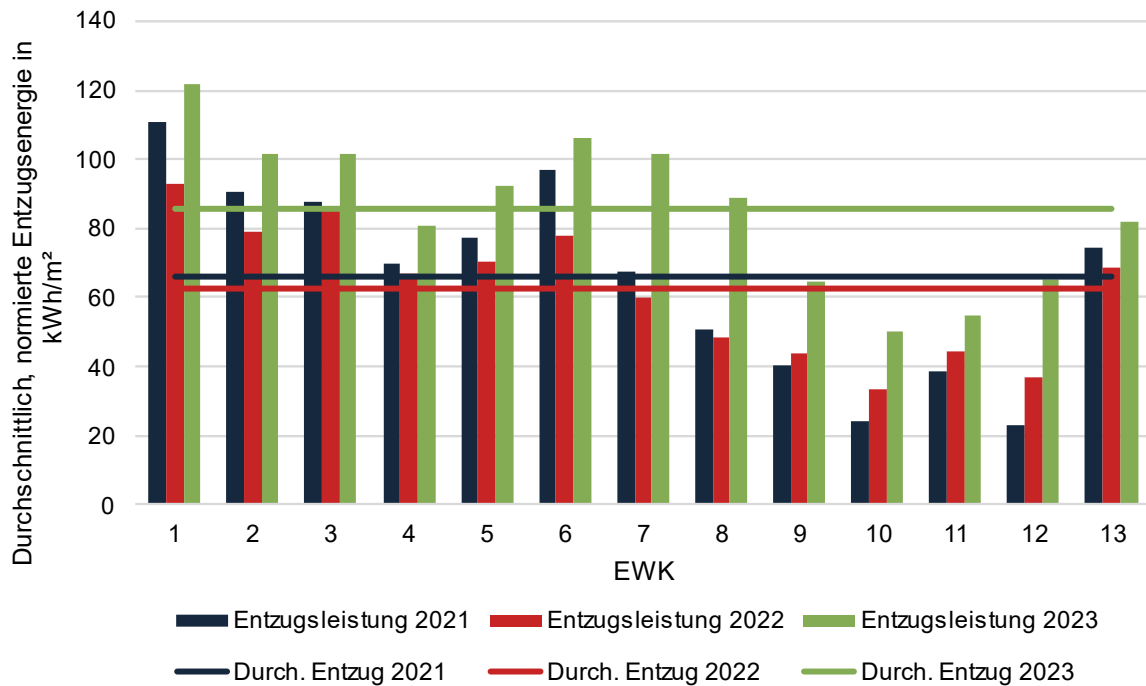


Abbildung 200 Durchschnittlich, normierte Entzugsleistung je EWK

Im Diagramm ist die gesamte durchschnittliche Entzugsleistung des jeweiligen Jahres über alle EWK in Form horizontaler Linien dargestellt.

Die durchschnittlichen Entzugsleistungen betragen nach Tabelle 41 in den Jahren (inklusive 1. Halbjahr 2024):

Tabelle 41 Durchschnittliche Entzugsleistungen über Projektjahre

| Jahr             | Ø Entzugsleistung<br>in kWh/m² |
|------------------|--------------------------------|
| 2021             | 66,02                          |
| 2022             | 62,35                          |
| 2023             | 85,83                          |
| 1. Halbjahr 2024 | 36,38                          |

Es ist damit anschaulich nach Abbildung 200 deutlich, dass über das Jahr 2021 hinweg eine große Diskrepanz beim durchschnittlich, normierten Energieentzug bei den EWK herrscht. So zeigen manche EWK wie EWK 1, 6 und 3 eine überdurchschnittlich Entzugsenergie, wohingegen die EWK 11, 10 und 12 eine geringe Performance aufweisen.

Im Jahr 2022 im Vergleich zu 2021 zeigt sich bei den EWK 9, 11, 10, 12 eine höhere spez. Entzugsleistungen.

Im Jahr 2023 ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Entzugsleistungen bei den EWK 8 bis 12. Im Vergleich zum Jahr 2021 erhöht sich der Energieentzug bei diesen EWK um ca. 23 % und

im Jahr 2022 um ca. 56 %. Dieser Effekt bewirkt einen enormen Sprung bei der gesamt durchschnittlichen Entzugsmenge für das Jahr 2023 auf ein Niveau von 85,83 kWh/m². In Tabelle 42 sind die spez. Entzugsleistungen der Jahre 2021, 2022 und 2023 der einzelnen EWK aufgelistet.

Tabelle 42 Entzugsleistungen in den Jahren 2021, 2022 und 2023

| <b>EWK</b> | <b>Spez. Entzugsleistung<br/>2021 in kWh/m²</b> | <b>Spez. Entzugsleistung<br/>2022 in kWh/m²</b> | <b>Spez. Entzugsleistung<br/>2023 in kWh/m²</b> |
|------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>1</b>   | 110,88                                          | 92,70                                           | 121,79                                          |
| <b>2</b>   | 90,83                                           | 79,16                                           | 101,74                                          |
| <b>3</b>   | 87,73                                           | 85,21                                           | 101,73                                          |
| <b>4</b>   | 69,96                                           | 66,83                                           | 81,01                                           |
| <b>5</b>   | 77,34                                           | 70,69                                           | 92,45                                           |
| <b>6</b>   | 97,17                                           | 77,78                                           | 106,00                                          |
| <b>7</b>   | 67,72                                           | 60,17                                           | 101,54                                          |
| <b>8</b>   | 50,77                                           | 48,53                                           | 88,67                                           |
| <b>9</b>   | 40,48                                           | 43,93                                           | 64,38                                           |
| <b>10</b>  | 24,21                                           | 33,43                                           | 50,45                                           |
| <b>11</b>  | 38,89                                           | 44,56                                           | 54,70                                           |
| <b>12</b>  | 22,88                                           | 36,63                                           | 65,15                                           |
| <b>13</b>  | 74,58                                           | 68,62                                           | 81,78                                           |

Es resultiert bei manchen EWK ein starker Abfall der spez. Entzugsleistung und bei den EWK, die bisher nur gering performt haben, ein starker Anstieg in der spez. Entzugsleistung. Besonders bei den EWK 8 bis 12 ist ein Anstieg der spez. Entzugsleistung zu vermehren, wohingegen dies wiederum zulasten der anderen EWK geht.

Dieses Ergebnis resultiert aus dem Einbau der Regelventile, jedoch noch ohne aktive Ansteuerung, da die Implementierung der Regelung in der Gebäudeleittechnik erst ab Februar 2024 erfolgte. Durch den Einbau wurden jedoch die zuvor bestehenden Volumenstrombegrenzungsventile geöffnet, sodass die EWK keine Drosselung in ihrem Volumenstrom erfahren. Das ergibt, dass mithilfe einer optimierten Regelung der WP GKA und Aufhebung der Volumenstrombegrenzung der EWK sowohl Potenziale bei den EWK mit einem bisher nur niedrigen Entzug gehoben werden können, ohne große Einbußen bei den anderen EWK zu bewirken. In Summe steigert sich aufgrund dieser Maßnahme der Gesamtentzug.

Eine alternative Darstellungsweise kann für die Betrachtung der monatlichen, spezifischen Entzugsleistung seit Januar 2021 bis Juli 2024 in einer sogenannten Heatmap erfolgen. Dies ist für die EWK in der illustriert.

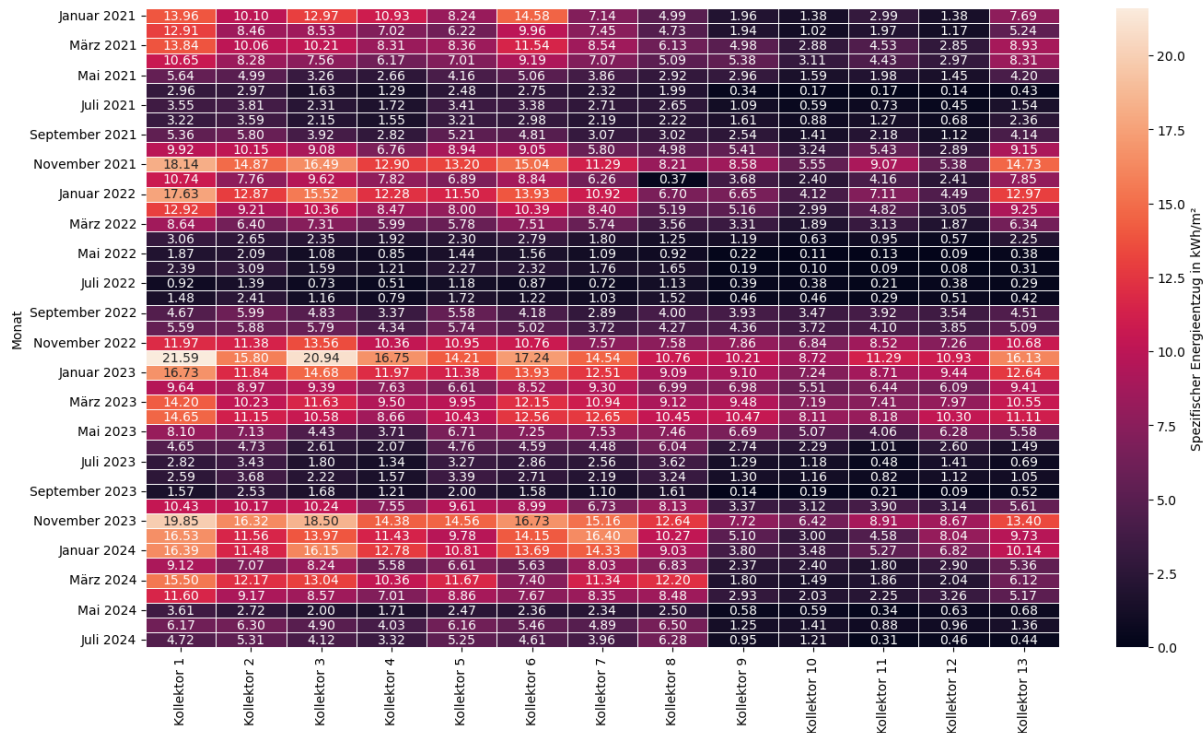


Abbildung 201 Heatmap spezifischer Energieentzug der EWK von Januar 2021 bis Juli 2024

Die spezifische Entzugsleistung eines EWK ist damit höher je heller die Farbe der jeweiligen Zelle ist. Eine Zelle ist die monatliche, spezifische Entzugsenergie des einzelnen EWK. Es ist deutlich zu erkennen, dass während der warmen Jahreszeit (vornehmlich den Sommermonaten) nur ein geringer spezifischer Entzug erfolgt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass nur eine geringe bis fast keine thermische Energie aus der GKA benötigt wird. Während der Wintermonate wird deutlich, dass manche EWK (allen voran die EWK 8 bis 12) nur eine geringe Leistung im Jahr 2021 aus dem Erdreich entziehen. Diese sind in der Heatmap dunkler coloriert.

Im Jahr 2022 nimmt infolge der angepassten Regelung zugunsten des Betriebs der WP GKA die Entzugsleistung der jeweiligen EWK sukzessive zu. Dies ist vor allem im November und Dezember 2022 im Vergleich zum selben Vorjahreszeitraum zu sehen. Weiterhin ist positiv hervorzuheben, dass der spez. Entzugsleistungen der EWK 8 bis 12, welche in den Jahren zuvor nur eine untergeordnete Rolle im GKA-System spielten, einen größeren Beitrag leisten.

### **Bewertung der Regelung des geothermischen Systems**

Im Februar 2024 startete der regelbasierte Algorithmus, indem ein stetiger Abgleich zwischen Temperaturmessungen, Betrieb der WP GKA und Ventilstellung der 13 Regelventile erfolgt. Wie in den unteren Zeilen der Abbildung 159 zur Heatmap der EWK-Entzüge verglichen werden kann, ist nach Start der Regelung kein eindeutig messbarer Effekt zu ermitteln. Einen merklich positiven Effekt lieferte das Öffnen der Regelventile in 2023, wodurch die Entzugsleistungen sich steigern konnten.

Nachdem ein geothermisches System aufgrund der Erschließung des umgebenen Erdkörpers ein sehr träges System ist, kann nach einer Betriebszeit von etwas fünf Monaten nach Start bis zum Projektende im Juli 2024 keine nähere Aussage über die Auswirkungen der Entzugsleistungen für das gesamte Jahr getroffen werden.

