

# **Bestandsanalyse und Optimierungsmöglichkeiten für das experimentelle Heizungssystem am Technologiezentrum Energie-Campus Hamburg**

**Bachelorthesis**

im Studiengang Umwelttechnik

eingereicht von

**Olessya Kozlenko**

Hamburg, den 3. April 2018

1. Gutachter

**Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers**

2. Gutachter

**Dipl.-Ing. (FH) Bastian Hey M. Eng**

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit eigenständig angefertigt und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Hamburg, 3. April 2018

---

*Ort, Datum*

---

*Unterschrift*

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Professor Hans Schäfers und Herrn Bastian Hey für die großartige Unterstützung und Betreuung bei der Bachelorarbeit bedanken.

Herrn Professor Hans Schäfers danke ich für die Unterstützung bei der strategischen Planung dieser Arbeit, welche mich zu Beginn meiner Arbeit in die richtige Richtung geleitet hat.

Bei Herrn Bastian Hey möchte ich mich für seine Hilfsbereitschaft und ständige Betreuung sowie den wertvollen Ratschlägen, welche mich bei der Erstellung deutlich vorangebracht haben, bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Sebastian Farrenkopf und Herrn Andre Jessulat sowie an das gesamte C4DSI Team für die Bereitschaft mir offene Fragen zu beantworten.

Ich danke auch meine Familie für die moralische Unterstützung sowie meinen Freunden und Mitbewohnern für die Hilfsbereitschaft meine Arbeit hinsichtlich der Rechtschreibung zu prüfen.

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	v
Tabellenverzeichnis .....	viii
Abkürzungen, Formelzeichen .....	ix
Einheiten .....	xi
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele und Grenzen .....	2
1.3 Vorgehensweise.....	2
1.4 Wissenschaftliche Methoden .....	3
2 Ist-Zustand des Heizungssystems.....	4
2.1 Energie-Campus: Ausrüstung.....	4
2.2 Heizungskonzept.....	5
2.3 Heizungskomponenten des Gebäudes .....	6
2.3.1 Blockheizkraftwerk .....	6
2.3.2 Wärmepumpe.....	8
2.3.3 Elektro-Heizstäbe.....	9
2.3.4 Thermische Bauteilaktivierung.....	10
2.3.5 Heizkörper .....	10
2.3.6 Deckenstrahlenplatten .....	11
2.3.7 Raumluftechnik .....	12
2.3.8 Wärmespeicher .....	13
2.3.9 Heizungsumwälzpumpen .....	13
2.4 Gebäudeautomation und Messtechnik .....	17
2.4.1 Gebäudeautomation .....	17
2.4.2 Messtechnik.....	19
2.5 Regelung des Heizungssystems .....	24
3 Wärmespeicherungssystem .....	29
3.1 Grundlagen: Wärmespeicher.....	29
3.1.1 Wärmespeicherklassifikation .....	29
3.1.2 Energieeffizienz der Pufferspeicher .....	31
3.2 Grundlagen der Wärmeübertragung.....	34

3.3	Bildung der Temperaturschichtung .....	39
3.4	Temperaturverteilung in der realen Speicheranlage .....	43
4	Überprüfung verschiedener Schaltmöglichkeiten des Wärmespeicherungssystems .	52
4.1	Parallelschaltung.....	54
4.1.1	Versuchsvorbereitung .....	55
4.1.2	Versuchsergebnisse .....	56
4.2	Reihenschaltung.....	60
4.2.1	Versuchsvorbereitung .....	61
4.2.2	Versuchsergebnisse .....	63
4.3	Stabiler Betrieb .....	65
5	Verbesserungen für das Wärmespeicherungssystem .....	67
5.1	Parametrierung des Durchflussmessers .....	67
5.2	Hydraulischer Abgleich der Wärmespeicheranlage .....	69
6	Zusammenfassung.....	76
	Literaturverzeichnis .....	xii

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energie-Campus Ausrüstung (eigene Darstellung) .....	4
Abbildung 2: Das hydraulische Schema des BHKW der Firma Kraftwerk [5] .....	7
Abbildung 3: Das allgemeine Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [7] .....	8
Abbildung 4: Pumpen- und Anlagenkennlinie [16] .....	14
Abbildung 5: Pumpen-, Anlagenkennlinie nach AUTO <sub>ADAPT</sub> Regelung [17] .....	16
Abbildung 6: Gebäudeautomatisation Darstellung (eigene Darstellung) .....	17
Abbildung 7: Arbeitsprinzip eines Sensors .....	19
Abbildung 8: Temperaturfühler der Firma Oppermann Regelgeräte .....	19
Abbildung 9: Drucksensor der Thermokon Firma .....	20
Abbildung 100: Messumformer, Messaufnehmer, SENSORPROM-Speicherbaustein.....	21
Abbildung 11: Faradaysches Gesetz [25].....	22
Abbildung 12: Messprinzip des elektromagnetischen Durchflussmessers [26] .....	23
Abbildung 13: Heizkurve: Abhängigkeit der Vorlauftemperatur von der Außentemperatur [29].....	24
Abbildung 14: Rücklaufbeimischungsschema .....	25
Abbildung 15: Außentemperatur auf Nord- und Südseite.....	26
Abbildung 16: Vor- und Rücklauftemperatur, sowie Solltemperatur und Rücklaufvolumenstrom des OG-Heizkreises .....	26
Abbildung 17: Solltemperatur sowie Regelsollwert und Messwert der Beimischung beim OG-Heizkreis .....	26
Abbildung 18: Emissionsentwicklung beim Betrieb von Heizkesseln [31] .....	27
Abbildung 19: Querschnitt eines wärmegeprägten Speichers (eigene Darstellung) .....	
Abbildung 20: Energiebilanz einer Wärmespeicheranlage (eigene Darstellung) .....	33
Abbildung 21: Massenstrombilanz [36].....	37
Abbildung 22: Strömungen innerhalb des Speichers bei $m_B > m_L$ (eigene Darstellung) .	38
Abbildung 23: Strömungen innerhalb des Speichers bei $m_B < m_L$ (eigene Darstellung) .	38
Abbildung 24: Anschlüsse des Pufferspeichers [15].....	39
Abbildung 25: Systemanbindung (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 26: Strömungen innerhalb des Speichers (eigene Darstellung) .....	41
Abbildung 27: natürliche und erzwungene Konvektion (eigene Darstellung) .....	
Abbildung 28: Speicherschichttemperaturen und erzwungene Konvektion (eigene Darstellung) .....	44
Abbildung 29: Speicherschichttemperaturen [37] .....	45
Abbildung 30: Beladungsvolumenstrom vom BHKW .....	45
Abbildung 31: Entladungsvolumenstrom zum Heizverteiler .....	45
Abbildung 32: Vor- und Rücklauftemperatur sowie thermische Leistung des BHKW .....	46
Abbildung 33: Außentemperatur am Norden und am Süden .....	46

Abbildung 34: Solltemperatur und Regelsollwert des Beimischungsventils des EG Heizkreises .....	47
Abbildung 35: Solltemperatur und Regelsollwert des Beimischungsventils des OG Heizkreises .....	47
Abbildung 36: Solltemperatur und Regelsollwert des Beimischungsventils des BTA Heizkreises .....	47
Abbildung 37: Rücklauftemperaturen der Heizkreise .....	48
Abbildung 38: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Rücklaufvolumen der RLT .....	48
Abbildung 39: Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der RLT von der oberen Speichertemperatur .....	49
Abbildung 40: Abhängigkeit der unteren Speichertemperatur von der Rücklauftemperatur der RLT .....	49
Abbildung 41: Abhängigkeit der Speichertemperaturen von Rücklauftemperatur der RLT .....	50
Abbildung 42: Speichervolumen zwischen Temperatursensoren (eigene Darstellung) .....	
Abbildung 43: Speicherschichttemperaturen .....	51
Abbildung 44: Drehantrieb SR24A, 2-Wege- und 3-Wege-Regelkugelhahn der Firma Belimo .....	
Abbildung 45: 3-Wege-Kugelhahn Zustände (eigene Darstellung) .....	54
Abbildung 46: Parallelschaltungsschema (eigene Darstellung) .....	54
Abbildung 47: Beladungstemperaturen der drei Speicher und thermische Leistung des BHKW .....	56
Abbildung 48: Beladungsvolumenströme der drei Speicher und des BHKW .....	57
Abbildung 49: Speicher 4 Temperaturen und Anforderung.....	57
Abbildung 50: Speicher 5 Temperaturen und Anforderung.....	58
Abbildung 51: Speicher 6 Temperaturen und Anforderung.....	58
Abbildung 52: Entladungstemperaturen der drei Speicher .....	59
Abbildung 53: Thermische Leistung sowie Vor- und Rücklauftemperatur des BHKW .....	59
Abbildung 54: Beladungsvolumenstrom des Speichers 5 .....	60
Abbildung 55: Entladungsvolumenstrom des Speichers 5 .....	60
Abbildung 56: Reihenschaltungsschema (eigene Darstellung) .....	61
Abbildung 57: Speichertemperaturen der drei Speicher sowie Anforderung des Speichers 4 .....	63
Abbildung 58: Beladungsvolumenstrom des Speichers 6 .....	64
Abbildung 59: Entladungsvolumenstrom des Speichers 6.....	64
Abbildung 60: Temperaturen und Volumenströme in den Reihenschaltungsrohrleitungen .....	64
Abbildung 61: Darstellung der drei Speicher als ein großer Speicher durch Temperaturverteilung .....	65
Abbildung 62: Signalweg des Durchflussmessgeräts (eigene Darstellung) .....	67
Abbildung 63: Bidirektionaler und unidirektionaler Modus des Durchflussmessgerätes ..	68

Abbildung 64: Der Beladungsdurchfluss des Speichers 6 vor der Entlüftungsmaßnahme.	68
Abbildung 65: BHKW Beladungsvolumenstrom .....	72
Abbildung 66: Rohrleitungsstrecke der Berechnung des Druckabfalls (eigene Darstellung) .....	73