Ein möglicher Grund für die bisher nicht nachweisliche Verbesserung des Systems aufgrund des Regelalgorithmus ist womöglich der verzögerte Start im Februar 2024. Im Winter ist das Temperaturniveau der GKA auf einem nur noch niedrigen Niveau nahe der unteren Betriebsgrenze. Erst ab dem späten Frühjahr heben Regenerationseffekte wie eine höhere Grundwassertemperatur sowie Abwärme aus der Raumkühlung das Temperaturniveau wieder an. Die Auswirkung einer Regelung ist dahingehend nur sehr marginal, da das Gesamtsystem auf einem niedrigen Niveau performt.

Ein besonders positives Ergebnis ist für Spätherbst / früher Winter zu erwarten, wenn der Anspruch an Raumwärme sich sukzessive steigern wird. Die GKA kühlt sich aufgrund von Quellwärmeentzug ab. Die Regelung kann diesem negativen Effekt aufgrund der Ab- und Zuschaltung und der Gewichtung von EWK positiv entgegensteuern. Eine höhere Quelltemperatur für die WP ist zu erwarten.

Damit beweist der regelbasierte Algorithmus seine Stärken erst im letzten Quartal des Jahres 2024. Eine negative Beeinflussung des Gesamtsystems kann jedoch insgesamt auch aufgrund softwareseitig verschiedener Rückfallebenen ausgeschlossen werden.

### **Ausblick auf zukünftige Entwicklung der geothermischen Quellenergieverfügbarkeit**

Nachdem über verschiedene Optimierungsmaßnahmen der multivalenten Anlagentechnik das Projektziel zur Erschließung einer möglichst hohen Wärmebereitstellung über die GKA erreicht wurde, soll ein qualitativer Ausblick auf eine zukünftige Entwicklung des Systems gegeben werden. Der Klimawandel wird in Geretsried ebenso Konsequenzen auf die durchschnittliche Außentemperatur haben. Infolge des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur wird auch in Geretsried mit einer Erhöhung der mittleren Außentemperatur zu rechnen sein. Gleichzeitig geht die Steigerung der Temperaturen mit einer Verringerung des nötigen Heizwärmebedarf einher. Folglich können Spitzenlastzeiten in den Wintermonaten, welche zum aktuellen Zeitpunkt noch mit den BHKW zu decken sind, verringert werden. Der Anteil der Gebäudeversorgung mit einer regenerativen Wärmebereitstellung wird sich somit steigern. Die Sonneneinstrahlung als auch folglich die Außentemperatur haben einen starken Einfluss auf die Erdober- sowie Grundwassertemperatur. Es ist zu erwarten, dass die den WP GKA vorliegende Quelltemperatur sich steigern wird. Höhere AZ können erzielt werden. Gleichzeitig wird aufgrund dessen der Anteil der Regeneration mittels Raumkühlung in den Gewerbeeinheiten sich steigern. Dies begünstigt eine schnellere Regeneration der GKA.

Absehbar ist jedoch auch, dass aufgrund der höheren Temperaturen Niederschläge sich verringern bzw. ausbleiben werden. Dies wirkt sich direkt auf den Grundwasserstand an. Nachdem der lokale Grundwasserfluss der entscheidende Faktor zur Quellwärmeversorgung der GKA ist, ist darauf ein besonderes Augenmerk zu legen. Neben den Grundwassermessstellen in der Nähe des Gebäude puls<sup>G</sup>, die jedoch erst seit dem Jahr 2017 im Betrieb sind, gibt es in der Stadt Geretsried eine Grundwassermessstelle, die bereits seit dem Jahr 1996 Messwerte aufzeichnet. Anhand dieser Daten kann über Mittelung eine langfristige Perspektive über die Entwicklung des Grundwasserstands gegeben werden. Die Daten in Abbildung 202 entstammen dem gewässerkundlichen Dienst Bayern des bayerischen Landesamt für Umwelt.

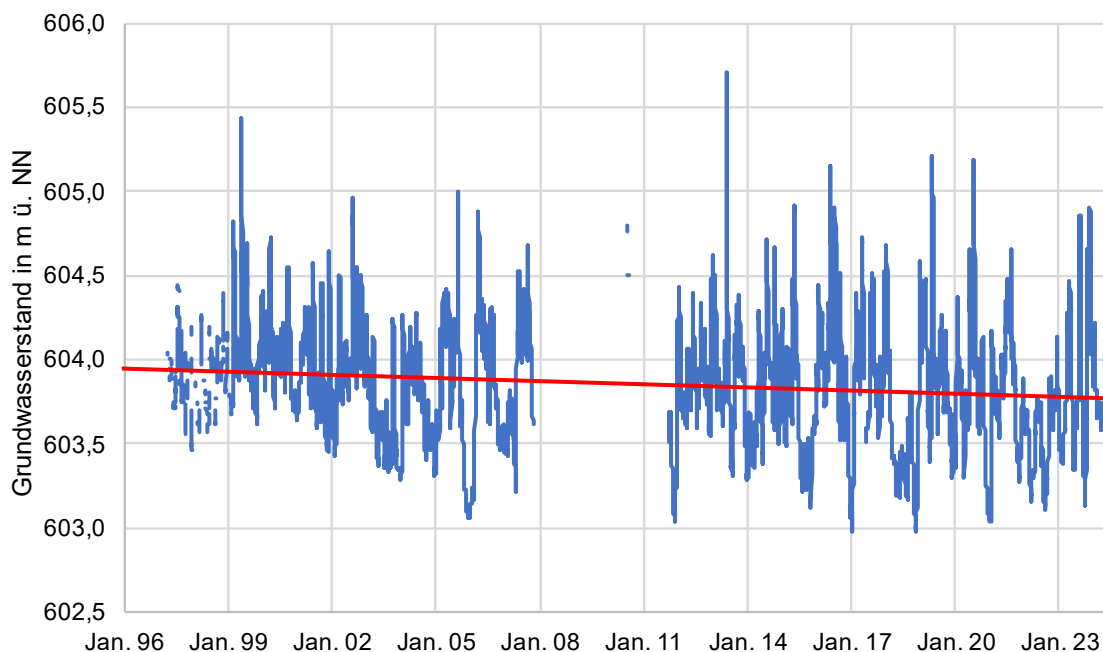


Abbildung 202 Langfristiger Pegelmessstand in Geretsried

Zu erkennen ist die jahreszeitliche periodischen Schwankung des Grundwasserstandes. Die rote Gerade gibt die langjährige Mittelung wieder. Seit Messbeginn im Jahr 1996 bis zum aktuellen Zeitpunkt (31.07.2024) ist der Mittelwert des Grundwasserstands um ca. 20 cm gesunken. Der Trend zeigt, dass mit einem stetig abnehmenden Grundwasserstand zu rechnen ist.

Um die Auswirkungen auf die GKA bewerten zu können, sind in Tabelle 43 die Einbautiefe der EWK in Metern über Normalnull aufgelistet.

Tabelle 43 Einbautiefen EWK

| EWK              | EWK-Tiefe in m ü. NN |
|------------------|----------------------|
| 1, 2, 4, 5, 6, 8 | 592,58               |
| 3                | 592,08               |
| 7                | 592,24               |
| 9                | 592,30               |
| 10               | 592,26               |
| 11               | 592,60               |
| 12, 13           | 589,07               |

Es zeigt sich, dass die EWK auf Höhen zwischen ca. 589 m ü. NN. bis 592 m ü. NN eingebettet sind. Nachdem nach Abbildung 202 der unterste Grundwasserpegelmessstand bei etwa 603 m ü. NN. lag, ist davon auszugehen, dass eine sukzessive Abnahme des Grundwasserstands eine nur geringfügige Auswirkung auf die GKA haben wird, da die Überdeckung groß genug ist. Dennoch kann es aufgrund baulicher Gegebenheiten in der Umgebung des Gebäudes puls<sup>G</sup>, die einen starken Einfluss auf den Grundwasserfluss als auch Grundwasserstand haben, zeitweise dazu führen kann, dass einzelne EWK eine geringe oder keine Überdeckung mit Grundwasser haben werden. Dieser Effekt kann aufgrund der Komplexität des Grundwasserflusses jedoch nicht abgeschätzt werden.

### **1.2.5 AP5 – Projektkoordination**

Die formellen Projektziele von „+EQ-Net II“ wurden durch eine professionelle Projektkoordination erreicht. Diese Koordination stellte sicher, dass die unterschiedlichen Ansprüche und Perspektiven der Akteure zwischen Forschung und Praxis abgestimmt wurden. Dadurch wurde ein reibungsloser Projektablauf sowie der erfolgreiche Transfer theoretischer Erkenntnisse in das untersuchte Quartier gewährleistet. Darüber hinaus fungierte die Projektkoordination als zentrale Anlaufstelle für Projektpartner und Fördermittelgeber und sicherte die Qualität der Ergebnisdokumentationen, einschließlich gemeinsamer Projektberichte.

Ein zentraler Bestandteil der Projektorganisation war die Durchführung eines monatlichen Jour Fixe. Diese regelmäßigen Treffen ermöglichten den fortlaufenden Austausch zwischen den Projektbeteiligten, die Klärung offener Fragen und die gemeinsame Planung weiterer Schritte. Durch diese feste Kommunikationsstruktur wurde die Transparenz im Projekt gefördert und sichergestellt, dass alle Beteiligten stets auf dem aktuellen Stand waren, um effizient auf Herausforderungen reagieren zu können.

## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Positionen sind vollständig im zahlenmäßigen Verwendungsnachweis aufgeführt und entsprechend erläutert.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Mit dem Projekt wurden erstmals eine GKA unterhalb der Tiefgarage eines Gebäudes mit Wohn- und Gewerbenutzung intensiv messtechnisch untersucht. Durch die Kombination aus einer multivalenten Anlagentechnik aus WP und BHKW kann eine möglichst hohe regenerative Wärmeversorgung erzielt. Die Kombination mit einer PV-Anlage auf den Dachflächen kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudes deutlich senken.

Gleichzeitig werden mit der dezentralen Anlagentechnik über hybride Wohnungsstationen möglichst niedrige Systemtemperaturen und damit geringe Verteilverluste bei hohen Komfort- und Hygieneansprüchen garantiert. Dies begünstigt wiederum möglichst hohe AZ bei den WP.

Anhand dieses komplexen Zusammenspiels aus verschiedenen Erzeugertechnologien in Kombination mit einer dezentralen, verbraucherseitigen Anlagentechnik konnten entscheidende Betriebszustände und Einstellparameter identifiziert werden, damit ein effizienter Anlagenbetrieb ermöglicht wird. Mithilfe von Anpassungsmaßnahmen und Implementierung von Regelstrategien wurde das Gesamtsystem hin zu einem möglichst energieeffizienten und klimafreundlichen Betrieb angepasst.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

### **4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Bei den Projektergebnissen handelt es sich im Wesentlichen um Messdaten, deren Auswertungsergebnisse und abgeleiteten Aussagen zur Anlagenperformance, zum hygrothermischen Verhalten und der Optimierung der GKA. Direkte wirtschaftliche Aussichten lassen sich daher im Fall der THN nur bedingt ableiten. Der Hauptnutzen des Projektes liegt im wissenschaftlichen Bereich (siehe folgender Abschnitt).

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu den notwendigen Optimierungsmaßnahmen können in weiteren Forschungsvorhaben angewendet werden. Auch die Erkenntnisse aus den hygrothermischen Simulationen einer überbauten GKA können wiederverwendet werden.

### **4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten**

Bei dem vorliegenden Vorhaben standen die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten im Vordergrund. Die auf Seiten der GKA als auch der Betriebsoptimierung multivalenter Anlagentechnik erzielten Ergebnisse ergänzen das Wissen der THN und bilden die Basis für weiteren Arbeiten in diesen Themengebieten.

Erkenntnisse konnten in den folgenden Bereichen gewonnen werden (Auswahl):

- Identifikation essenzieller Betriebsparameter bei Systemen mit multivalenter Anlagentechnik
- Einstellparameter dezentraler, verbraucherseitiger Anlagentechnik
- Hygrothermische Simulationen von GKA unterhalb von Gebäuden
- Implementierung eines regelbasierten Algorithmus auf eine Gebäudeleittechnik

### **4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Verwertbarkeit und Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse wird durch eine umfassende Dokumentation und die digitale Bereitstellung der Daten für nachfolgende Forschungsvorhaben gesichert.

## **II.5 Fortschritt Dritter während der Laufzeit**

Die Projektbearbeitung erfolgte in intensiver Zusammenarbeit und Austausch mit dem Projektkonsortium. Über Kontakt mit den Herstellern der Anlagentechnik konnten Informationen zu Betriebsweisen ausgetauscht werden.

## II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

### 6.1 Konferenzbeiträge

Schmid, M. (2023): **Oberflächennahe Geothermie als Lösung im innerstädtischen Kontext (+EQ-Net II)**. In: Berliner Energietage, Berlin, 05 Mai 2023.

Schmid, M.; Stockinger, V. (2022): **+EQ-Net II – Betriebsoptimierung steigert Energieeffizienz: Erste Ergebnisse aus der messdatengestützten Analyse des Wohn- und Geschäftsgebäudes pulsG in Geretsried**. In: 12. Projektleitungstreffen der Begleitforschung Energiewendebauen, Berlin, Deutschland, 09 Nov. 2022.

Schmid, M. (2022): **Projektvorstellung Forschungsvorhaben +EQ-Net II - Netzneutrales Wohn- und Geschäftsgebäude pulsG in Geretsried - Monitoringphase**. In: INUAS Konferenz 2022, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Hochschule München, FH Campus Wien, Winterthur, Schweiz, 08 Sept. 2022.

### 6.2 Posterbeiträge

Werner, P. (2022, 08. September): **Nutzung oberflächennahester Geothermie im urbanen Raum - 3D-Simulation von unter Gebäuden liegenden Erdkollektoren**. Posterbeitrag bei INUAS Konferenz 2022, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Hochschule München, FH Campus Wien, Winterthur (CH).

## 6.3 Veröffentlichungen

Schmid, M.; Stockinger, V. (2023): **Potenziale und Herausforderungen dezentraler Hybrid-Wohnungsstationen bei Mehrfamilienhäusern**, <https://doi.org/10.48547/202310-022>.

Schmid, M.; Stockinger, V. (2023): **Hydraulischer Abgleich als Schlüssel zur Energieeffizienz**, Beitrag in: BWK Energie, Band 75, Ausgabe 3-4, ISSN: 1618-193X.

Zeh, R.; Schmid, M.; et. al (2023): **5th Generation District Heating and Cooling Networks as a Heat Source for Geothermal Heat Pumps**, Chapter in: Geothermal Heat Pump Systems, Springer International, ISBN: 978-3-031-24523-7.

Schmid, M. (2022): **Monitoring and first analysis of a large-scale geothermal collector system under a residential and commercial building**. In: European Geothermal Congress 2022, Berlin, Deutschland, 17-21 Okt. 2022, ISBN 978-2-960-19462-3.

Dietrich-Rust, C.; Hahn, J. Jensch, W. (2022): **Technisches Monitoring zur datenbasierten Entscheidungsfindung im Lebenszyklus eines netzdienlichen Gebäudes**. In: HLH Band 73 Nr 06

## **III. Anlage (1) – Erfolgskontrollbericht**

### **III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen**

Die aus dem Klimaschutz und der angestrebten Energiewende abgeleiteten energiepolitischen Ziele stellen die Bundesrepublik Deutschland vor enorme Herausforderungen. Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um 80 % bis 95 % gesenkt werden. Der Gebäudebereich hat einen großen Einfluss darauf, ob dieses Ziel erreicht werden kann. Die Wärmeversorgung der privaten Haushalte verursacht ca. 21 % des heutigen Primär- und Endenergieverbrauchs in Deutschland. Ein großes Wirkungspotenzial wird in der Kombination aus gesteigertem Einsatz von erneuerbaren Energien, Bedarfsreduzierung und Effizienzsteigerung im deutschen Gebäudebestand gesehen. Aus diesem Grund müssen die Nutzung regenerativer Energiequellen, die Entwicklung neuer Speichertechnologien sowie die langfristige messtechnische Begleitung von Forschungsvorhaben intensiv weiterverfolgt werden.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, das Bundesministerium für Bildung und Forschung und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft setzten 2018 mit dem 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ neue Akzente in den Bereichen „Innovations- und Technologietransfer“. Schwerpunkte sind hierbei die Nutzung von regenerativen Energieträgern und deren Systemintegration. Dieser Trend zeichnet sich bereits seit vielen Jahren ab. Mit diversen Förderbekanntmachungen wie „Energieoptimiertes Bauen“, „Energieeffiziente Wärme- und Kältenetze“, „Thermische Energiespeicher“, „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ sowie der Bekanntmachung „Ideenwettbewerb Real-labore“ im Jahr 2019 wird diese Entwicklung weiter forciert. In den letzten Jahren wurden sehr viele Lösungen und Technologien entwickelt, die zeitnah in den Markt transferiert werden müssen.

Das Forschungsvorhaben +EQ-Net II bezieht sich klar auf die zentralen Förderfelder der Bundesregierung im Energiebereich. Im Themenbereich „Gebäude und Quartiere“ werden insbesondere die Themenschwerpunkte „Digitales Planen, Bauen und Wohnen“, „Wärme- und Kälteversorgung“ und „Forschungstransfer für die Energiewende im Quartier“ adressiert. Es wurden neue Erkenntnisse erarbeitet, wie der Betrieb eines hybriden Energiekonzepts sowie die Auslegung der Energieerzeugungsanlagen integriert werden können.

Durch das Langzeitmonitoring konnten Erkenntnisse für einen optimierten Anlagenbetrieb einer multivalenten Anlagentechnik über die Identifikation von Schlüsselparametern und Schlüsselkomponenten gewonnen werden hinsichtlich des innovativen Niedrig-Exergie (LowEx)-Gesamtsystems wie es im Gebäude puls<sup>G</sup> vorhanden ist.

Im Arbeitspaket „Geothermie“ konnten insbesondere im Bereich der Modellierung und Simulation geothermischer Systeme die Prognosefähigkeit erhöht als auch ein Regelalgorithmus abgeleitet werden. Dadurch konnte aufgezeigt werden, wie sich der großflächige Wärmeentzug durch einen GKA unter einem Gebäude auswirkt.

## **III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens / erreichte Nebenergebnisse / wesentliche Erfahrungen**

Das Forschungsvorhaben teilte sich in die Arbeitspakete der THN auf in Arbeitspaket 2 „Betriebsoptimierung“ und Arbeitspaket 4 „Geothermie“.

Im Zuge des ersten Arbeitspaketes wurde die Soll/Ist-Anlagentechnik analysiert. Anhand des umfangreich verbauten Monitorings sowie der langfristigen Datenaufzeichnung konnten die Betriebszustände untersucht werden. Im Zuge dessen wurden Optimierungsmaßnahmen an den dezentralen, hybriden Wohnungsstationen abgeleitet sowie Einstellparameter an der multivalenten Anlagentechnik wie Förderpumpen verändert. Ergebnis ist eine Minimierung des Systemvolumenstroms und damit einhergehend geringe Verteilverluste im Gesamtsystem, optimierte Temperaturschichtung im zentralen Wärmespeicher infolge gesteigerter Temperaturspreizung, erhöhte AZ der WP durch verringerte RL-Temperaturen.

Anhand dieser Basis konnten weitergehende Regelstrategien abgeleitet werden, die eine optimierte Betriebsstrategie aus WP und BHKW ermöglichen.

Im Arbeitspaket 4 „Geothermie“ konnte durch die Analyse der Betriebsparameter und anhand von Messdaten aus Grundwassermessstellen im Gebiet um das Gebäude puls<sup>G</sup> Betriebsoptimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Mithilfe von Anpassung an den Volumenstrombegrenzungsventilen konnten die Volumenströme durch die GKA erhöht werden. Folglich steigerte sich die spezifische Entzugsleistung über die Projektlaufzeit. Durch Einbautätigkeiten wurden 13 elektrisch ansteuerbare Regelventile an den einzelnen EWK-Strängen installiert. Auf Basis von Ergebnissen hygrothermische Simulationen aus Gebäudeinnenraumtemperaturen, Verbrauchsprofilen, Grundwasserpegelmessständen und Grundwassertemperaturen konnte ein regelbasierter Algorithmus erstellt werden. Mithilfe von Anpassungen an der Gebäudeleittechnik wurde der Algorithmus auf das System implementiert, sodass dieser die Regelventile steuert. Anhand von Gewichtungen und dem Einbezug von Messdaten wird eine optimale Volumenstromverteilung durch die GKA garantiert. Die Regeneration der GKA wird verbessert und der spezifische Entzug an Quellwärme wird erhöht. Der Anteil an regenerativer Wärmeversorgung im Gebäude puls<sup>G</sup> wird erhöht. Gleichzeitig wird durch die tagesaktuelle Bewertung der einzelnen EWK die optimale Vermischung von Quellwärme ermöglicht, sodass die Quelltemperatur für die WP möglichst hoch ist.

Die Implementierung beweist die Machbarkeit der geplanten Umsetzungsmaßnahme. Auch erste Ergebnisse zeigen einen verbesserten Quellwärmeentzug durch die Anpassung der Verteilung des Volumenstroms durch die GKA.

### **III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Der Verwertungsplan sowie seine Fortschreibung sind im Schlussbericht in Abschnitt II.4 dargestellt.

### **III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Es sind keine Arbeiten zu verzeichnen, die zu keiner Lösung geführt haben.

### **III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer der Projektergebnisse**

Die Ergebnisse des Projektes werden in Präsentationen und Publikationen der THN dargestellt.

### **III.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben- und Zeitplanung wurde eingehalten.

# Abbildungsverzeichnis

|               |                                                                                                                                                       |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1   | Übersicht der Messwerte aus Microcontrollern für „Heizung“ im Jahr 2021 .....                                                                         | 10 |
| Abbildung 2   | Übersicht der Messwerte aus Microcontrollern für „Gewerbe“ im Jahr 2021 .....                                                                         | 11 |
| Abbildung 3   | Übersicht Messwerte aus Microcontrollern für „Wohnungen“ im Jahr 2021 .....                                                                           | 11 |
| Abbildung 4   | Datenbank "Wohnung" 2020 und 2021 .....                                                                                                               | 12 |
| Abbildung 5   | Datenbank "Gewerbe" 2020 und 2021 .....                                                                                                               | 12 |
| Abbildung 6   | Datenbank "Heizung" 2020 und 2021 .....                                                                                                               | 12 |
| Abbildung 7   | Datenbank "Gewerbe" 2020 und 2021 .....                                                                                                               | 13 |
| Abbildung 8   | Datenbanken "Wohnung, Gewerbe und Heizung" 2022 .....                                                                                                 | 14 |
| Abbildung 9   | Datenbank "Wohnung, Gewerbe und Heizung" 2023 .....                                                                                                   | 14 |
| Abbildung 10  | Datenbank "Wohnung, Gewerbe und Heizung" 2024 .....                                                                                                   | 15 |
| Abbildung 11  | Unregelmäßigkeiten im Massestrom eines Wärmestromzählers .....                                                                                        | 16 |
| Abbildung 12  | Temperaturänderungen der Erdkollektoren .....                                                                                                         | 16 |
| Abbildung 13  | Systematische Verbesserungen durch Anpassungen der Regelventile und der Sensor-technik .....                                                          | 17 |
| Abbildung 14  | Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2021 .....                                                                                                       | 19 |
| Abbildung 15  | Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2022 .....                                                                                                       | 20 |
| Abbildung 16  | Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2023 .....                                                                                                       | 21 |
| Abbildung 17: | Auswertung des Heizenergieverbrauchs 2024 .....                                                                                                       | 22 |
| Abbildung 18  | Energetische Gebäudesignatur des Heizwärmebedarfs für Wohnungen und Gewerbe im Jahr 2021 (oben) und für den Projektzeitraum (unten) .....             | 24 |
| Abbildung 19  | Leistungszahl der Wärmepumpe 1 im Januar 2022 (oben) sowie Herstellerangaben zur Leistungszahl von Wärmepumpen des Typs WPF 66 (unten) .....          | 25 |
| Abbildung 20  | Betriebsverhalten des BHKW 1 im Januar 2022 .....                                                                                                     | 26 |
| Abbildung 21  | Sankey-Diagramm der Energieerzeugung, der Einspeisung in den Pufferspeicher und der Versorgung der Heizkreise im Jahr 2021 .....                      | 27 |
| Abbildung 22  | Sankey-Diagramm der Entnahme auf dem Pufferspeicher und der Versorgung der Wärmeverbraucher in den Wohnungen und Gewerbe-Einheiten im Jahr 2021 ..... | 27 |
| Abbildung 23  | Energieflussdiagramm für das Jahr 2022 .....                                                                                                          | 28 |
| Abbildung 24  | Energieflussdiagramm für das Jahr 2023 .....                                                                                                          | 29 |
| Abbildung 25  | Energieflussdiagramm für das Jahr 2024 .....                                                                                                          | 30 |
| Abbildung 26  | Datenbankupdate vor und nach der Optimierungsmaßnahme .....                                                                                           | 33 |
| Abbildung 27  | Nicht genügend zugewiesener Arbeitsspeicher führt zu einem .....                                                                                      | 34 |