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systemdaten BHKW .....	7
Tabelle 2: Systemdaten Wärmepumpe .....	9
Tabelle 3: Systemdaten Elektro-Heizstäbe .....	9
Tabelle 4: Systemdaten BTA .....	10
Tabelle 5: Systemdaten Heizkörper .....	11
Tabelle 6: Systemdaten DSP .....	12
Tabelle 7: Systemdaten Erhitzer in der RLT-Anlage .....	13
Tabelle 8: Systemdaten Wärmespeicher .....	13
Tabelle 9: Vor- und Rücklauftemperatur des jeweiligen Verbrauchers entsprechend Hamburg Auslegungstemperatur .....	27
Tabelle 10: Bedeutung des Wertes der Ventileinstellung .....	53
Tabelle 11: Externe Steuerung bei der Parallelschaltung .....	55
Tabelle 12: Ventileinstellung bei der Parallelschaltung .....	55
Tabelle 13: Beladungsdauer der drei Speicher .....	58
Tabelle 14: Externe Steuerung bei der Reihenschaltung .....	62
Tabelle 15: Ventileinstellung bei der Reihenschaltung .....	62
Tabelle 16: Ventileinstellung beim Betrieb nur eines Speichers .....	66
Tabelle 17: Widerstandsbeiwerte der Formstücke und Armaturen sowie Abzweige innerhalb der Rohrleitung .....	71
Tabelle 18: Der Gesamtwiderstandsbeiwert der einzelnen Widerstände am jeden Streckenabschnitt .....	73
Tabelle 19: Parameter, die für jeden Streckenabschnitt gleich sind .....	74
Tabelle 20: Rohrreibungsdruckverlust, Druckverlust durch Einzelwiderstände sowie Gesamtdruckverlust jedes Streckenabschnittes .....	75
Tabelle 21: Druckverlust vom BHKW zum jeweiligen Speicher .....	75
Tabelle 22: Druckverlust vom BHKW zum jeweiligen Speicher mit Berücksichtigung der in der Zukunft eingesetzten Strangreguliertventile .....	75

## Abkürzungen, Formelzeichen

$\alpha_i$	Wärmeübergangswiderstand innen des Speichers
$\alpha_a$	Wärmeübergangswiderstand außen des Speichers
$A$	Fläche der Wärmeübertragung
$A_q$	Speicherquerschnittsfläche
$B$	Magnetfeld
$\vec{B}$	magnetische Flussdichte
BHKW	Blockheizkraftwerk
BTA	Bauteilaktivierung
$c$	Proportionalitätskonstante
$c_p$	spezifische Wärmekapazität
CH <sub>4</sub>	Methan
COP	Coefficient of Performance
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
C4DSI	Center for Demand Side Integration
$D$	Rohrdurchmesser
$d$	Speicherdurchmesser
$d_i$	Speicherinnendurchmesser
$d_a$	Speicheraußendurchmesser
$d_{isol.}$	Speicherdurchmesser mit Isolation
$d$	Rohrinnendurchmesser
DB	Datenbank
DDC	Direct-Digital-Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSP	Deckenstrahlplatten
$e$	mittlere Höhe der Rauigkeitserhebungen
$\vec{E}$	elektrische Feldstärke
$E$	Elastizität des Membranwerkstoffes
EG	Erdgeschoss
$\varepsilon$	relative Rauigkeit des Rohres
$\varepsilon_r$	Oberflächenradialdehnung
EnEV	Energieeinsparverordnung
GA	Gebäudeautomation
GLT	Gebäudeleittechnik
$h$	Höhe
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
ISO	International Organization for Standardization
$k$	Proportionalitätsfaktor
$l$	Länge
$\dot{m}_s$	speicherinterne Massenströme
$\dot{m}_{oben}$	Massenstrom durch obere Speicherschicht
$\dot{m}_{mitte}$	Massenstrom durch mittlere Speicherschicht
$\dot{m}_{unten}$	Massenstrom durch untere Speicherschicht

$\dot{m}_B$	Vorlaufmassenstrom vom BHKW
$\dot{m}_L$	Rücklaufmassenstrom zum Verbraucher
OG	Obergeschoss
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
$\rho$	Dichte des Mediums
$\Delta p_{ges}$	Gesamtdruckabfall
$\Delta p_R$	Druckverlust durch Rohrreibung
$\Delta p_E$	Druckverlust durch Einzelwiderstände
$\Delta p_{dyn}$	dynamische Druck
PV	Photovoltaik
Q	Förderstrom
$\vec{q}$	Wärmestromdichte-Vektor
Q	Wärmemenge
$\dot{Q}_f$	freie Konvektion
$Q_B$	die vom BHKW zugeführte Wärmemenge
$Q_L$	die zum Verbraucher abgeführte Wärmemenge
$Q_V$	Wärmeverlust
r	Membranradius
r	innerer Rohrhalbmesser
R	Druckverlust
Re	Reynoldzahl
RLT	Raumlufttechnik
t	Zeit
t	Membrandicke
$T_o$	Temperatur der oberen Schicht
$T_m$	Temperatur der mittleren Schicht
$T_u$	Temperatur der unteren Schicht
$T_{RL}$	Vorlauftemperatur
$T_{VL}$	Rücklauftemperatur
$T_i$	Innentemperatur des Speichermediums
$T_a$	Außentemperatur der Umgebung
U	Wärmedurchgangkoeffizient
$\dot{V}_L$	Volumenstrom des Heizverteilers
$\nu$	Strömungsgeschwindigkeit
$\vartheta$	kinematische Viskosität
$\vartheta_V$	Vorlauftemperatur
$\vartheta_a$	Außentemperatur
WP	Wärmepumpe
z	Schichthöhe
$\lambda$	Rohrreibungswert
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{eff}$	effektive Wärmeleitung
$\lambda_{isol}$	Wärmeleitfähigkeit der Isolation
$\zeta$	Widerstandsbeiwert

## Einheiten

°C	Grad Celsius
h	Stunde
J	Joul
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
l	Liter
m	Meter
mA	Milliampere
mm	Millimeter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
Pa	Pascal
V	Volt
W	Watt

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Im November 2016 hat die Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050 beschlossen. Unter dem Klimaschutzplan 2050 wird eine Langfriststrategie mit dem Ziel bezeichnet, die Energieerzeugung bis 2050 treibhausgasneutral und nahezu ohne Kohle zu realisieren. Was seinerseits bedeutet, dass alle Sektoren auf alternative Kraftstoffe umgestellt werden sollen. Es wird erwartet, schon bis 2030 den Treibhausgasausstoß um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken. [1]

In diesem Zusammenhang hat die Nordregion Deutschland sich auch ein vielversprechendes Ziel gesetzt, bis 2035 in Rahmen des Initiativprojekts „NEW 4.0“, wobei „NEW“ die Norddeutsche Energiewende und „4.0“ die vierte industrielle Revolution bedeutet, die Gesamtregion von Hamburg und Schleswig-Holstein mit dem sicheren, kostengünstigen, umweltverträglichen sowie gesellschaftlich akzeptierten regenerativen Strom zu versorgen. Die Stromerzeugung soll dann zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energien beruhen. [2] Für die Erreichung dieses Ziels muss der Prozess der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs möglichst effizient sein. Stabilität mit erneuerbaren Energien ist schwierig zu erreichen, da beispielsweise bei Sonnenschein oder starkem Wind zeitweise mehr Strom produziert wird als verbraucht werden kann und umgekehrt. Deswegen ist es erforderlich, den Energieverbrauch zu jedem Zeitpunkt an die Erzeugung anzupassen, sowie die erneuerbaren Energien vollständig in ein innovatives nachhaltiges Energiesystem zu integrieren. So entsteht eine große Herausforderung: die Entwicklung einer optimalen Steuerung des Energiesystems durch eine intelligente Verbindung von Erzeugern und Verbrauchern, sowie auch die Speicherung der überschüssigen, erneuerbar erzeugten Energie. [2]

Verschiedene potenzielle Lösungen für die Energiewende im Norden untersucht das „Center for Demand Side Integration“ – C4DSI. Das Team des C4DSI arbeitet am Technologiezentrum Energie-Campus in Hamburg und führt dort Forschungsarbeiten durch. Der Energie-Campus dient zu den Forschungszwecken und ist mit Wind- und Smart-Grid-Laboren ausgerüstet. Hier werden fast alle Netzkomponenten unter einem Dach

vereint. Das Konzept sowie die Besonderheit des Energie-Campus besteht darin, dass der Forschungsbetrieb in die Infrastruktur der Gebäudeversorgung integriert ist, was erlaubt, die Versuche unter realen Bedingungen durchzuführen. Außerdem ist die Energieversorgung am Energie-Campus sehr flexibel und kann individuell angepasst werden um auf äußere Einflüsse wie die Stromnetzsituation oder Strommarktpreise reagieren zu können. [3] Ein Beispiel solcher Flexibilität ist das Wärmespeicherungssystem am Energie-Campus.

### **1.2 Ziele und Grenzen**

Der Hauptfokus dieser Arbeit ist die Validierung der Umsetzung des experimentellen Heizungssystems am Energie-Campus. Die erste Aufgabe ist eine Bestandsanalyse des ganzen Heizungssystems durchzuführen. Bei der Bestandsaufnahme werden nur diese Anlagentechnik, Energieerzeuger und -verbraucher berücksichtigt, die eine unmittelbare Beziehung zur Heizung haben. Weitere Aufgaben sind die Untersuchung des Wärmespeicherungssystems sowie die Prüfung der Schaltungsmöglichkeiten der Wärmespeicher. In Rahmen dieser Arbeit werden Parallel- sowie Reihenschaltungen der Pufferspeicher untersucht, um danach eine höhere Wärmeentkopplung für eine flexible Systemsteuerung zu erreichen, sowie um die Anlagen für weitere Forschungsarbeiten optimal nutzen zu können. Ein Nebenziel dieser Arbeit ist es, eine stabile Verschaltung der Pufferspeicher zu erreichen, die als Standardschaltung den Grundzustand des Systems darstellt.

### **1.3 Vorgehensweise**

Zunächst werden alle für die Arbeit benötigten Daten erfasst. Für die Darstellung der Bestandsanalyse des gesamten Heizungssystems des Gebäudes werden als Quellen Anlagenschemen sowie die Anlagenbetriebsanleitungen genutzt. Anschließend werden Versuche mit dem Wärmespeicherungssystem durchgeführt. Anhand verschiedener Instrumente werden die Ergebnisse der Versuche in grafischer Form dargestellt und ausgewertet. Auf diese Weise wird der Ist-Zustand des Wärmespeicherungssystems erfasst und Optimierungen für verschiedene Schaltungsmöglichkeiten empfohlen.

## **1.4 Wissenschaftliche Methoden**

In Rahmen dieser Bachelorarbeit werden sowohl theoretische als auch empirische wissenschaftliche Methoden genutzt. Als theoretische wissenschaftliche Methode wird für diese Arbeit Fachliteratur genutzt, um am Anfang einen tieferen Einblick in Ausrüstung sowie Funktionalität der aktuellen Anlagen zu bekommen. Zusätzlich werden auch verschiedene Normen und Handbücher als Basis für die Berechnungen genutzt. Bei empirischen Forschungen wurden Versuche mit realer Wärmespeicheranlage durchgeführt.

## 2 Ist-Zustand des Heizungssystems

### 2.1 Energie-Campus: Ausrüstung

Das Forschungsbetrieb am Energie-Campus ist komplett in die Gebäudeinfrastruktur integriert. Hier befinden sich verschiedene Energieerzeuger sowie -verbraucher.

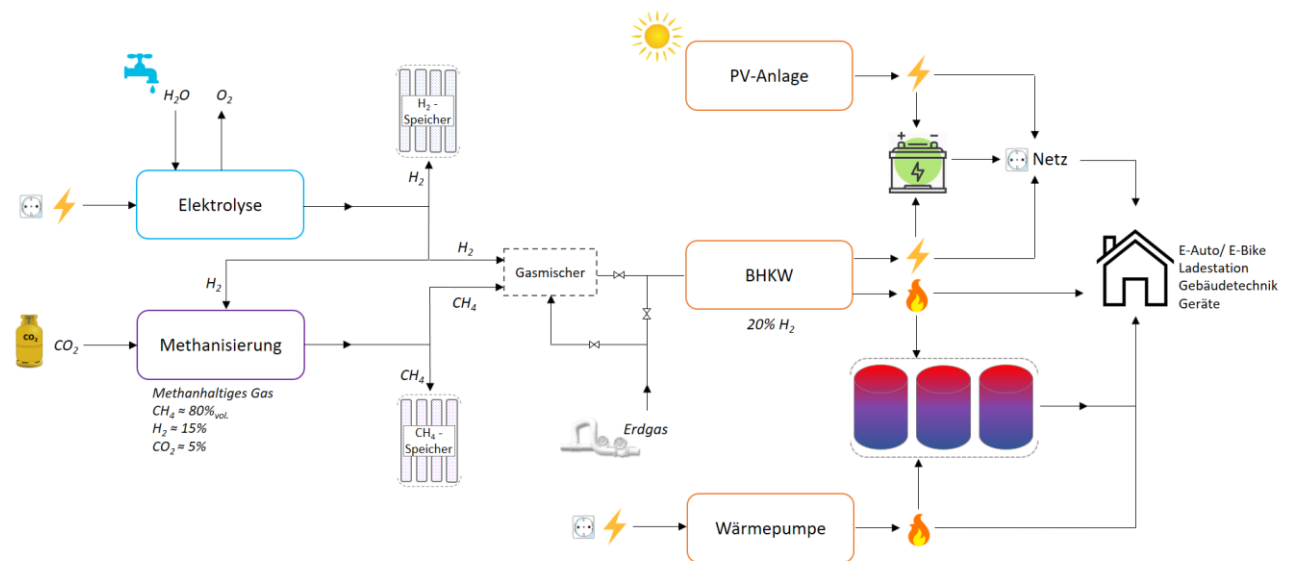


Abbildung 1: Energie-Campus Ausrüstung (eigene Darstellung)

Die Stromerzeugung erfolgt über eine Photovoltaik-Anlage und ein Blockheizkraftwerk (BHKW). Der erzeugte Strom wird in die Niederspannungsverteilung eingespeist. Die Wärme wird entweder über das BHKW als Nebenprodukt der Stromerzeugung oder über eine reversible Wärmepumpe gewonnen. Die Betriebsweise der Wärmeerzeugung ist abhängig vom aktuellen Versuchsszenario. Die verschiedenen Versuchsszenarien berücksichtigen unterschiedliche Faktoren, wie beispielsweise Regelleistung, Strompreise, Verteilnetzsituation oder lokale Energiesituation im Gebäude. Generell lassen sich bei allen Szenarien Situationen mit Strommangel oder Stromüberschuss feststellen. Im Falle eines Strommangels bzw. -bedarfs wird das BHKW angetrieben und bei einem Stromüberschuss wird Elektroenergie zur Wärmepumpe zugeführt und Wärme erzeugt.

Als Brennstoff für das BHKW wird entweder Erdgas oder eine Vorort hergestellte Gasmischung genutzt. In einer biologischen Methanisierungsanlage wird ein methanhaltiges Gas mithilfe von Bakterien aus Wasserstoff und Kohlendioxid gewonnen,



da die gewonnene Methanmenge zu gering ist, wird sie dem Erdgas aus dem Gasnetz in einem Gasmischer beigemischt. Der Wasserstoff wird in einem Elektrolyseur gewonnen und kann wahlweise in einem Druckgasflaschenbündel zwischengespeichert werden oder auch dem Erdgaszustrom des BHKW variabel beigemischt werden, da das BHKW mit einem Wasserstoffanteil von bis zu 20% betrieben werden kann. Darüber hinaus wird der Wasserstoff der Methanisierungsanlage zugeführt. Das Kohlenstoffdioxid für die Methangewinnung wird zukünftig aus der Atmosphäre gewonnen, derzeit wird es aber aus Gasflaschen geliefert. [3]

Wie oben erwähnt, ist die Synchronisation der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs eine herausfordernde Aufgabe. Am Energie-Campus wird versucht, durch Integration von Energiespeicherungssystemen ein flexibles Energiesystem zu erhalten und dieses an die Stromsituation anzupassen. Außer den Wasserstoff- und Methan-Speichern gibt es ein Batteriespeicher für die Speicherung des Stromüberangebots sowie ein Wärmespeicherungssystem. Das Wärmespeicherungssystem besteht aus einem Kaltwasserspeicher und drei Warmwasserspeichern. Letztere sind vollkommen in das aktuelle Heizungssystem integriert.

Am Energie-Campus befinden sich neben Laboren auch Konferenz- und Büroräume, deswegen muss das experimentelle Heizungssystem auch ein bestimmtes angenehmes Raumklima zur Verfügung stellen und rechtlichen Anforderungen entsprechen.

## **2.2 Heizungskonzept**

Am Energie-Campus wird als primärer Wärmeerzeuger das BHKW verwendet. Die Wärmepumpe wird maßgeblich zu Forschungszwecken eingesetzt. Das Gebäude kann auch direkt mit Elektroenergie durch in die Wärmespeicher montierte Heizstäbe geheizt werden, die auch zu einer Notversorgung dienen.

Die Grundtemperierung des Gebäudes erfolgt über eine Bauteilaktivierung (BTA), die im Sommer auch zur Kühlung genutzt wird. Über die BTA wird ein Konferenzraum, alle Büroräume sowie die sonstigen Aufenthaltsräume temperiert. In den Büro- und Konferenzräumen, sowie den WC-Anlagen und der Teeküche sind zusätzlich Heizkörper

installiert. Für die Temperierung der zweigeschossigen Technikhalle, die auch als Veranstaltungshalle genutzt wird, dienen Deckenstrahlplatten. Die raumluftechnische Anlage versorgt das Gebäude mit frischer Luft, die abhängig von der Jahreszeit entweder erwärmt oder gekühlt wird. Für eine Wärmeentkopplung stehen am Energie-Campus drei Warmwasserspeicher mit einem Gesamtvolumen von etwa 3.000 Litern zur Verfügung. Um eine sichere Zirkulation des Heizwassers zu erlauben sowie die Widerstände in den Rohrleitungen zu überwinden, werden in der Heizungsanlage Umwälzpumpen eingesetzt. Im folgenden Kapitelabschnitt werden alle Heizungskomponente detailliert beschrieben.

## **2.3 Heizungskomponenten des Gebäudes**

### **2.3.1 Blockheizkraftwerk**

Das Hauptelement des Heizungssystems des Energie-Campus ist das BHKW Mephisto 16+ der Firma Kraftwerk, das aus einem 4-Zylinder-Ottoverbrennungsmotor und einem Synchrongenerator besteht. Zunächst wird die Brennstoffenergie im Verbrennungsmotor in Wärme und mechanische Energie umgewandelt. Der Verbrennungsmotor treibt anschließend den Synchrongenerator an, wodurch die mechanische Energie in Strom umgewandelt wird. Die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme wird anhand von vier Wärmetauschern für die Heizwasseraufbereitung genutzt. Im BHKW befinden sich zwei Wasserkreise. [4] Der erste Wasserkreis kühlt das Abgassammelrohr und den Motor durch einen Ölkühler ab. Der zweite Wasserkreis ist Teil des Heizwasserkreislaufs der Heizungssystems. Der Heizungsrücklauf kühlt den Generator ab und dann wird durch den Brennwärmetauscher mit integrierten Katalysator und den Plattenwärmetauscher des Motorwasserkreislaufs erhitzt und wieder zum Heizkreis zugeführt.

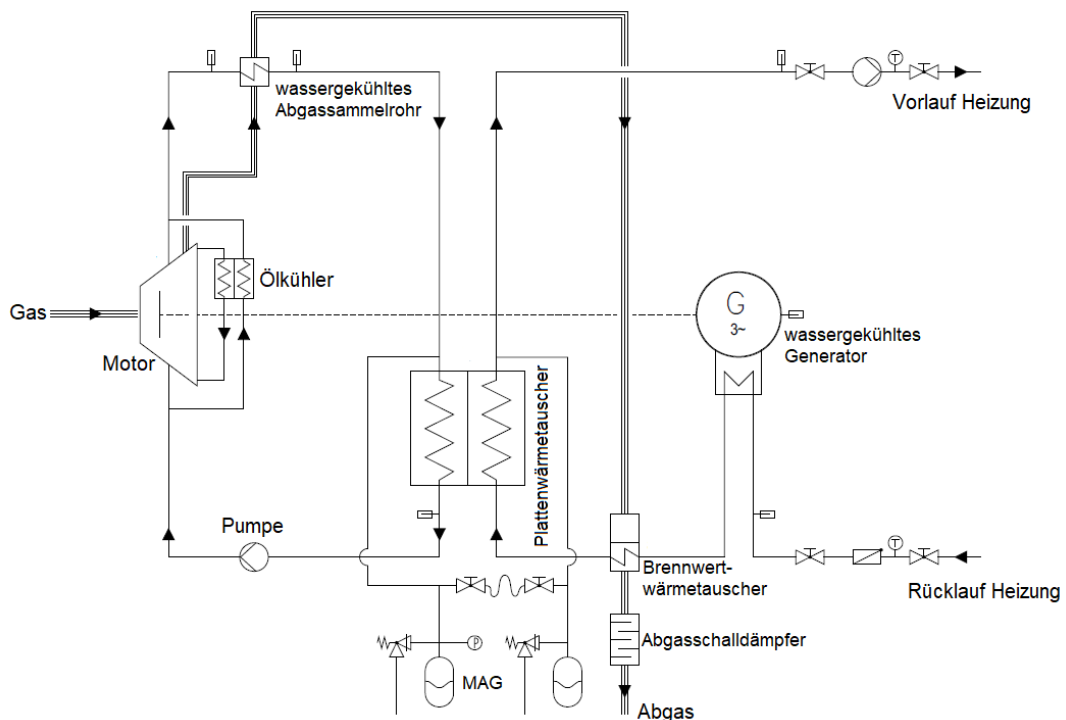


Abbildung 2: Das hydraulische Schema des BHKW der Firma Kraftwerk [5]

Das BHKW wird mit Erdgas der Gruppe H betrieben und hat folgende regelbare Leistungen: die elektrische Leistung liegt bei 5 bis 16 kW, die thermische Leistung beträgt von 19 bis 35,5 kW und die Gasleistung variiert von 23 bis 50,8 kW<sub>Hi</sub>. Bei einer Rücklauftemperatur von 35°C hat das BHKW einen Gesamtwirkungsgrad von 101%. [5]

Die BHKW Heizungsanbindung hat einen zulässigen Vorlauftemperaturgrenzwert von 90°C und eine Rücklauftemperatur von 70°C. Alle Parameter des BHKW lassen sich in folgender Tabelle zusammenfassen.