|              |                                                                                                 |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 28 | Code zur flexiblen Anpassung der Datenpakete .....                                              | 34 |
| Abbildung 29 | Indexfehler in der Datenbank „Gewerbe“ .....                                                    | 35 |
| Abbildung 30 | SQL-Client „HeidiSQL“ .....                                                                     | 35 |
| Abbildung 31 | Schematischer Aufbau der Energiezentrale.....                                                   | 38 |
| Abbildung 32 | Hydraulisches Schaltbild BHKW mit Messsensoren (schematisch).....                               | 39 |
| Abbildung 33 | Hydraulisches Schaltbild WP AWRGA mit Messsensoren (schematisch)<br>.....                       | 40 |
| Abbildung 34 | Hydraulisches Schaltbild WP GKA mit Messsensoren (schematisch) ....                             | 41 |
| Abbildung 35 | Hydraulisches Schaltbild Passivkühlung mit Messsensoren (schematisch)<br>.....                  | 42 |
| Abbildung 36 | Hydraulisches Schaltbild Wärmespeicher mit Messsensoren<br>(schematisch) .....                  | 42 |
| Abbildung 37 | Hydraulisches Schaltbild Verteiler mit Messsensoren (schematisch) ....                          | 43 |
| Abbildung 38 | Hydraulisches Schaltbild Luft-Wasser-WP mit Messsensoren<br>(schematisch) .....                 | 44 |
| Abbildung 39 | Wohnungsstation WSG-2-Duo [25].....                                                             | 45 |
| Abbildung 40 | Aufgebaute Wetterstation auf dem Dach von puls <sup>G</sup> .....                               | 47 |
| Abbildung 41 | Monatlicher Wärme- und Kälteverbrauch in Gewerbeeinheiten .....                                 | 48 |
| Abbildung 42 | Monatlicher Energieverbrauch in Wohnungen .....                                                 | 49 |
| Abbildung 43 | Monatlich ausgetauschte Energiemengen mit VT .....                                              | 51 |
| Abbildung 44 | Ausgetauschte Energiemengen zwischen Gebäude puls <sup>G</sup> und VT<br>(kumuliert) .....      | 52 |
| Abbildung 45 | Spez. Volumenströme und spez. Wärmeleistungen über Wohnungen...                                 | 53 |
| Abbildung 46 | Verlauf Wärmeleistung und Volumenstrom bei Wohnung 58 im Jahr 2021<br>.....                     | 54 |
| Abbildung 47 | Verlauf Wärmeleistung und Volumenstrom bei Wohnung 10 im Jahr 2021<br>.....                     | 54 |
| Abbildung 48 | Einzustellende Ventile an Wohnungsstation mit optimalen Werten .....                            | 56 |
| Abbildung 49 | Temperaturverlauf bei TEMP01 bis TEMP06 in Tiefgarage .....                                     | 57 |
| Abbildung 50 | Temperaturverlauf bei TEMP02, TEMP07 und TEMP08 in<br>Kellerbereichen.....                      | 58 |
| Abbildung 51 | Kennlinie WPF 66 (WP GKA) zu Wärmeleistung in Abhängigkeit der<br>Quelltemperatur .....         | 59 |
| Abbildung 52 | Kennlinie Arbeitszahlen WPF 66 .....                                                            | 60 |
| Abbildung 53 | Durchschnittlich, normierter Volumenstrom durch Wohnungsstationen .                             | 61 |
| Abbildung 54 | Durchschnittlich, normierter Wärmeverbrauch durch Wohnungsstationen<br>.....                    | 62 |
| Abbildung 55 | Durchschnittliche Temperaturspreizung Vorlauf und Rücklauf über alle<br>Wohnungsstationen ..... | 63 |

|              |                                                                                                    |     |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 56 | Bedarfsgerechte Regelung des Volumenstroms durch Wohnungsstation nach Optimierungsmaßnahme.....    | 64  |
| Abbildung 57 | Betriebsverhalten Förderpumpe Hauptheizungsstrang vor und nach Maßnahme .....                      | 65  |
| Abbildung 58 | Monatliche, elektrische Energieaufnahme Förderpumpe .....                                          | 66  |
| Abbildung 59 | Arbeitszahlen der WP GKA zur mittleren GKA-Temperatur .....                                        | 67  |
| Abbildung 60 | Bereinigter Energieverbrauch über die Projektjahre.....                                            | 73  |
| Abbildung 61 | Tagesmitteltemperaturverfahren über die Jahre 2021, 2022 und 2023 ..                               | 75  |
| Abbildung 62 | Monatliche Energieerzeugungsmengen für die Jahre 2021, 2022, 2023                                  | 77  |
| Abbildung 63 | Kumulierte Energiemengen .....                                                                     | 77  |
| Abbildung 64 | Thermische Energiebereitstellung nach Energieerzeugungsanlage.....                                 | 78  |
| Abbildung 65 | Spezifische Wärmegestehungskosten .....                                                            | 81  |
| Abbildung 66 | Spezifische Wärmekosten je Erzeuger .....                                                          | 82  |
| Abbildung 67 | Jahresarbeitszahlen und spez. Entzugsleistungen aus der GKA .....                                  | 82  |
| Abbildung 68 | Zugehörigkeitsfunktion GKA-VL-Temperatur .....                                                     | 85  |
| Abbildung 69 | Zugehörigkeitsfunktion Rating WP GKA und BHKW .....                                                | 86  |
| Abbildung 70 | Wärmeverbrauch 2023 in 30-minütiger Aggregation .....                                              | 87  |
| Abbildung 71 | Energieversorgungssicherheit des Fuzzy-Reglers .....                                               | 87  |
| Abbildung 72 | Prozentuale Verteilung der energetischen Erzeugungsanteile .....                                   | 88  |
| Abbildung 73 | Verlauf Arbeitszahlen bei Soll-VL-Temperatur von 48°C.....                                         | 89  |
| Abbildung 74 | Gliederung der Haushaltsformen (n=19).....                                                         | 90  |
| Abbildung 75 | Wohnungsgröße der teilnehmenden Haushalte (n=19).....                                              | 91  |
| Abbildung 76 | Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen im Zeitvergleich .....                                       | 92  |
| Abbildung 77 | Aufenthalt im Gebäude an Samstagen (Vergleich Sommer mit Winter) .                                 | 92  |
| Abbildung 78 | Aufenthalt im Gebäude an Sonntagen (Vergleich Sommer mit Winter) ..                                | 93  |
| Abbildung 79 | Aufenthalt im Gebäude unter der Woche (Vergleich Sommer mit Winter)<br>.....                       | 93  |
| Abbildung 80 | Markierung des Datenpunkts über den die verwendeten Messdaten<br>erhoben wurden.....               | 96  |
| Abbildung 81 | Visualisierung der Messtechnischen Basis der Grundwassertemperaturen<br>.....                      | 99  |
| Abbildung 82 | Darstellung des Gebäudemodells in der 3D-Ansicht in IDA ICE .....                                  | 101 |
| Abbildung 83 | Screenshot des „Allgemein“ – Tabs in IDA ICE.....                                                  | 102 |
| Abbildung 84 | Zonendialog in IDA ICE am Beispiel der Zone W63.....                                               | 104 |
| Abbildung 85 | Zeitplan Anwesenheit der Personen (links) und Zeitplan Geräte und Licht<br>der Büros (rechts)..... | 108 |
| Abbildung 86 | Zeitplan Anwesenheit Personen (links) und Geräte und Licht des<br>Supermarkts (rechts) .....       | 109 |

|               |                                                                                                                                                           |     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 87  | Zeitplan Anwesenheit (links oben), Geräte (rechts oben), Kunstlicht (unten) der Wohnungen.....                                                            | 110 |
| Abbildung 88  | Schematische Darstellung der im Gebäudemodell vorhandenen Lüftungsanlage .....                                                                            | 112 |
| Abbildung 89  | Schematische Darstellung der im Gebäudemodell vorhandenen Anlage zur Wärme- und Kälteerzeugung .....                                                      | 113 |
| Abbildung 90  | Änderung der lokalen Heiz- und Kühlelemente am Beispiel der Zone „Büro 1“. Obere Abbildung vor der Änderung; untere Abbildung nach der Änderung.....      | 114 |
| Abbildung 91  | Darstellung der Änderungen bezüglich der Undichte im Gebäudemodell .....                                                                                  | 116 |
| Abbildung 92  | Darstellung der Schaltfläche „Zentrale Gebäudetechnik“ .....                                                                                              | 118 |
| Abbildung 93  | Prinzipdarstellung des elektrischen Systems in IDA ICE.....                                                                                               | 119 |
| Abbildung 94  | Modellierte PV-Anlage in IDA ICE (links), Satellitenbild pulsG mit ersichtlicher PV-Anlage (rechts) .....                                                 | 119 |
| Abbildung 95  | Abbildung des Modells der Modellierten Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung .....                                                                          | 122 |
| Abbildung 96  | Parameter des Ventilators (rf).....                                                                                                                       | 123 |
| Abbildung 97  | Parameter der Wärmerückgewinnung .....                                                                                                                    | 124 |
| Abbildung 98  | Zeitplan der Regelung des Ventilators .....                                                                                                               | 125 |
| Abbildung 99  | Darstellung der modellierten Anlage der Wärme- und Kälteversorgung.....                                                                                   | 125 |
| Abbildung 100 | Überblick über die Makros der Wärmeerzeugung .....                                                                                                        | 127 |
| Abbildung 101 | Unterteilung der Wärmeerzeugung in funktionelle Einheiten, die dann in den Makros zusammengefasst werden .....                                            | 128 |
| Abbildung 102 | Abbildung der Abluftwärmepumpe (Makro ABL_WP).....                                                                                                        | 129 |
| Abbildung 103 | Makro Wärmemengenzähler (WMZ).....                                                                                                                        | 129 |
| Abbildung 104 | Schematische Darstellung der Wechselwirkung des Makros ABL_WP und der Abluftanlage in IDA ICE .....                                                       | 131 |
| Abbildung 105 | Nummerierung der Pumpen in Makro ABL_WP .....                                                                                                             | 132 |
| Abbildung 106 | Parametrierung des Wärmepumpenmodells im Makro ABL_WP .....                                                                                               | 135 |
| Abbildung 107 | Abbildung der Blockheizkraftwerke (Makro BHKWs) mit Nummerierung der Pumpen (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zu den Regelungsmakros (grün) ..... | 136 |
| Abbildung 108 | Parametrierung des BHKW-Modells (CHP_model).....                                                                                                          | 137 |
| Abbildung 109 | Schnittstellen des BHKW-Modells (CHP_model) .....                                                                                                         | 137 |
| Abbildung 110 | Prinzipskizze der Erdwärmepumpen (Makro Erd_WP) mit Nummerierung der Pumpen (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zu den Regelungsmakros (grün) ..... | 139 |
| Abbildung 111 | Einbindung eines externen Datensatzes über ein Source-File in IDA ICE .....                                                                               | 140 |
| Abbildung 112 | Parametrierung der Wärmepumpe (B2b_Hp_modell) im Makro ABL_WP .....                                                                                       | 141 |