Tabelle 1: Systemdaten BHKW [5]

Parameter	Wert
Firma	Kraftwerk
Modell	Mephisto 16+
Elektrische Leistung	5 – 16 kW
Thermische Leistung	19 – 35,5 kW
Gasleistung	23 – 50,8 kW <sub>Hi</sub>
Gesamtwirkungsgrad bei T <sub>RL</sub> =35°C	101%
Vorlauftemperaturgrenzwert	90°C
Rücklauftemperaturgrenzwert	70°C

### 2.3.2 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe kann sowohl zur Heizung als auch zur Klimatisierung dienen. Da der Energie-Campus sich in einem Wasserschutzgebiet befindet, wird hier eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe der Firma Smart Heat eingesetzt. Die im Erdreich enthaltene Wärme wird mithilfe der Wärmepumpe auf das Heizwasser übertragen. Bei der Wasser-Wasser-Wärmepumpe zirkuliert auf Erdreichseite Wasser. Innerhalb der Wärmepumpe wird ein Kältemittel als Wärmeträgermedium benutzt und in der Heizanlage erfüllt die Wärmetransportfunktion das Heizwasser. Die Wärmepumpe besteht aus zwei Wärmetauschern, dem Verdampfer und dem Verflüssiger, sowie aus einem Verdichter und einem Entspanner. Im Verdampfer wird die Erdwärme auf das Kältemittel übertragen, welches dort verdampft wird. Der Kältemitteldampf wird danach zu dem Verdichter weitergeleitet und dort auf ein höheres Temperaturniveau gehoben. In dem Verflüssiger kondensiert das heiße komprimierte Kältemittelgas, wobei es die Wärme an das Heizwasser abgibt. Das verflüssigte Kältemittel wird zu einem Entspanner geleitet und auf ein niedriges Druckniveau entspannt. Abschließend wird das gekühlte Kältemittel wieder zum Verdampfer geführt (siehe Abb. 3). [6]

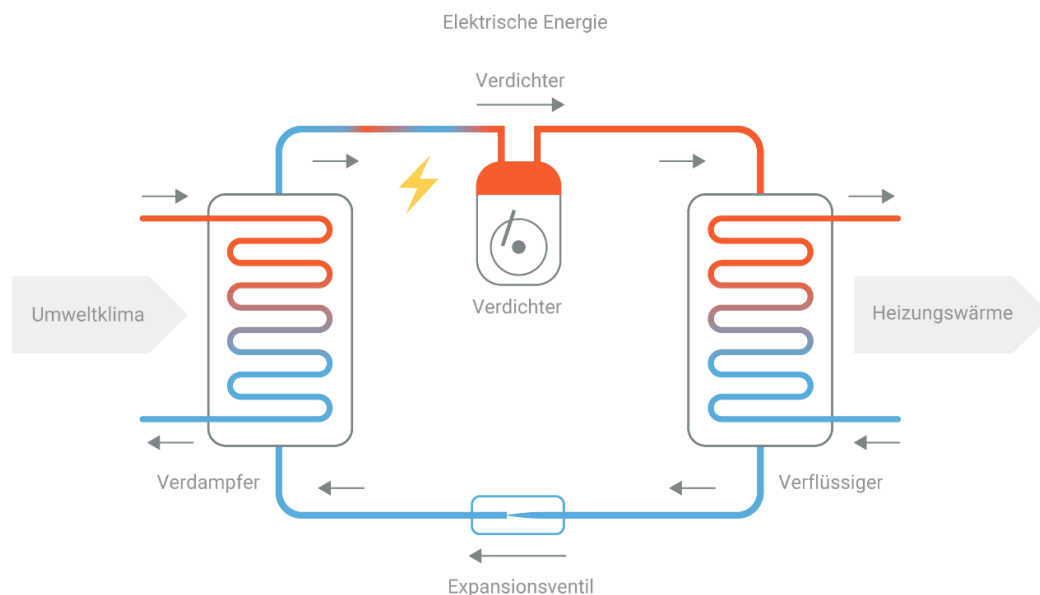


Abbildung 3: Das allgemeine Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [7]

Die Wärmepumpe am Energie-Campus verfügt über eine Heizleistung von 2,48 – 10,13 kW. Im Vergleich zum BHKW kann die Wärmepumpe keinen hohen Wärmebedarf decken, da

sie bei einem niedrigen Temperaturniveau operiert. Maximale Vorlauftemperatur beträgt 60°C. [8]

Tabelle 2: Systemdaten Wärmepumpe

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Smart Heat
Modell	classic 010 WWi R
Ausführung	Wasser / Wasser
Kältemittel / GWP <sub>(100)</sub>	R410A / 2088
Heizleistung	2,48 – 10,13 kW
Max. Vorlauftemperatur	60°C
COP (Leistungszahl)	6,17
zusätzliche Merkmale	reversibel

### 2.3.3 Elektro-Heizstäbe

Am Energie-Campus wurde pro Wärmespeicher ein Elektro-Heizstab der Firma Solar Profi integriert. Jeder Heizstab verfügt über eine Leistung von 8 kW. Bei der Wärmeerzeugung durch Elektro-Heizstäbe wird das Prinzip der Widerstandheizung angewendet. Als ein Elektro-Heizstab wird ein Metalldraht aus einem leitfähigen Material mit einem niedrigen elektrischen Widerstand genutzt. Wenn der Strom durch diesen Metalldraht fließt, wird er dadurch erhitzt. Die erhitzten Elektro-Heizstäbe erwärmen das Wasser in den Speichern. Dabei wird die elektrische Energie direkt in thermische Energie umgewandelt. Üblicherweise werden die Elektro-Heizstäbe nur bei einem Stromüberangebot oder beim Ausfall der anderen Wärmeerzeuger verwendet. Die Elektro-Heizstäbe am Energie-Campus sind regelbar und verfügen über drei Leistungsstufen.

Tabelle 3: Systemdaten Elektro-Heizstäbe [9]

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Solar Profi
Modell	EH 8000
Thermische Leistung	8 kW
Leistungsstufen	3
Spannungsanschluss	400 V

### 2.3.4 Thermische Bauteilaktivierung

Am Energie-Campus wird für die Flächenheizung die Bauteilaktivierungsanlage Rautherm S der Firma Rehau eingesetzt. Eine thermische Bauteilaktivierung (BTA) oder Betonkernaktivierung ist ein Bestandteil des Heizsystems, dessen wasserführenden Rohrleitungen in Decken, Böden oder Wänden verlegt werden, was ermöglicht es die Eigenschaft des Betons zu nutzen. Der Beton kann als eine Speichermasse genutzt werden, die die Wärme vom Warmwasser aufnimmt und dann mit einer Zeitverschiebung an die Umgebung abgibt. Mithilfe dieser Wärmespeicherungseigenschaft können die ins System zugeführte Wassertemperaturen relativ niedrig sein. Im Sommer wird die BTA auch zur Kühlung genutzt. [10]

Die maximale Vorlauftemperatur der BTA-Anlage am Energie-Campus beträgt 50°C. Der Temperaturgrenzwert wird nach DIN 1264 (Norm für die Regelung zu Flächenheizungs- und Flächenkühlungssystem) berechnet. Es ist sehr wichtig, den Temperaturgrenzwert nicht zu überschreiten, weil zu hohe Temperaturen dem Bodenbelag und dem Estrich schaden können. [11]

Tabelle 4: Systemdaten BTA

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Rehau
Modell	Rautherm S
Vorlauftemperaturgrenzwert	50°C
aktivierte Fläche EG	ca. 155 m <sup>2</sup>
aktivierte Fläche OG	ca. 260 m <sup>2</sup>
Gesamte aktivierte Fläche	ca. 415 m <sup>2</sup>

### 2.3.5 Heizkörper

Am Energie-Campus werden insgesamt 27 Flachheizkörper Therm X2 der Firma Kermi eingesetzt. Die Heizkörper dienen zur Beheizung der Räume und im Vergleich zur BTA lassen sich schnell aufheizen und schnell abkühlen. In der Regel bestehen Flach- bzw. Plattenheizkörper aus mehreren senkrecht gestellten Platten, die mit Metallstreben verbunden sind, und einem dazwischenliegenden Konvektionsblech. In den Platten

zirkuliert das Wasser und erwärmt die Luft in der Konvektionsfläche. Die erwärmte Luft steigt nach oben, während die kalte Luft infolge des Konvektionseffekts zum Heizkörper von unten strömt. Die Flachheizkörper werden häufig mit einer Typennummer gekennzeichnet, beispielweise Typ 22. Die erste Ziffer gibt an, wie viel Platten im Flachheizkörper vorhanden sind, und die zweite Ziffer steht für die Anzahl der Konvektionsfläche in diesem Flachheizkörper. [12]

Am Energie-Campus werden Flachheizkörper der Typen 10, 11, 12, 22 und 33 installiert. Die Flachheizkörper eines Typs können jedoch über verschiedene Größenabmessungen verfügen. Im BHKW/WP Raum sowie im Methanisierung/Elektrolyse Raum sind senkrechte Flachheizkörper eingesetzt. Für alle Flachheizkörper der Firma Kermi gilt ein maximaler Vorlauftemperaturwert von 110°C.

Tabelle 5: Systemdaten Heizkörper

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Kermi
Modell	Therm X2
Maximale Vorlauftemperatur	110°C
Typ 10	3 Heizkörper
Typ 11	2 Heizkörper
Typ 12	9 Heizkörper
Typ 22	8 Heizkörper
Typ 33	5 Heizkörper

### 2.3.6 Deckenstrahlenplatten

In der Technikhalle am Energie-Campus wurden sechs Deckenstrahlplatten (DSP) der Firma Best installiert. Die Deckenstrahlplatten sind eine Form von Flächenheizung und werden an der Decke angebaut. Deckenstrahlplatten werden aus Stahlblech und innen liegenden verschweißten Präzisionsrohren gefertigt. Zur Minimierung der Wärmeverluste nach oben wird eine 40 mm dicke Wärmedämmung werkseitig eingelegt. Gesamtlänge einer einzelnen Deckenstrahlplatte beträgt 6 m. [13]

Jede Deckenstrahlplatte am Energie-Campus verfügt über sechs Rohre, die einseitig zur Warmwasserheizungsanlage angeschlossen sind. Die Auslegungswärmeleistung der Anlage hängt von der Temperaturdifferenz ab. [13]

$$\Delta T = T_M - T_{RL}$$
$$T_M = \frac{(T_{VL} + T_{RL})}{2}$$

$T_M$  = Durchschnittliche Temperatur [K];

$T_{RL}$  = Vorlauftemperatur [K];

$T_{VL}$  = Rücklauftemperatur [K].

Tabelle 6: Systemdaten DSP

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Best
Modell	Typ DSP mini 900-6
Mindest-Heizmittelstrom	405 kg/h
Auslegungswärmeleistung bei $\Delta T=20 - 55$ K	149 - 478 W/m
Installierte Länge	36 m

### 2.3.7 Raumluftechnik

Eine raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) dient zur Lüftung sowie Klimatisierung der Gebäuderäume. RLT-Anlage saugt die verbrauchte Luft aus den Gebäuderäumen ab und führt gefilterte Frischluft von außen zu. [14] Am Energie-Campus wird eine RLT-Anlage der Firma Howatherm installiert, die mit einer Wärmerückgewinnung von etwa 75% funktioniert. Die Wärmerückgewinnung erfolgt durch einen Kreuzstromwärmetauscher. Bevor die verbrauchte Luft nach draußen geströmt wird, erwärmt sie die kalte frische zugeführte Luft. In diesem Sinne kann die RLT-Anlage als Energieerzeuger bezeichnet werden, trotzdem gilt sie als Heizungsverbraucher am Energie-Campus. In kalten Jahreszeiten erreicht die zugeführte Luft durch Wärmerückgewinnung keinen Temperatursollwert und kann umgekehrt große Wärmeverluste verursachen. Deswegen wird die Luft durch einen zusätzlichen Erhitzer noch erwärmt. Der Erhitzer besitzt eine thermische Leistung von 12 kW und hat maximale Wasservorlauftemperatur von 70°C und Rücklauftemperatur von 50°C.



Tabelle 7: Systemdaten Erhitzer in der RLT-Anlage

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Howatherm
Leistung	12 kW
Lufteintritt	14°C
Luftaustritt	22°C
Wasservorlauftemperatur	70°C
Wasserrücklauftemperatur	50°C

### 2.3.8 Wärmespeicher

Um die Wärmeerzeugung vom Wärmebedarf entkoppeln zu können, werden zwischen den Wärmeerzeugern und -verbrauchern Wärmespeicher installiert. Am Energie-Campus werden drei Wärmespeicher der Firma Unitec mit einem gesamtem Nennvolumen von 2.838 Litern eingesetzt, die die Wärmeenergie in Form von Warmwasser speichern. Nach Herstellerangaben liegt die Speichertemperatur im Temperaturbereich von 50°C bis 109°C. Außen sind die Wärmespeicher grundiert und innen sind sie unbehandelt. Für die Isolation wird 100 mm Polyesterfaservlies verwendet. Die Wärmespeicher sind mit diversen Temperaturfühleranschlüssen für eine individuelle Einstellung der Temperaturregung sowie mit Systemanschlüssen ausgerüstet. Zwei Wärmespeicher werden mit fünf Systemanschlüssen ausgestattet, und ein Wärmespeicher hat noch einen zusätzlichen Anschluss für die Einspeisung der Wärmepumpe. [15]

Tabelle 8: Systemdaten Wärmespeicher

<i>Parameter</i>	<i>Wert</i>
Firma	Unitec
Modell	Individuell erstellt
Volumen jedes Speichers	946 Liter
Betriebstemperaturen	50°C - 109°C

### 2.3.9 Heizungsumwälzpumpen

Eine Heizungsumwälzpumpe dient zur Förderung des erwärmten Wassers vom Wärmeerzeuger zu den Heizungskomponenten. Am Energie-Campus werden elektronisch-drehzahlgeregelte Heizungsumwälzpumpen des Modells Magna 32-60 und Magna 3 der

Firma Grundfos installiert. Die Magna 32-60 Umwälzpumpe dient zur Förderung des Heizwassers vom BHKW zu den Wärmespeichern. Die Magna 3 Umwälzpumpen werden in den Heizkreisen eingesetzt.

Die Umwälzpumpe fördert den bestimmten Wasserstrom infolge der Druckerhöhung. Die Druckerhöhung wird als Pumpenförderhöhe bezeichnet. Dabei sind die Förderhöhe der Pumpe und der durch die Pumpe fließende Förderstrom voneinander abhängig. Diese Abhängigkeit stellt eine Pumpenkennlinie dar (siehe Abb.4). [16]

Die Rohrnetz- oder Anlagenkennlinie stellt den Förderdruckbedarf der Anlage bei einem bestimmten Volumenstrom dar. Der innere Reibungswiderstand in Rohren verursacht einen Druckverlust des geförderten Mediums, der vom lichten Rohrquerschnitt, der Rauigkeit der Rohrwand sowie Widerstände der vorhandenen Armaturen abhängig ist. Außerdem hängt der Druckverlust von der Temperatur und Eigenschaften des Wassers sowie von seiner Strömungsgeschwindigkeit ab. Der Pumpendruck dient zur Überwindung dieser Widerstände. Ein Betriebspunkt ist der Schnittpunkt zwischen der Pumpenkennlinie und der Anlagenkennlinie.

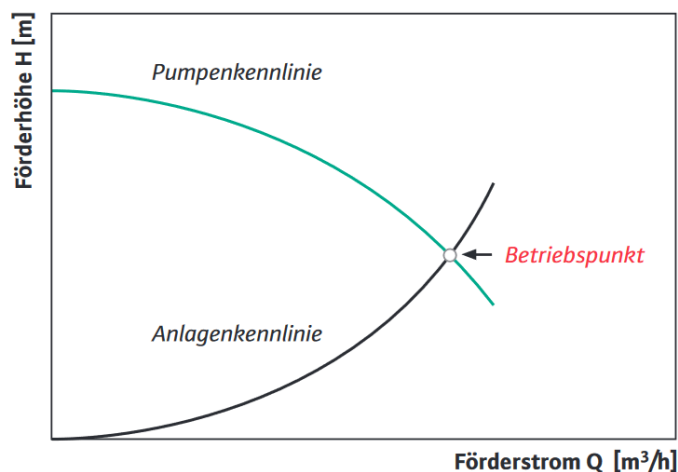


Abbildung 4: Pumpen- und Anlagenkennlinie [16]

Der Betriebspunkt stellt ein Gleichgewicht zwischen dem Leistungsangebot der Umwälzpumpe und dem Leistungsverbrauch des Rohrnetzes dar. Die Pumpenförderhöhe ist stets so groß wie der Durchflusswiderstand der Anlage. Der von der Pumpe gelieferte Förderstrom muss groß genug sein um den Rohrnetz widerstand zu überwinden. [16]

Die Umwälzpumpen mit einem elektronisch drehzahlgeregelten Motor sind im Vergleich zu den unregulierten und mehrstufigen Umwälzpumpen viel effizienter, weil sie an den Wärmebedarf angepasst werden können und nur solche Wassermengen umwälzen, die gerade benötigt wird. Die Drehzahl-Stufenschaltungen der elektronisch drehzahlgeregelten Heizungsumwälzpumpen erfolgen durch umfangreiche Regelgeräte. Damit kann die Umwälzpumpe direkt auf die Raumtemperaturregelung reagieren und an den aktuellen Wärmebedarf angepasst werden. Die Regelgeräte verändern die Drehzahl automatisch.

Die Heizungsumwälzpumpe Magna 32-60 hat vier Regelungsarten:

- $AUTO_{ADAPT}$
- Proportionaldruckregelung
- Konstantdruckregelung
- Automatische Nachtabsenkung

Die Heizungsumwälzpumpe Magna 3 verfügt über mehrere Regelungsarten:

- $AUTO_{ADAPT}$
- $FLOW_{ADAPT}$
- Proportionaldruckregelung
- Konstantdruckregelung
- Konstante Temperatur
- Differenztemperatur
- Konstante Kennlinie.