|               |                                                                                                                                                           |     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 113 | Abbildung der Prozessabwärme (Makro Prozessabwärme) mit Nummerierung der Pumpen (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zum Regelungsmakro (grün) ..... | 142 |
| Abbildung 114 | Schema der Kälteerzeugung (Makro Kälteerzeugung) mit Nummerierung der Pumpe (rot) sowie Markierung der Schnittstellen zum Regelungsmakro (grün) .....     | 144 |
| Abbildung 115 | Anpassung der seriellen Speicher zu einem Speichermodell .....                                                                                            | 147 |
| Abbildung 116 | Darstellung des Speichermodells mit In- und Outletstreams .....                                                                                           | 148 |
| Abbildung 117 | Erklärung der Struktur der Makros zur Regelung der Erzeugerkomponenten .....                                                                              | 149 |
| Abbildung 118 | Makro ABL_WP_CTRL_1 .....                                                                                                                                 | 150 |
| Abbildung 119 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros ABL_WP_CTRL_1 (in grün markiert) .....                                                                 | 151 |
| Abbildung 120 | Makro ABL_WP_CTRL_2 .....                                                                                                                                 | 151 |
| Abbildung 121 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros ABL_WP_CTRL_2 (in grün markiert) .....                                                                 | 152 |
| Abbildung 122 | Makro ABL_WP_CTRL_3 .....                                                                                                                                 | 152 |
| Abbildung 123 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros ABL_WP_CTRL_3 (in grün markiert) .....                                                                 | 154 |
| Abbildung 124 | Makro ABL_WP_CTRL_4 .....                                                                                                                                 | 154 |
| Abbildung 125 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros ABL_WP_CTRL_4 (in grün markiert) .....                                                                 | 155 |
| Abbildung 126 | Makro ABL_WP_CTRL_5 .....                                                                                                                                 | 155 |
| Abbildung 127 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros ABL_WP_CTRL_5 (in grün markiert) .....                                                                 | 156 |
| Abbildung 128 | Makro BHKW_CTRL_1 .....                                                                                                                                   | 156 |
| Abbildung 129 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros BHKW_CTRL_1 (in grün markiert) .....                                                                   | 157 |
| Abbildung 130 | Makro BHKW_CTRL_2 .....                                                                                                                                   | 157 |
| Abbildung 131 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros BHKW_CTRL_2 (in grün markiert) .....                                                                   | 158 |
| Abbildung 132 | Makro GEO_WP_CTRL_1 .....                                                                                                                                 | 159 |
| Abbildung 133 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros GEO_WP_CTRL_1 (in grün markiert) .....                                                                 | 160 |
| Abbildung 134 | Makro GEO_WP_CTRL_1 .....                                                                                                                                 | 160 |
| Abbildung 135 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros GEO_WP_CTRL_3 (in grün markiert) .....                                                                 | 161 |
| Abbildung 136 | Makro ABW_CTRL_1 .....                                                                                                                                    | 162 |
| Abbildung 137 | Abbildung des Zeitplans im Makro ABW_CTRL_1 .....                                                                                                         | 162 |
| Abbildung 138 | Wechselwirkung des Signalfluss des Regelungsmakros ABW_CTRL_1 (in grün markiert) .....                                                                    | 163 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 139 Makro KAE_CTRL_1 .....                                                                  | 164 |
| Abbildung 140 Parametrierung Zonensensor im Makro KAE_CTRL_1 .....                                    | 164 |
| Abbildung 141 Markierung der Regelung der Zonenversorgung mit Wärme und Kälte .....                   | 165 |
| Abbildung 142 Signalfuss und Energieflüsse des Referenzmodells .....                                  | 167 |
| Abbildung 143 Darstellung der Plattform SMARD und Navigation zum Datensatz .....                      | 168 |
| Abbildung 144 Navigation zum Download des Datensatzes .....                                           | 169 |
| Abbildung 145 Darstellung der Simulationsdaten .....                                                  | 172 |
| Abbildung 146 Regelungsmakro ABL_WP_CTRL_3 in Variante 1 .....                                        | 175 |
| Abbildung 147 Regelungsmakro GEO_WP_CTRL_1 in Variante 1 .....                                        | 176 |
| Abbildung 148 Regelungsmakro BHKW_CTRL_1 in Variante 3 .....                                          | 178 |
| Abbildung 149 Regelungsmakro ABL_WP_CTRL_3 in Variante 4 .....                                        | 179 |
| Abbildung 150 Regelungsmakro Erd_WP_CTRL_1 in Variante 4 .....                                        | 180 |
| Abbildung 151 Nutzerbegriffe [32] .....                                                               | 186 |
| Abbildung 152 Messpunkte Datenbank zur Visualisierung [33] .....                                      | 190 |
| Abbildung 153 Darstellung Stromerzeugung Visualisierung .....                                         | 192 |
| Abbildung 154 Verteilung der EWK der GKA (schematisch und Foto bei Einbau) .....                      | 193 |
| Abbildung 155 Grundwassermessstellen um das Gebäude puls <sup>G</sup> (ohne MP05) .....               | 194 |
| Abbildung 156 Temperaturverlauf des Grundwassers an den Messstellen .....                             | 195 |
| Abbildung 157 Verlauf Außentemperatur zu Grundwasser im Jahr 2022 .....                               | 196 |
| Abbildung 158 Durchschnittliche und spezifische Entzugsleistung der GKA im Jahr 2021 .....            | 197 |
| Abbildung 159 Durchschnittliche, monatliche Massenströme der einzelnen EWK im Jahr 2021 .....         | 198 |
| Abbildung 160 Bodenzusammensetzung einer Messstelle mit Klassifikation nach DIN 4220 .....            | 199 |
| Abbildung 161 Tiefe des Grundwassers einer nahegelegenen Messstation aus dem Jahr 2018 .....          | 200 |
| Abbildung 162 Mittlere Grundwassertiefe mit Düker (2019, in Anlehnung an DHI WASY GmbH) .....         | 201 |
| Abbildung 163 Tatsächliche Geometrie vs. Geometrie für die Simulation (Bodenplatten) [29] .....       | 202 |
| Abbildung 164 Tatsächliche Geometrie vs. Geometrie für die Simulation (Deckenentfernung) [29] .....   | 202 |
| Abbildung 165 Explosionszeichnung des Gebäudes (links) und der Bodenschichten (rechts) [29] .....     | 203 |
| Abbildung 166 Zuweisung der Startbedingungen [29] .....                                               | 204 |
| Abbildung 167 Grundwassergeschwindigkeit in Bezug auf die Tiefe (in Anlehnung an DHI WASY GmbH) ..... | 205 |
| Abbildung 168 Grundwassertemperatur als Mittelwert von 2018, 2019 und 2020 .....                      | 205 |

|               |                                                                                         |     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 169 | Zuweisung des Grundwassers [29].....                                                    | 206 |
| Abbildung 170 | Klimabedingungen (und Grundwasser) [29].....                                            | 207 |
| Abbildung 171 | Darstellung der zweidimensionalen Schnitte zur Ermittlung der<br>Rohrmodelle [29] ..... | 208 |
| Abbildung 172 | Gegenüberstellung der bilanziellen Anbindeleitungsentzüge [29] .....                    | 209 |
| Abbildung 173 | Jahresverlauf der Energien des Vor- und Rücklaufes von EWK 5 [29].                      | 210 |
| Abbildung 174 | Spezifische Energieentzüge der EWK [29] .....                                           | 211 |
| Abbildung 175 | Jahresverlauf der bilanziellen Energieentzüge von EWK 5 [29] .....                      | 212 |
| Abbildung 176 | Einschwingverhalten des Feuchtigkeitsintegrals und der EWK-<br>Temperatur [29] .....    | 213 |
| Abbildung 177 | Gemessene vs. simulierte Temperatur eines EWK (EWK 5) [29].....                         | 214 |
| Abbildung 178 | Gemessene vs. simulierte Temperatur eines EWK (Abweichungen, EWK<br>6) [29] .....       | 214 |
| Abbildung 179 | Gut vs. unzureichend nachgebildete EWK [29] .....                                       | 215 |
| Abbildung 180 | Temperaturprofil des ersten Untergeschosses im November 2021 [29]                       | 216 |
| Abbildung 181 | Aufteilung der spezifischen Quellwärme [29] .....                                       | 217 |
| Abbildung 182 | Klimazonen des ersten (links) und des zweiten Untergeschosses (rechts)<br>[29] .....    | 218 |
| Abbildung 183 | Korrelationen verschiedenerer Temperaturen [29] .....                                   | 220 |
| Abbildung 184 | Bestimmung der Wetterdaten [29] .....                                                   | 221 |
| Abbildung 185 | Schematisches Regelungsmodell (MasterSim) [29] .....                                    | 222 |
| Abbildung 186 | Faktorvergabe bei Wärmeentzug [29] .....                                                | 224 |
| Abbildung 187 | Sprungantwort eines Simulationsmodells [29] .....                                       | 226 |
| Abbildung 188 | Faktorvergabe bei Abwärmeeintrag [29] .....                                             | 227 |
| Abbildung 189 | Leitungen und Einbauten für die Druckverlustbestimmung [29] .....                       | 228 |
| Abbildung 190 | Beispiel einer Temperaturvorgabe für einen Reglertest [29] .....                        | 229 |
| Abbildung 191 | Status, Faktoren und Massenströme des Reglertests [29] .....                            | 230 |
| Abbildung 192 | Variantenpfad zur Ermittlung optimierter Reglerparameter [29] .....                     | 231 |
| Abbildung 193 | Summenkurve der gemessenen und der simulierten, geregelten GKA-<br>Leistung [29] .....  | 233 |
| Abbildung 194 | Regelventil Modellreihe VLA100 [30] .....                                               | 234 |
| Abbildung 195 | Stellmotor Serie ALF [31] .....                                                         | 234 |
| Abbildung 196 | Regelventile mit Stellmotoren an EWK-Strängen .....                                     | 235 |
| Abbildung 197 | Ventilkennlinie [29] .....                                                              | 236 |
| Abbildung 198 | Entzogene Quellenergie aus GKA und Anteil an gesamter<br>Energiebereitstellung .....    | 237 |
| Abbildung 199 | Normierte entzogene Energiemengen je EWK .....                                          | 238 |
| Abbildung 200 | Durchschnittlich, normierte Entzugsleistung je EWK .....                                | 239 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 201Heatmap spezifischer Energieentzug der EWK von Januar 2021 bis Juli<br>2024 ..... | 241 |
| Abbildung 202Langfristiger Pegelmessstand in Geretsried .....                                  | 243 |

# Tabellenverzeichnis

|            |                                                                                                                                       |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 1  | Anteil elektrischer Energieverbrauch DLH am elektrischen Gesamtverbrauch der Wohnungsgruppe (Zeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2022) ..... | 69  |
| Tabelle 2  | Anteil elektrischer Energieverbrauch DLH am elektrischen Gesamtverbrauch der Wohnungsgruppe (Zeitraum: 01.01.2023 – 31.12.2023) ..... | 69  |
| Tabelle 3  | Auflistung Ergebnisse einfaches Verfahren .....                                                                                       | 73  |
| Tabelle 4  | Auflistung Ergebnisse Tagesmitteltemperaturverfahren .....                                                                            | 75  |
| Tabelle 5  | Emittierte CO <sub>2</sub> -Emissionen bei der Wärmeerzeugung .....                                                                   | 78  |
| Tabelle 6  | Übersicht über die im Gebäudemodell verwendeten Bauteilaufbauten und deren U-Werte .....                                              | 103 |
| Tabelle 7  | Gruppierung der Zonen des Gebäudemodells .....                                                                                        | 104 |
| Tabelle 8  | Regelungssollwerte der Zonen des übergebenen Gebäudemodells ....                                                                      | 105 |
| Tabelle 9  | Anzahl interne Wärmequellen Büros .....                                                                                               | 107 |
| Tabelle 10 | Anzahl interne Wärmequellen Supermarkt .....                                                                                          | 108 |
| Tabelle 11 | Anzahl interne Wärmequellen Wohnungen nach Zonengruppen sortiert .....                                                                | 109 |
| Tabelle 12 | Parametrierungswerte (Volumenstrom) der Undichten sortiert nach Zonengruppen .....                                                    | 117 |
| Tabelle 13 | Daten der modellierten PV-Anlage .....                                                                                                | 120 |
| Tabelle 14 | Daten des modellierten Batteriespeichers .....                                                                                        | 121 |
| Tabelle 15 | Parametrierung Pumpen Makro ABL_WP .....                                                                                              | 132 |
| Tabelle 16 | Parametrierung Wärmespeicher Makro ABL_WP .....                                                                                       | 133 |
| Tabelle 17 | Parametrierung des Wärmetauschers in Makro ABL_WP .....                                                                               | 134 |
| Tabelle 18 | Parametrierung der Pumpen im Makro BHKWs .....                                                                                        | 138 |
| Tabelle 19 | Parametrierung der Pumpen im Makro Erd_WP .....                                                                                       | 139 |
| Tabelle 20 | Parametrierung der Pumpen im Makro Prozessabwärme .....                                                                               | 142 |
| Tabelle 21 | Parametrierung des Wärmetauschers im Makro Prozessabwärme .....                                                                       | 143 |
| Tabelle 22 | Parametrierung der Pumpe (PUMPCIRC) im Makro Kälteerzeugung ..                                                                        | 144 |
| Tabelle 23 | Parametrierung des Wärmetauschers im Makro Kälteerzeugung .....                                                                       | 146 |
| Tabelle 24 | Parameter des zentralen Speichermodells (Hottank) .....                                                                               | 148 |
| Tabelle 25 | Parametrierung der Proportionalregler im Makro ABL_WP_CTRL_3 ...                                                                      | 153 |
| Tabelle 26 | Parametrierung des Proportionalreglers in Makro ABL_WP_CTRL_4 .                                                                       | 155 |
| Tabelle 27 | Parametrierung des Proportionalreglers in Makro ABL_WP_CTRL_5 .                                                                       | 156 |
| Tabelle 28 | Parametrierung des Proportionalreglers in Makro GEO_WP_CTRL_1                                                                         | 159 |
| Tabelle 29 | Regelsignal nach Zeitraum durch den Zeitplan vorgegeben .....                                                                         | 163 |