Während des  $AUTO_{ADAPT}$ -Betriebs wird die Pumpenleistung automatisch an die aktuelle Anlagenkennlinie angepasst. Bei der Proportionaldruckregelung wird die Förderhöhe der Pumpe an den tatsächlichen Förderstrom angepasst. Die Konstantdruckregelung hält die Förderhöhe der Pumpe, unabhängig vom Förderstrom, konstant. Während der automatischen Nachtabsenkung schaltet die Pumpe abhängig von der Vorlauftemperaturänderung automatisch zwischen Normalbetrieb und Nachtabsenkung um. Die Regelungsart  $FLOW_{ADAPT}$  ist geeignet für Anlagen, die eine Begrenzung von maximalem Förderstrom haben. Die Pumpe regelt den Förderstrom, damit er die ausgewählte Förderstromgrenze nicht überschreitet und passt ihn wie bei der  $AUTO_{ADAPT}$  Funktion, auch an den Wärmebedarf an. Die Regelungsart konstante Temperatur ist für Anlagen mit einer unveränderlichen Anlagenkennlinie geeignet. Wenn die Pumpenförderleistung in Abhängigkeit einer Differenztemperatur geregelt werden soll, ist

die Regelungsart Differenztemperatur auszuwählen. Bei einer externen Steuerung kann die Pumpe in Abhängigkeit vom externen Signal von einer Konstantkurve zur anderen wechseln. [17]

Derzeit wird eine Heizungsumwälzpumpe bei Konstantdruckregelung eingestellt. Alle anderen Umwälzpumpen werden mit der  $AUTO_{ADAPT}$  Regelung betrieben. Die Pumpen- und Anlagenkennlinien bei der  $AUTO_{ADAPT}$  Regelung werden in Abbildung 5 dargestellt:

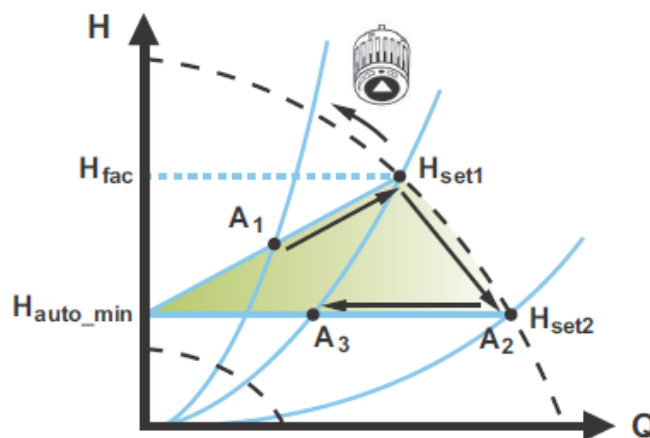


Abbildung 5: Pumpen-, Anlagenkennlinie nach  $AUTO_{ADAPT}$  Regelung [17]

$A_1$ : Ursprünglicher Betriebspunkt.

$A_2$ : Niedriger, erfasster Druck auf der MAX-Kennlinie.

$A_3$ : Neuer Betriebspunkt nach  $AUTO_{ADAPT}$  Regelung.

$H_{set1}$ : Ursprünglicher Sollwert.

$H_{set2}$ : Neuer Sollwert nach  $AUTO_{ADAPT}$  Regelung.

$H_{fac}$ : Werkseitig eingestellter Sollwert.

$H_{auto\_min}$ : Ein fest eingestellter Wert: 1,5 m

Bei der  $AUTO_{ADAPT}$  Regelung läuft die Pumpe mit der Werkeinstellung  $H_{fac} = H_{set1}$  an. Dies entspricht circa 55% der maximalen Förderhöhe. Die Pumpe stellt dann ihre Förderleistung auf  $A_1$  ein. Wenn die Pumpe einen niedrigen Druck auf der maximalen Kennlinie erfasst ( $A_2$ ), wählt  $AUTO_{ADAPT}$  Funktion automatisch eine entsprechende niedrige Regelkennlinie  $H_{set2}$  aus. Wenn die Ventile in der Anlage sich schließen, stellt die Pumpe ihre Leistung auf  $A_3$  ein. Die  $AUTO_{ADAPT}$  Funktion ist eine Form der Proportionaldruckregelung, bei der die Regelkennlinie einen festen Ursprung  $H_{auto\_min}$  besitzt.

## 2.4 Gebäudeautomation und Messtechnik

### 2.4.1 Gebäudeautomation

Die Gebäudeanlagen am Energie-Campus werden durch das System der Gebäudeautomation (GA) ständig überwacht und gesteuert. Unter dem Begriff Gebäudeautomation sind Überwachungs-, Regel- und Optimierungseinrichtungen sowie die Betriebsdatenerfassung im Gebäude zusammengefasst. Die GA ist damit ein wichtiger Bestandteil des technischen Facility Managements. [18] Am Energie-Campus dient sie zusätzlich auch zu Forschungszwecken. Die Gebäudeautomation wird in drei Ebenen unterteilt: Feldebene, Automatisierungsebene sowie Managementebene (siehe Abb. 6).

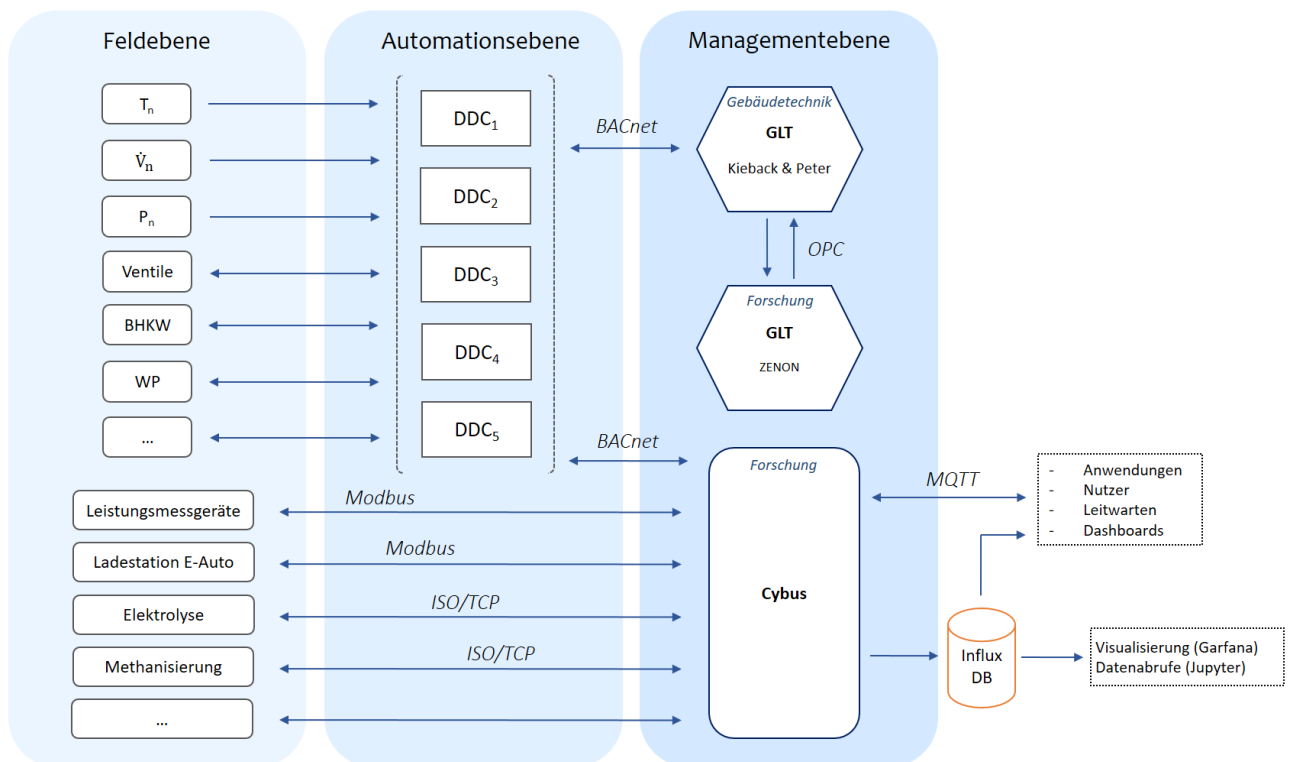


Abbildung 6: Gebäudeautomatisierung Darstellung (eigene Darstellung)

Zur Feldebene gehören Messsensoren, verschiedene Steuerungskomponenten, wie Ventile, Klappen, und steuerbare Prozesseinheiten. Die Automationsebene besteht aus DDC-Anlagen – Direct-Digital-Control-Anlagen. Eine DDC-Anlage stellt ein Microcontrollersystem mit einer entsprechenden echtzeitbetriebsbasierten Software dar und erledigt Steuerungs- sowie Regelungsaufgaben in der Gebäudeautomatisierung. Die Hardware der DDC-Anlagen verfügt über mehrere analoge und digitale Ein- sowie

Ausgänge, die zur Anbindung der Betriebseinheiten der Feld- und Managementebene dienen. [19] Auf der obersten Managementebene befindet sich die Gebäudeleittechnik (GLT). Die GLT ist ein zentraler Bestandteil eines Gebäudeautomationssystems, die alle gebäudetechnische Einheiten vernetzt. GLT-Software dient zur Visualisierung der technischen Vorgänge innerhalb des Gebäudes und bildet die von den DDC-Anlagen gelieferten Daten in einer dem Nutzer verständlichen Art und Weise graphisch ab. Es kann auf alle Komponenten, die auf der Feldebene liegen, durch GLT eingegriffen werden, falls dies nötig sein sollte. [20]

Am Energie-Campus gibt es Gebäudeleittechnik-Software von zwei Anbietern. Die GLT von Kieback & Peter wird für die Steuerung der Gebäudetechnik durch das Facility Management eingesetzt. Die GLT von Zenon dient zu Forschungszwecken. Zur Forschung wird zusätzlich auch Cybus, ein sogenannter Connector, verwendet. Cybus stellt eine Kommunikationsoberfläche dar, die Maschinendaten in eine moderne Internetschnittstelle übersetzt und Live-Daten zur Verfügung stellt.

Die Prozessdaten der Feldgeräte werden über ein Feldbus-Kommunikationssystem in den DDC-Anlagen eingesammelt. Danach werden diese Daten über das BACnet-Protokoll zur GLT sowie zum Cybus geliefert. Die Kommunikation zwischen Zenon und der Peter & Kieback GLT erfolgt über das OPC-Protokoll. Es gibt auch Anlagen, die nicht zur üblichen Gebäudetechnik gehören, sondern nur zur Forschung dienen, beispielsweise die E-Auto Ladestation, Elektrolyse und Methanisierung. Die Daten dieser Anlagen werden dann separat zum Cybus über Modbus oder ISO/TCP Kommunikationsprotokolle geliefert. Cybus stellt die Daten auch dem Nutzer über MQTT Protokoll für weitere Anwendungen zur Verfügung. So wird beispielsweise der Überwachungsvorgang durch die Forscher realisiert. Im Fall der Steuerung wird in der GLT-Software ein Parameter geändert und an das DDC-System gesendet, das direkt die Regelungsaufgabe übernimmt und Ventil oder Klappe der Anlage eingreift.

Für das langfristige Monitoring der Anlagenfahrweise ist der Cybus an eine zeitreihenbasierte Influx-Datenbank angebunden. Die Daten können über übliche Datenbankschnittstellen abgerufen werden. Für diese Arbeit wurde beispielsweise ein Python-Script genutzt. Mithilfe zusätzlicher Visualisierungsprogramme, wie Grafana können Temperatur-, Durchflussverläufe, Lastgänge sowie andere Daten grafisch

dargestellt und genau im Laufe der Zeit eingesehen werden. In dieser Arbeit werden die Grafiken aus Grafana für die Prozessanalyse verwendet.