|            |                                                                                         |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 30 | Parametrierung des Proportionalreglers in Makro Kälteversorgung .....                   | 165 |
| Tabelle 31 | Statistische Kennwerte der Datenreihe der Residuallast.....                             | 173 |
| Tabelle 32 | Parametrierung Proportionalregler Residuallast ABL_WP_CTRL_3<br>Variante 1 .....        | 175 |
| Tabelle 33 | Übersicht der Modellvarianten mit Kurzbeschreibung .....                                | 181 |
| Tabelle 34 | Energieverbräuche der verschiedenen Modellvarianten .....                               | 183 |
| Tabelle 35 | Daten Energiezähler [33] .....                                                          | 189 |
| Tabelle 36 | Messdatenauflistung Visualisierung je Wohnung .....                                     | 191 |
| Tabelle 37 | Messdatenauflistung Technikzentrale .....                                               | 191 |
| Tabelle 38 | Korrelation zwischen Außentemperatur und Innenraumtemperatur der<br>Untergeschosse..... | 219 |
| Tabelle 39 | Individuelle EWK-Status .....                                                           | 223 |
| Tabelle 40 | Zusammenfassung der Reglerparameter.....                                                | 232 |
| Tabelle 41 | Durchschnittliche Entzugsleistungen über Projektjahre.....                              | 239 |
| Tabelle 42 | Entzugsleistungen in den Jahren 2021, 2022 und 2023.....                                | 240 |
| Tabelle 43 | Einbautiefen EWK .....                                                                  | 244 |

# Anlagenverzeichnis

## A.1 Einstell- und Betriebsanleitung Wohnungsstation WSG-2-Duo

### Funktionsweise der Wohnungsstation

1. In der Energiezentrale wird Heizungswasser durch Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke vorbereitet.
2. Über den Heizungsstrang werden alle Wohnungsstationen als auch die Gewerbeeinheiten (nicht Edekal) mit Wärmeenergie versorgt.

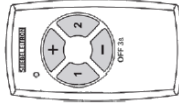
### Trinkwarmwasserbereitung

3. Zur Trinkwarmwasserbereitung (Duschen, Wasserhahn, etc.) wird die Wärme im Heizungsstrang durch den Wärmetauscher ① abgenommen. Die Temperaturregelung erfolgt über das Thermostatventil ②, welches auf der Stufe 4,5 eingestellt sein soll.

4. Frisches Trinkwasser (bisher noch kalt) wird auf ca. 38 °C als Grundversorgung vorgewärmt.
5. Je nach Wunsch des Nutzers kann dieser die Trinkwassertemperatur mithilfe des elektrischen Durchlauferhitzers ③ anheben. Die Bedienung erfolgt über eine dem Mieter vorliegende Fernbedienung. Der hierfür benötigte Strom wird dem Wohnungstromzähler zugerechnet.

### 6. Benutzung der Fernbedienung:

- a. Einstellung der Temperaturgrenzen für Trinkwarmwasser über die Tasten 1 und 2 (min. / max.)  
→ Temperatur entweder 38 °C oder 60 °C
- b. FeinEinstellung der gewünschten Trinkwassertemperatur über die Tasten Plus und Minus  
→ Veränderung der Zapftemperatur in 0,5-Grad-Schritten  
→ Visuelle Anzeige ist nicht möglich (man muss mitzählen)



### Fußbodenheizung

7. Im Heizungsbetrieb schaltet die Heizungsanlage ④, sodass durch die Fußbodenheizung Heizungswasser fließt. Zur Temperaturbegrenzung für eine optimale und für den Nutzer komfortable Betriebsweise ist das Thermostatventil ⑤ auf die Stufe 6 einzustellen. Die Fußbodenheizung wird mit 37 °C warmen Heizungswasser durchströmt.

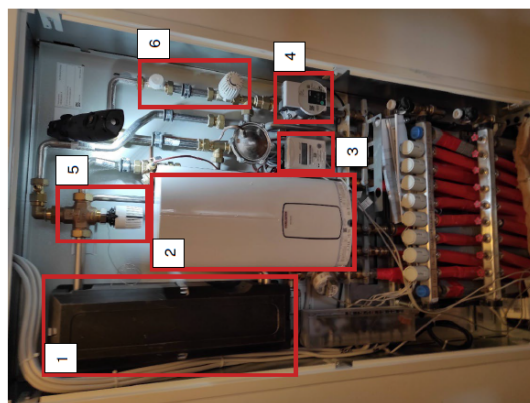
**Anmerkung:** Sollte eine niedrigere Stufe als die Stufe 6 vorgefunden werden und bei Anpassung der Ventilstellung eine Durchströmung zu hören sein, dann ist die Ventilstellung auf den vorherigen Wert zurückzusetzen. Infolge unterschiedlicher Anordnungen am Heizungsstrang kann auch eine niedrigere Stufe möglich sein. Tipp: Prüfung außerhalb der Heizperiode, Ventilstellung darf keinen Volumenstrom durchlassen (Hörprobe)

8. Die Raumtemperatur regeln die Raumthermostate, die der Nutzer in jedem Raum einstellen kann.

### Wichtiger Hinweis:

Die eingestellten Stufen der Thermostate an der Wohnungsstation ⑤ und ⑥ sind für eine energieeffiziente Betriebsweise der Anlagentechnik nicht zu verändern!

### Einstellung und Betriebsweise der Wohnungsstation WSG-2-DUO nach Soll-Vorgaben



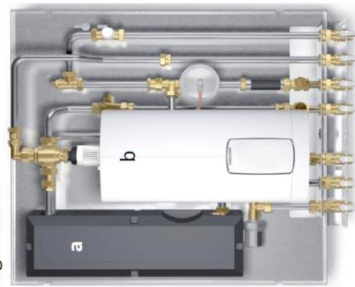
### Aufbau

- ① Wärmepumpe zur Abnahme der Wärme aus dem Heizungsstrang
- ② Elektrischer Durchlauferhitzer, um Temperaturniveau für die Zapfung nach dem Wunsch des Nutzers anzupassen
- ③ Wärmemengenzähler
- ④ Heizungsanlage
- ⑤ Thermostatventil zur Einstellung der vorgewärmten Trinkwassertemperatur
- ⑥ Thermostatventil zur Einstellung der Temperatur der Fußbodenheizung

## A.2 Informationsflyer für Bewohnende

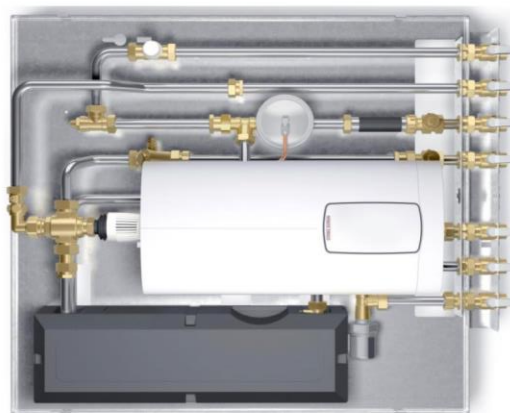
### Zum Hintergrund der Anlagentechnik

In Ihrer Wohnung befindet sich hinter einer Verblendung im Wohnungsflur eine effiziente, hybride Wohnungsstation. Hintergrund dieser Technologie ist es geringe energetische Verluste im Gebäude zu erzielen. Hierfür wird kaltes Trinkwasser im Wärmetauscher ③ erwärmt und über einen elektrischen Durchlauferhitzer ② auf die von Ihnen gewünschte Wassertemperatur angehoben.



### Hinweise zur Benutzung der hybriden Wohnungsstation

Forschungsvorhaben +EQ-Net II



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Mithilfe der PLUS bzw. MINUS-Tasten ① stellen Sie die gewünschte Wassertemperatur aus dem Wasserhahn in 0,5 Grad Celsius Schritten ein.

Über die Tasten mit den Zahlen ② werden die Betriebsgrenzen der Wohnungsstation eingestellt:

- 1: Wassertemperatur bei 38°C
- 2: Wassertemperatur bei 60°C

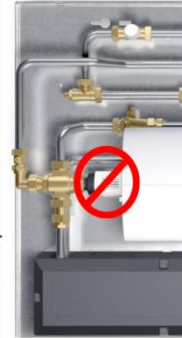
Anschließend wird über die Tasten PLUS bzw. MINUS die gewünschte Temperatur kleinschrittig eingestellt.

Bei jedem Tastendruck leuchtet die LED ③ auf. Sollte diese nicht mehr leuchten, ist die Batterie der Fernbedienung leer und auszutauschen.

Sollten Sie mindestens 3 Sekunden auf die MINUS-Taste drücken, wird die Anlage abgeschaltet. Dieser Schritt ist infolge von Komfortgründen nicht zu empfehlen. Ein Einschalten erfolgt wieder, indem Sie auf eine beliebige Taste der Fernbedienung drücken.

### Wichtige Hinweise

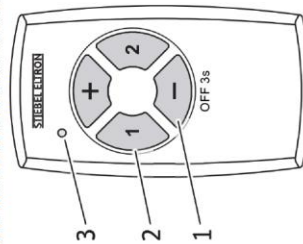
1. Die Anlage und die Temperatur des Wassers sind **NUR** über die Fernbedienung nach den angegebenen Hinweisen zu bedienen!
2. Das Thermostatventil an der Anlage (rot markiert) sollte immer zwischen den Stufen 4 und 5 gestellt sein. Eine andere Einstellung ist aufgrund einer ordnungsgemäßen Funktionalität der Anlagentechnik **NICHT** vorzunehmen! Die Einstellung darf nur vom autorisierten Fachpersonal verändert werden!



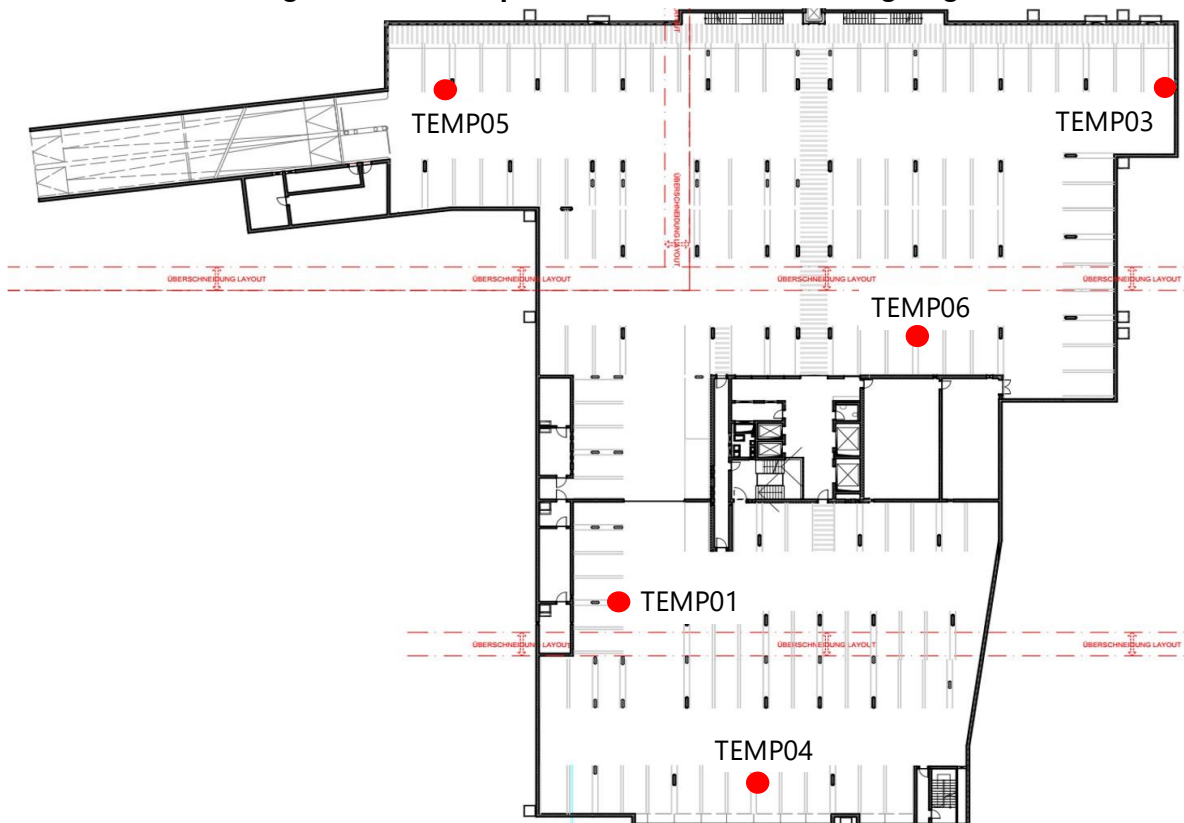
Eingestellte Stufe zwischen 4 und 5

### Bedienung der Wohnungsstation

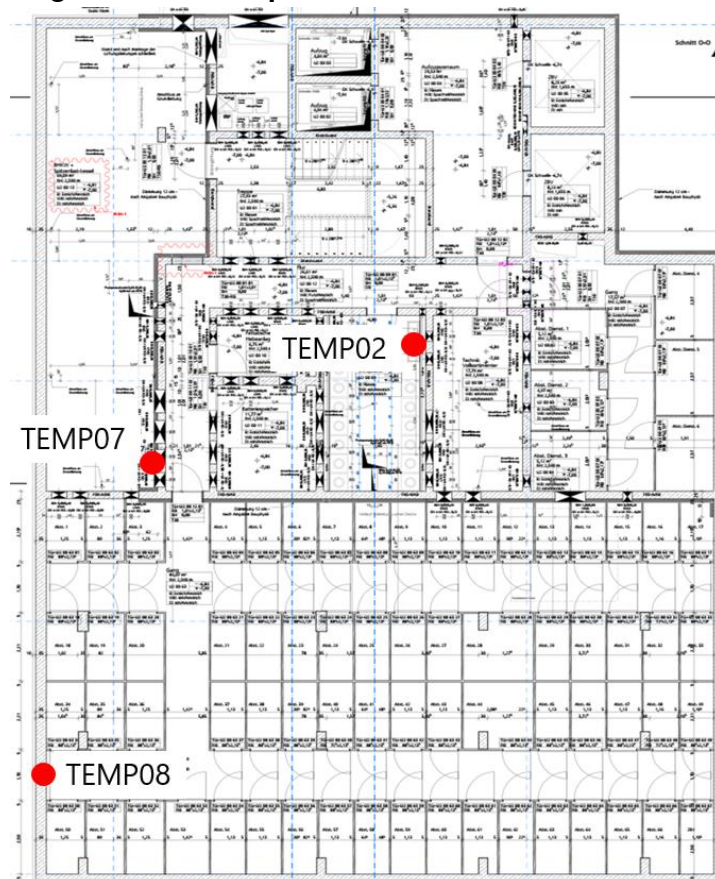
Über die mitgelieferte Fernbedienung wird die Wohnungsstation nach Ihren Wünschen bedient.



### A.3 Orte der nachgerüsteten Temperatursensoren in der Tiefgarage



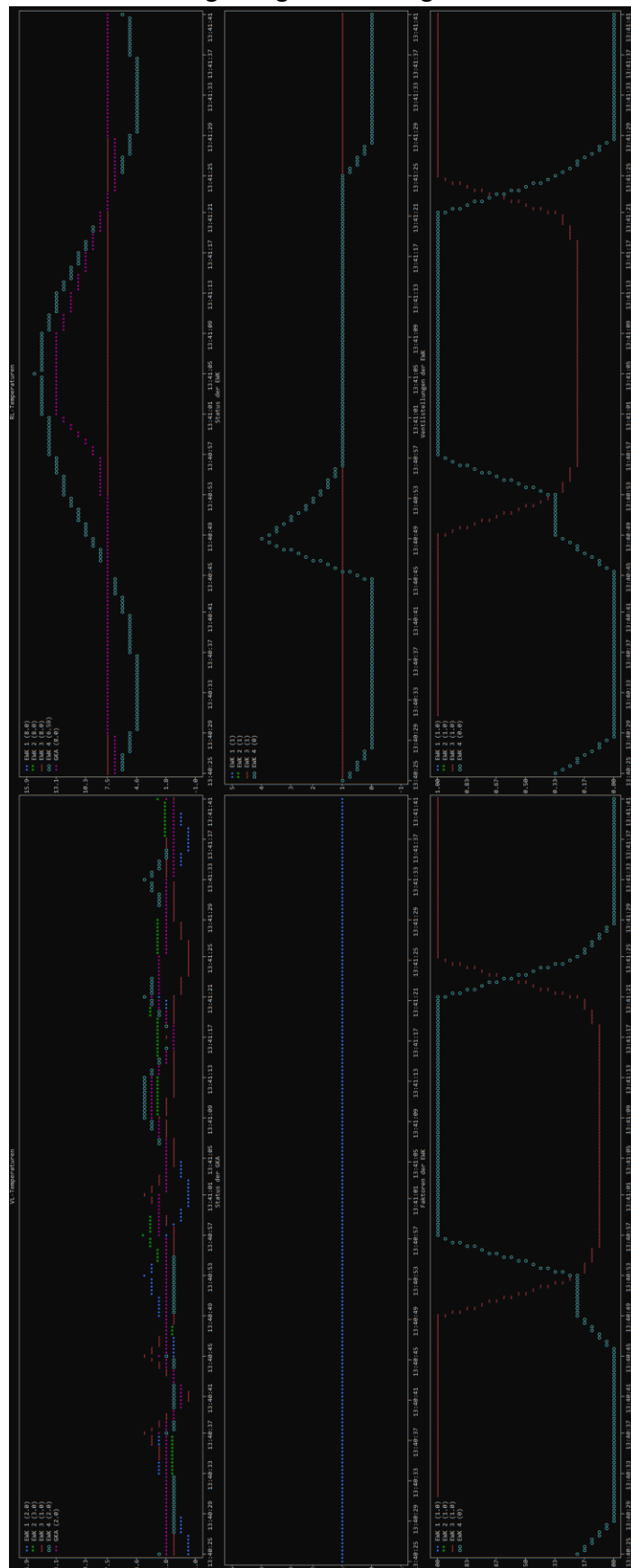
### A.4 Orte der nachgerüsteten Temperatursensoren in den Kellerbereichen



## Netzneutrales Wohn- und Geschäftshaus puls<sup>G</sup> in Geretsried - +EQ-Net II



## A.6 Benutzeroberfläche der Regelung mit wichtigsten Informationen



**A.7 Übersicht der Lokalen Heiz-/ Kühlelemente des Gebäudemodells**

| Name             | Typ                   | Gruppe     | Kühlleistung, W | Heizleistung, W |
|------------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------|
| W61.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 7  |                 | 7741            |
| W62.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 4  |                 | 5120            |
| W66.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 10 |                 | 10700           |
| W65.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 5  |                 | 6204            |
| W64.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 9  |                 | 9288            |
| W63.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 11 |                 | 13590           |
| W55.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 7  |                 | 7771            |
| W56.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 4  |                 | 5102            |
| W60.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 10 |                 | 10700           |
| W59.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 5  |                 | 6202            |
| W58.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 9  |                 | 9310            |
| W57.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 11 |                 | 13570           |
| W54.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 10 |                 | 10750           |
| W37.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 9  |                 | 9154            |
| W38.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 3  |                 | 4790            |
| W53.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 5  |                 | 6231            |
| W52.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung 8  |                 | 8605            |

|                  |                       |               |  |       |
|------------------|-----------------------|---------------|--|-------|
| W39.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3377  |
| W40.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3379  |
| W41.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8  |  | 8509  |
| W42.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>6  |  | 6781  |
| W51.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6215  |
| W50.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6204  |
| W43.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3349  |
| W49.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>2  |  | 4116  |
| W44.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3350  |
| W48.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>9  |  | 9187  |
| W47.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6185  |
| W46.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>4  |  | 5376  |
| W45.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8  |  | 8459  |
| W19.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>9  |  | 9149  |
| W36.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>10 |  | 10750 |
| W35.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6231  |
| W34.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8  |  | 8608  |
| W33.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6212  |

|                  |                       |               |  |       |
|------------------|-----------------------|---------------|--|-------|
| W32.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6205  |
| W31.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>2  |  | 4115  |
| W30.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>9  |  | 9191  |
| W29.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6192  |
| W28.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>4  |  | 5379  |
| W27.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8  |  | 8405  |
| W26.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3393  |
| W25.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3347  |
| W24.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>6  |  | 6900  |
| W21.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3379  |
| W22.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1  |  | 3371  |
| W23.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8  |  | 8737  |
| W20.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>3  |  | 4795  |
| W18.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>10 |  | 10750 |
| W1.Ideal heater  | © ideales Heizelement | Wohnung<br>9  |  | 9145  |
| W17.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5  |  | 6231  |
| W2.Ideal heater  | © ideales Heizelement | Wohnung<br>3  |  | 4789  |
| W16.Ideal heater | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8  |  | 8607  |

|                           |                       |              |        |        |
|---------------------------|-----------------------|--------------|--------|--------|
| W14.Ideal heater          | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5 |        | 6206   |
| W13.Ideal heater          | © ideales Heizelement | Wohnung<br>2 |        | 4116   |
| W12.Ideal heater          | © ideales Heizelement | Wohnung<br>9 |        | 9190   |
| W11.Ideal heater          | © ideales Heizelement | Wohnung<br>5 |        | 6194   |
| W10.Ideal heater          | © ideales Heizelement | Wohnung<br>4 |        | 5378   |
| W9.Ideal heater           | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8 |        | 8403   |
| W8.Ideal heater           | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1 |        | 3387   |
| W7.Ideal heater           | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1 |        | 3348   |
| W6.Ideal heater           | © ideales Heizelement | Wohnung<br>6 |        | 6898   |
| W3.Ideal heater           | © ideales Heizelement | Wohnung<br>1 |        | 3334   |
| W5.Ideal heater           | © ideales Heizelement | Wohnung<br>8 |        | 8707   |
| Büro 2.Ideal cooler       | © ideales Kühlelement | Büros        | 168700 |        |
| Büro 2.Ideal heater       | © ideales Heizelement | Büros        |        | 84360  |
| Büro 1.Ideal cooler       | © ideales Kühlelement | Büros        | 52700  |        |
| Büro 1.Ideal heater       | © ideales Heizelement | Büros        |        | 26350  |
| Büro 3.Ideal cooler       | © ideales Kühlelement | Büros        | 63220  |        |
| Büro 3.Ideal heater       | © ideales Heizelement | Büros        |        | 31610  |
| Supermarkt.Ideal cooler   | © ideales Kühlelement | Supermarkt   | 398600 |        |
| Supermarkt.Ideal heater   | © ideales Heizelement | Supermarkt   |        | 199300 |
| Aufenthalt 1.Ideal cooler | © ideales Kühlelement | Supermarkt   | 16240  |        |

|                   |         |                       |            |       |      |
|-------------------|---------|-----------------------|------------|-------|------|
| Aufenthalt heater | 1.Ideal | © ideales Heizelement | Supermarkt |       | 8122 |
| Aufenthalt cooler | 2.Ideal | © ideales Kühlelement | Supermarkt | 18880 |      |
| Aufenthalt heater | 2.Ideal | © ideales Heizelement | Supermarkt |       | 9440 |
| W4.Ideal heater   |         | © ideales Heizelement | Wohnung 1  |       | 3387 |
| W15.Ideal heater  |         | © ideales Heizelement | Wohnung 5  |       | 6210 |