### 2.4.2 Messtechnik

Am Energie-Campus sind Messsensoren zur Temperatur-, Durchfluss- und Druckmessung eingesetzt. Ein Messensor reagiert auf eine physikalische Größe und gibt meistens ein elektrisches Signal ab, aus dem auf den Wert der physikalischen Größe geschlossen werden kann.

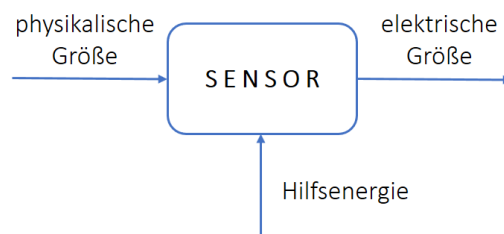


Abbildung 7: Arbeitsprinzip eines Sensors

### *Temperaturfühler*

Am Wärmespeicherungssystem am Energie-Campus sind Temperaturfühler der Firma Oppermann Regelegeräte (Model T-KP10-I-350) zur Temperaturmessung des Wassers in Rohrleitungen und Behältern eingesetzt. Zulässige Mediumtemperatur für installierte Temperaturfühler liegt zwischen  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $120^{\circ}\text{C}$ . Die Sensoren des Models T-KP10-I-350 verfügen über Edelstahlhülsen. [21]



Abbildung 8: Temperaturfühler der Firma Oppermann Regelegeräte

Das Prinzip der Temperaturmessung beruht auf ein thermoresistives Prinzip. Bei einem thermoresistiven Prinzip wird die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit als Basiseffekt genutzt. Die elektrische Leitfähigkeit ist zum spezifischen Widerstands umgekehrt proportional. Die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von der Temperatur kann allgemein durch folgende Gleichung dargestellt werden. [22]

$$\rho(T) = \rho(0)[1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots]$$

$\rho(T)$  = spezifische Widerstände bei Bezugstemperatur T;

$\rho(0)$  = spezifische Widerstände bei Bezugstemperatur 0°C;

$\alpha, \beta$  = Materialkonstanten.

Bei der Anwendung der Widerstände aus Edelmetallen ist der spezifische Widerstand direkt proportional zu der gemessenen Temperatur. [22]

$$\rho \sim T$$

### *Drucksensor*

Am Wärmespeicherungssystem am Energie-Campus sind Drucksensoren der Firma Thermokon zur Druckmessung der flüssigen Medien in Rohrleitungen installiert. Der Messbereich der vorhandenen Drucksensoren beträgt 0 bis 16 bar. Die Drucksensoren können bei -40 bis 125°C betrieben werden und verfügen über die Edelstahlgehäuse. [24]



Abbildung 9: Drucksensor der Thermokon Firma

Ein Druckmesssensor besteht aus Plattenfedermembran, die sich unter dem Einfluss des Druckes deformiert. Die Oberflächenradialdehnung dieser Federmembran ist direkt proportional zum angreifenden Druck. [22]



$$\varepsilon_r = c \cdot \frac{(r^2 \cdot p)}{(t^2 \cdot E)}$$

$\varepsilon_r$  = Oberflächenradialdehnung;

$c$  = Proportionalitätskonstante;

$r$  = Membranradius in m;

$p$  = Druck in Pa;

$t$  = Membrandicke in m;

$E$  = Elastizität des Membranwerkstoffes.

### *Durchflussmesser*

Für die Durchflussmessung werden an der Wärmespeicherungsanlage induktive Durchflussmesser der Firma Siemens eingesetzt.

Ein Durchflussmesser besteht aus den folgenden Komponenten:

- Messumformer (MAG 5000);
- Messaufnehmer (MAG 5100W);
- Kommunikationsmodul;
- SENSORPROM-Speicherbaustein.



*Abbildung 10: Messumformer, Messaufnehmer, SENSORPROM-Speicherbaustein*

Das Prinzip der Durchflussmessung beruht auf dem Faradayschen Gesetz der elektromagnetischen Induktion. Als die elektromagnetische Induktion wird die Erzeugung des elektrischen Stroms durch ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld bezeichnet (siehe Abb. 11).

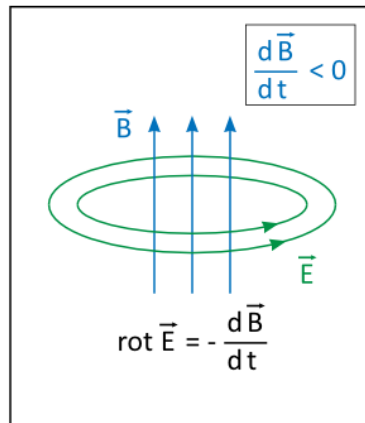


Abbildung 11: Faradaysches Gesetz [25]

$\vec{E}$  = elektrische Feldstärke,  
 $\vec{B}$  = magnetische Flussdichte,  
 $t$  = Zeit.

Der Messaufnehmer stellt ein Messrohr aus Metall dar, das denselben Durchmesser wie das zu messende Rohr hat. Das Messrohr besteht aus zwei Magnetspulen und zwei gegenüberliegenden Messelektroden (siehe Abb.12). Die Magnetspulen erzeugen ein magnetisches Feld konstanter Stärke über dem gesamten Rohrquerschnitt. Dieses Magnetfeld ist zur Flussrichtung senkrecht orientiert. Das Messprinzip nutzt die Trennung bewegter Ladungen in einem Magnetfeld. Für die Durchflussmessung in einer Heizungsanlage wird auch die elektrische Leitfähigkeit, nämlich die ionische Leitfähigkeit des geströmten Wassers genutzt. Die positiv und negativ geladenen Ionen werden durch das Magnetfeld separiert und zu den gegenüberliegenden Seiten des Rohrs ablenkt. Infolgedessen entsteht eine elektrische Spannung, die über die beiden senkrecht zum Magnetfeld angeordneten Messelektroden erfasst und gemessen wird. Mit dem bekannten Rohrquerschnitt lässt sich das Durchflussvolumen berechnen. Die gemessene Spannung ist direkt proportional zur momentanen Fließgeschwindigkeit des Wassers. [25]

$$U = k \cdot B \cdot D \cdot v$$

$U$  = Spannung,  
 $k$  = Proportionalitätsfaktor,  
 $B$  = Magnetfeld,  
 $D$  = Rohrdurchmesser,  
 $v$  = Fließgeschwindigkeit.

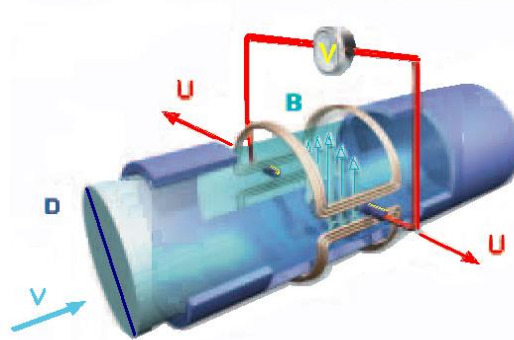


Abbildung 12: Messprinzip des elektromagnetischen Durchflussmessers [26]

Die auf der Rohrwand aufgebrachte Auskleidung verhindert elektrische Kurzschlüsse zwischen einem metallischen Rohr und der durch dieses Rohr fließenden leitfähigen Flüssigkeit. Um weitere Messfehler, zum Beispiel die Messfehler wegen elektrochemischer Effekte des Wassers sowie elektromagnetischer Störfelder von außen zu vermeiden, wird das Magnetfeld durch einen getakteten Gleichstrom wechselnder Polarität erzeugt. Das Magnetfeld wird ständig umgepolt. Die an den Elektroden abgegriffene Spannung wechselt ebenfalls die Polarität, damit alle konstante Störspannungen rechnerisch eliminiert werden können. Wenn es kein Durchfluss erfolgt, werden die elektrisch geladenen Teilchen gleichmäßig verteilt und so kann zwischen den Elektroden keine Spannung gemessen werden. [27]

Der Messaufnehmer leitet die Signale in den Messumformer weiter. Der Messumformer wandelt diese Signale in entsprechende Standardsignale von 0 bis 20 mA um. Außerdem versorgt der Messumformer die im Messaufnehmer vorhandenen Magnetspulen mit einem konstanten Strom. Der digitale Signalprozessor im Messumformer wandelt das analoge Durchflusssignal bzw. den Spannungswert in ein digitales Signal um. Der Messumformer wird intern über einen internen CAN-Kommunikationsbus betrieben, über den die Signale an das Anzeigemodul und Dialogmodul übertragen werden. [28]

Für die Durchflussmesser an der Wärmespeicheranlage am Energie-Campus werden Messumformer ohne Anzeige eingesetzt, da sie wirtschaftlich günstiger als die Standardmessumformer mit Anzeige und Tastatur sind. Ein Standardmessumformer wird nur für die Gerätekonfiguration genutzt und danach durch einen Messumformer ohne Anzeige ersetzt. Die Werkeinstellungen werden mittels des Standardmessumformers mit Anzeige und Tastatur geändert und im SENSORPROM-Speicherbaustein gespeichert. Wenn

der Standardmessumformer ausgebaut und der Messumformer ohne Anzeige montiert wird, werden alle Werkseinstellungen aus diesem Speicherbaustein geladen. [28]

Die Grundeinstellungen: Netzfrequenz, Strömungsrichtung, Messbereich bzw. maximaler Durchfluss, Abschaltung bei geringem Durchfluss, Leerrohrabschaltung sowie Fehlerstufe können entsprechend der Betriebssituation geändert werden.

## 2.5 Regelung des Heizungssystems

Für Büroräume in einem Nichtwohngebäude gilt nach DIN EN 12831 ein Temperatursollwert von 20°C. [29] Damit die Solltemperatur im Gebäude eingehalten wird, erfolgt eine Regelung des Heizungssystems. Für jeden Verbraucher am Energie-Campus wird die Vorlauftemperaturregelung durch Rücklaufbeimischung eingesetzt. Die Vorlauftemperatur wird mithilfe einer Heizkurve bzw. einer Heizkennlinie bestimmt. Die Heizkurve stellt den Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur in das Heizsystem und Außentemperatur dar (siehe Abb. 13). Mit absinkender Außentemperatur steigt die Vorlauftemperatur bezüglich der eingestellten Heizkurve. Die Steilheit der Heizkurve ist von der Jahreszeit abhängig.