#### A.8 Übersicht der Lokalen Heiz-/ Kühlelemente des Gebäudemodells nach der Änderung auf ein wassergeführtes System

| Name                               | Typ                              | Gruppe     | Kühlleistung, W | Heizleistung, W |
|------------------------------------|----------------------------------|------------|-----------------|-----------------|
| W61.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 7  | 0               | 7741            |
| W62.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 4  | 0               | 5120            |
| W66.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 10 | 0               | 10700           |
| W65.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 5  | 0               | 6204            |
| W64.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 9  | 0               | 9288            |
| W63.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 11 | 0               | 13590           |
| W55.Einfacher Ventilator-konvektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Wohnung 7  | 0               | 7771            |

|                                     |                                  |             |   |       |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------|---|-------|
| W56.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 4  | 0 | 5102  |
| W60.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 10 | 0 | 10700 |
| W59.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6202  |
| W58.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9  | 0 | 9310  |
| W57.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 11 | 0 | 13570 |
| W54.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 10 | 0 | 10750 |
| W37.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9  | 0 | 9154  |
| W38.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 3  | 0 | 4790  |
| W53.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6231  |
| W52.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8  | 0 | 8605  |
| W39.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1  | 0 | 3377  |
| W40.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1  | 0 | 3379  |
| W41.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8  | 0 | 8509  |

|                                     |                                  |             |   |       |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------|---|-------|
| W42.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 6  | 0 | 6781  |
| W51.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6215  |
| W50.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6204  |
| W43.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1  | 0 | 3349  |
| W49.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 2  | 0 | 4116  |
| W44.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1  | 0 | 3350  |
| W48.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9  | 0 | 9187  |
| W47.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6185  |
| W46.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 4  | 0 | 5376  |
| W45.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8  | 0 | 8459  |
| W19.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9  | 0 | 9149  |
| W36.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 10 | 0 | 10750 |
| W35.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6231  |

|                                     |                                  |            |   |      |
|-------------------------------------|----------------------------------|------------|---|------|
| W34.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8 | 0 | 8608 |
| W33.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5 | 0 | 6212 |
| W32.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5 | 0 | 6205 |
| W31.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 2 | 0 | 4115 |
| W30.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9 | 0 | 9191 |
| W29.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5 | 0 | 6192 |
| W28.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 4 | 0 | 5379 |
| W27.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8 | 0 | 8405 |
| W26.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1 | 0 | 3393 |
| W25.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1 | 0 | 3347 |
| W24.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 6 | 0 | 6900 |
| W21.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1 | 0 | 3379 |
| W22.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 1 | 0 | 3371 |

|                                     |                                  |             |   |       |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------|---|-------|
| W23.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8  | 0 | 8737  |
| W20.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 3  | 0 | 4795  |
| W18.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 10 | 0 | 10750 |
| W1.Einfacher Ventilator-kon-vektor  | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9  | 0 | 9145  |
| W17.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6231  |
| W2.Einfacher Ventilator-kon-vektor  | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 3  | 0 | 4789  |
| W16.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8  | 0 | 8607  |
| W14.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6206  |
| W13.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 2  | 0 | 4116  |
| W12.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 9  | 0 | 9190  |
| W11.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 5  | 0 | 6194  |
| W10.Einfacher Ventilator-kon-vektor | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 4  | 0 | 5378  |
| W9.Einfacher Ventilator-kon-vektor  | © Einfacher Ventilator-konvektor | Woh-nung 8  | 0 | 8403  |

|                                                 |                                      |                          |            |            |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------|------------|
| W8.Einfacher Ventilator-<br>konvektor           | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>1        | 0          | 3387       |
| W7.Einfacher Ventilator-<br>konvektor           | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>1        | 0          | 3348       |
| W6.Einfacher Ventilator-<br>konvektor           | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>6        | 0          | 6898       |
| W3.Einfacher Ventilator-<br>konvektor           | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>1        | 0          | 3334       |
| W5.Einfacher Ventilator-<br>konvektor           | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>8        | 0          | 8707       |
| Büro 2.Einfacher Ventilator-<br>konvektor       | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Bü-<br>ros               | 1687<br>20 | 8436<br>0  |
| Büro 1.Einfacher Ventilator-<br>konvektor       | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Bü-<br>ros               | 5270<br>0  | 2635<br>0  |
| Büro 3.Einfacher Ventilator-<br>konvektor       | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Bü-<br>ros               | 6322<br>0  | 3161<br>0  |
| Supermarkt.Einfacher Ventila-<br>torkonvektor   | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Su-<br>per-<br>mark<br>t | 3986<br>00 | 1993<br>00 |
| Aufenthalt 1.Einfacher Ventila-<br>torkonvektor | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Su-<br>per-<br>mark<br>t | 1624<br>4  | 8122       |
| Aufenthalt 2.Einfacher Ventila-<br>torkonvektor | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Su-<br>per-<br>mark<br>t | 1888<br>0  | 9440       |
| W4.Einfacher Ventilator-<br>konvektor           | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>1        | 0          | 3387<br>0  |
| W15.Einfacher Ventilator-<br>konvektor          | © Einfacher Ventilator-<br>konvektor | Woh-<br>nung<br>5        | 0          | 6210       |

# Literaturverzeichnis

- [1] J. Drgoňa u. a., „All you need to know about model predictive control for buildings“, *Annu. Rev. Control*, Bd. 50, S. 190–232, 2020, doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.001.
- [2] F. Oldewurtel u. a., „Energy efficient building climate control using Stochastic Model Predictive Control and weather predictions“, in *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, IEEE, 2010, S. 5100–5105. doi: 10.1109/ACC.2010.5530680.
- [3] Martin Geidl, „Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems“, ETH Zurich, 2007. doi: 10.3929/ETHZ-A-005377890.
- [4] J. Jungwirth, „Lastmanagement in Gebäuden Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden“, Technische Universität München, München, 2014.
- [5] S. Freund, „Modellbasierte prädiktive Regelung komplexer gebäudetechnischer Anlagen zur Optimierung der Energieeffizienz und des Komforts“, doctoralThesis, Technische Universität Hamburg, 2023. doi: 10.15480/882.5018.
- [6] R. C. Cardoso und A. Ferrando, „A Review of Agent-Based Programming for Multi-Agent Systems“, *Computers*, Bd. 10, Nr. 2, S. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/computers10020016.
- [7] M. Huber, *Agentenbasierte Gebäudeautomation raumluftechnischer Anlagen*, Bd. Diss. RWTH Aachen University, 2016, S. pages Online-Ressource (vi, 119 Seiten) : Illustrationen, Diagramme. doi: 10.18154/RWTH-2017-05551.
- [8] D. Traeger, *Einführung in die Fuzzy-Logik*. Stuttgart: Teubner, 1993.
- [9] A. Schandl, „Betriebsoptimierung eines komplexen Bürogebäudes mit Fernwärmenutzung am Beispiel des LHI Campus Pullach“, Hochschule München, Bachelorarbeit, 2019.
- [10] Q. Marxer, „Bestandsaufnahme und energetische Analyse der Wärmeversorgung im Pullacher Rathaus in Hinblick auf eine effiziente Fernwärmenutzung“, Hochschule München, Bachelorarbeit, Mai 2020.
- [11] F. Rehmann, R. Streblow, und D. Müller, „Kurzfristig umzusetzende Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden und Quartieren“, Technische Universität Berlin, Juli 2022. doi: 10.14279/DEPOSITONCE-16045.2.
- [12] D. Bertermann, H. Klug, L. Morper-Busch, und C. Bialas, „Modelling vSGPs (very shallow geothermal potentials) in selected CSAs (case study areas)“, *Energy*, Bd. 71, S. 226–244, Juli 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.04.054.
- [13] D. Bertermann, H. Klug, und L. Morper-Busch, „A pan-European planning basis for estimating the very shallow geothermal energy potentials“, *Renew. Energy*, Bd. 75, S. 335–347, März 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.09.033.
- [14] S. Wilke, „Energieverbrauch privater Haushalte“, Umweltbundesamt. Zugegriffen: 8. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte>
- [15] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Hrsg., „8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung – Forschungsmissionen für die Energiewende“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/8-energieforschungsprogramm-zur-angewandten-energieforschung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/8-energieforschungsprogramm-zur-angewandten-energieforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=8)
- [16] R. Zeh u. a., „Large-Scale Geothermal Collector Systems for 5th Generation District Heating and Cooling Networks“, *Sustainability*, Bd. 13, Nr. 11, S. 6035, Mai 2021, doi: 10.3390/su13116035.
- [17] E. D. Sipio und D. Bertermann, „Thermal properties variations in unconsolidated material for very shallow geothermal application (ITER project)“, *Int. Agrophysics*, Bd. 32, Nr. 2, S. 149–164, Apr. 2018, doi: 10.1515/intag-2017-0002.
- [18] Interessengemeinschaft Energie Umwelt Feuerungen GmbH, „Auslegung von oberflächennahen Erdwärmekollektoren“, Bd. Infoblatt 43, März 2011.

- [19] VDI, *VDI 4640-2: Thermische Nutzung des Untergrunds Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. 2019, S. 139.
- [20] P. Landsberger, V. Stäudinger, und W. Jensch, „Energetischer Vergleich von Erdwärmekollektoren am Beispiel des Ludmilla-Wohnparks“, Bachelorarbeit, Hochschule München, München, 2019.
- [21] J. Bendixen, V. Stäudinger, und V. Stockinger, „Messtechnische Auswertung verschiedener Erdkollektorvarianten“, Bachelorarbeit, Hochschule München, München, 2017.
- [22] R. Zeh und V. Stockinger, „Monitoring of a large-scale geothermal collector system and a 5GDHC in Bad Nauheim“, gehalten auf der European Geothermal Congress 2022, Berlin, Okt. 2022.
- [23] V. Stäudinger, W. Jensch, und V. Stockinger, „ErdEis - Erdeisspeicher und Oberflächennahe Geothermie“, Mai 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/334988393>
- [24] B. Ohlsen u. a., *Abschlussbericht ErdEis II - Erdeisspeicher und oberflächennahe Geothermie*, 1. Auflage. Nürnberg, 2023. doi: 10.13140/RG.2.2.19555.32808.
- [25] „Wohnungsstationen mit elektrischer Nacherwärmung: WSP | WSG-Duo-2“, Holzminden, 2017.
- [26] Umweltbundesamt, Hrsg., „Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2023 (in Gramm pro Kilowattstunde) [Graph]“. 27. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>
- [27] K. W. Bonfig, Hrsg., *Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung: mit 12 Tabellen*. in Die Meß- und Automatisierungspraxis, no. 1. Renningen-Malmsheim: expert-Verl, 1996.
- [28] *Elektrosicherheit quantitative Bewertungsverfahren - Vertiefungsband: angewandte subjektive Bewertungsverfahren mit Applikationsbeispielen aus der elektrischen Energie- und Gerätetechnik*. Leipzig: Siegfried Altmann, 2016.
- [29] P. Werner, „Erarbeitung von Regelstrategien für die Nutzung des geothermischen Potenzials unter überbauten Flächen am Beispiel des Forschungsvorhabens +EQ-Net II“, Technische Hochschule Nürnberg, Nürnberg, Masterarbeit, 2023.
- [30] „ESBE Regelventil Serie VLA100“, ESBE |. Zugriffen: 15. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.esbe.eu/de/produkte/lineare-ventile/vla100>
- [31] „ESBE Stellmotor Serie ALFxx4 (24 V)“, ESBE |. Zugriffen: 15. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://esbe.eu/de/produkte/lineare-stellmotoren/alfxx4>
- [32] Hahn, (2023) Hahn, Jakob: Nutzerfokussierte Betriebsoptimierung von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen (Dissertation in Vorbereitung), Lehrstuhl für Nachhaltiges Bauen und Planen, School of Engineering and Design, Technische Universität München 2023.
- [33] J.C. Dietrich-Rust, J. Hahn, W. Jensch, et. al., "Plus-EQ-Net Netzneutrales Wohn- und Geschäftshaus pulsG in Geretsried", Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2314/KXP:1811821707>

## Liste der verwendeten Abkürzungen

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| ASM   | Assmann Beraten + Planen GmbH       |
| AWRGA | Abluftwärmerückgewinnungsanlage     |
| AZ    | Arbeitszahl                         |
| BHKW  | Blockheizkraftwerk                  |
| DIN   | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| DLH   | Durchlauferhitzer                   |
| EREA  | EREA GmbH & Co. KG                  |
| EWK   | Erdwärmekollektor                   |
| FMI   | Functional Mock-up Interface        |
| GKA   | Großkollektoranlage                 |
| HM    | Hochschule München                  |
| MQTT  | Message Queuing Telemetry Transport |
| PtJ   | Projektträger Jülich GmbH           |
| PV    | Photovoltaik                        |
| RL    | Rücklauf                            |
| THN   | Technische Hochschule Nürnberg      |
| VDI   | Verein Deutscher Ingenieur e.V.     |
| VL    | Vorlauf                             |
| VT    | Vollsortimenter                     |
| WMZ   | Wärmemengenzähler                   |
| WP    | Wärmepumpe                          |