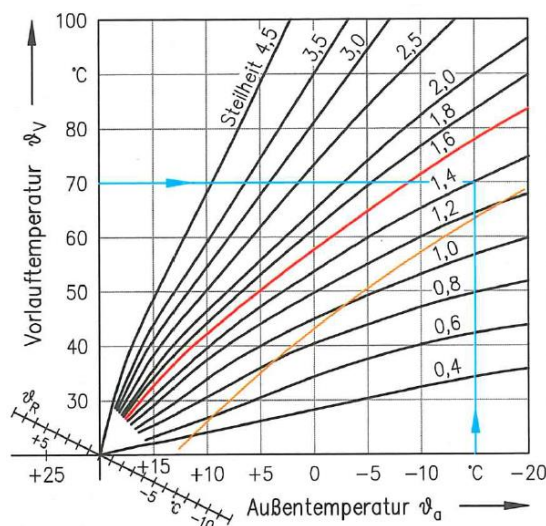


Abbildung 13: Heizkurve: Abhängigkeit der Vorlauftemperatur von der Außentemperatur [29]

Außerdem hängt die Steilheit der Heizkurve auch von den Verbraucherarten ab. Ein Beispiel hierfür ist, dass die BTA-Anlage am Energie-Campus immer mit einer Heizkurve, die nicht größer als 0,8 ist, gesteuert wird, weil unter hohen Vorlauftemperaturen der Bodenbelag

sowie der Estrich geschädigt werden kann. Außerdem braucht die BTA-Anlage immer mehr Zeit um sich abzukühlen, deswegen ist es nötig, dieses System mit einer möglichst niedrigen Vorlauftemperatur zu versorgen.

Da die Temperatur des Heizwassers aus den Speichern fast 80°C beträgt, wird für die Erreichung der gewünschten niedrigen Solltemperatur des jeweiligen Verbrauchers eine Rücklaufbeimischung durch 3-Wege-Beimischventil eingesetzt (siehe Abb 14).

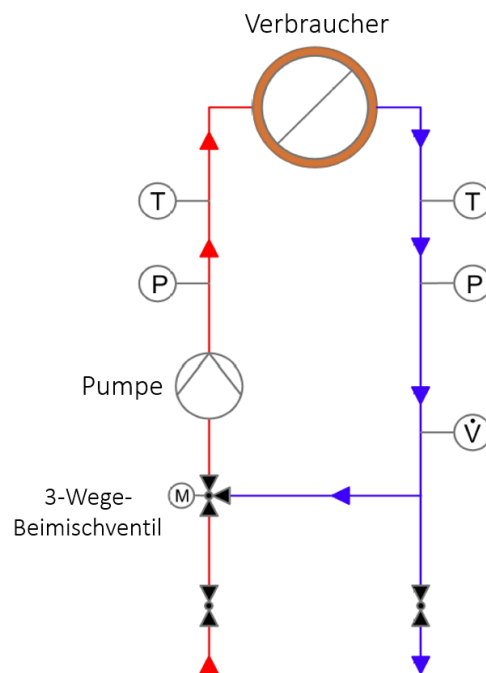


Abbildung 14: Rücklaufbeimischungsschema

Das 3-Wege-Beimischventil wird über einen PI-Regelalgorithmus abhängig von der Heizkurve angesteuert. Auf dem Beispiel der Regelung des OG Heizkreises in der Abbildungen 15 und 16 kann man sehen, dass die Außentemperatur umgekehrt proportional zur Solltemperatur des Heizkreises ist. Zum Beispiel, zwischen 9:30 und 10:30 Uhr, bei der Steigerung der Außentemperatur, nimmt die Solltemperatur ab und zwischen 12:00 und 13:00 Uhr, während die Außentemperatur sinkt, nimmt die Solltemperatur zu. Der Solltemperaturwert ist ein rechnerisch ermittelter Wert. Die Vorlauftemperatur ist ein Messwert, der zum Solltemperaturwert angepasst werden muss. Damit die Vorlauftemperatur die Solltemperatur erreicht, wird dem Vorlaufvolumenstrom der Rücklaufvolumenstrom beigemischt. In der Abbildung 17 ist die Solltemperatur und der Regelsollwert sowie der Messwert der Beimischung dargestellt. Der Regelsollwert der

## Ist-Zustand des Heizungssystems

Beimischung wird mithilfe des Solltemperaturwertes sowie des tatsächlichen Vorlauftemperaturwertes berechnet. Ein Messwert zeigt die tatsächliche Beimischung und folgt dem Regelsollwert mit einer Zeitverzögerung, da die Einstellung des 3-Wege-Beimischventils etwas Zeit benötigt.

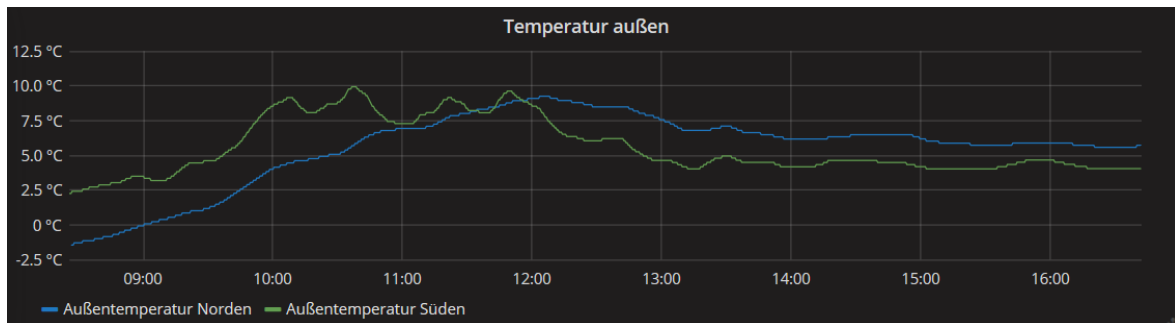


Abbildung 15: Außentemperatur auf Nord- und Südseite

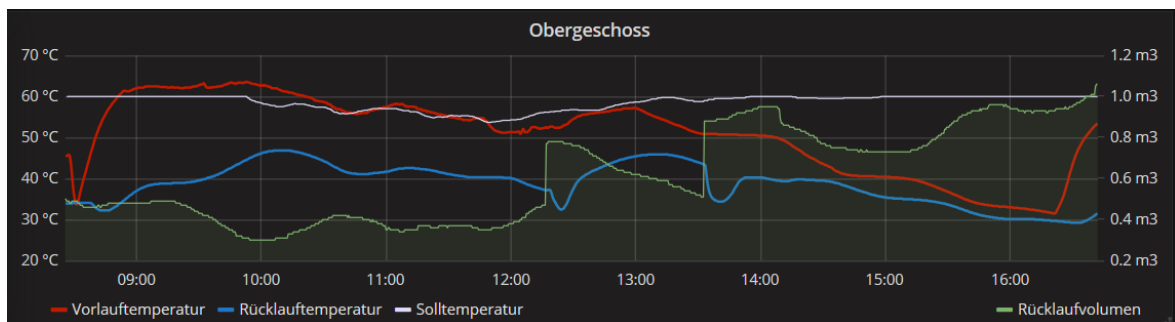


Abbildung 16: Vor- und Rücklauftemperatur, sowie Solltemperatur und Rücklaufvolumenstrom des OG-Heizkreises

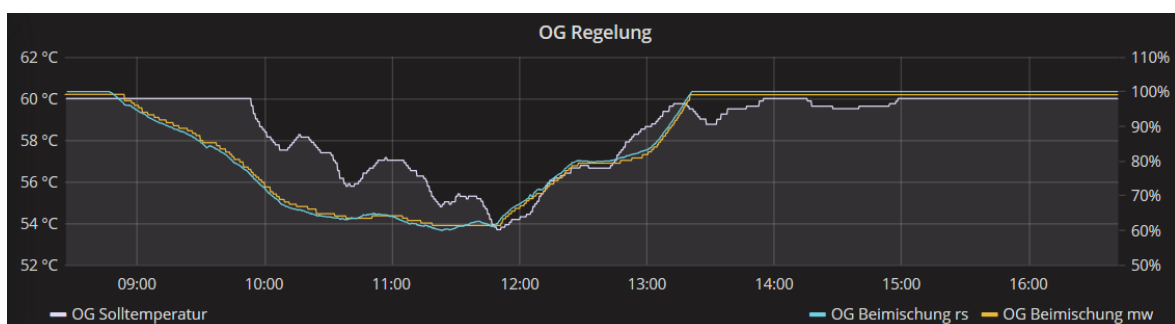


Abbildung 17: Solltemperatur sowie Regelsollwert und Messwert der Beimischung beim OG-Heizkreis

Die Flachheizkörper sind zusätzlich mit Thermostatventilen ausgerüstet und können lokal gesteuert werden.

Entsprechend einer Auslegungstemperatur von  $-12^{\circ}\text{C}$  für Hamburg werden folgende Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der Heizungskomponenten eingehalten. [30]

## Ist-Zustand des Heizungssystems

Tabelle 9: Vor- und Rücklaufemperatur des jeweiligen Verbrauchers entsprechend Hamburg Auslegungstemperatur

Auslegungstemperatur außen: -12°C		
Heizsystem	Vorlaufemperatur	Rücklaufemperatur
Heizkörper EG/OG	70°C	50°C
BTA	38°C	29°C
DSP	55°C	45°C
RLT Erhitzer	50°C	30°C

Als ein zentraler Bauteil des gesamten Heizungssystems dient das Wärmespeicherungssystem. Durch den Einsatz der Wärmespeicher lassen sich Wärmeerzeuger und -verbraucher unabhängig voneinander betreiben. Das BHKW schaltet sich erst nach Unterschreitung einer Grenztemperatur in den Speichern an und kann ohne Anforderung auf der Verbrauchsseite die Speicher mit der gesamten Wärmeleistung beladen. Bei beladenen Wärmespeichern kann der Wärmebedarf von der Verbraucherseite ohne Zuschalten des BHKWs gedeckt werden. [31, S. 32]

Darüber hinaus muss das BHKW nicht fortwährend ein- und ausgeschaltet werden. Dadurch kann die Laufzeit des BHKW verlängert werden sowie die Wärmeverluste durch häufiges Aufheizen und Abkühlen des Wärmeerzeugers in den Betriebsunterbrechungen reduziert werden. Durch eine Reduzierung der Einschalthäufigkeit kann neben einer Verbesserung der Energieausnutzung gleichzeitig eine Emissionsreduzierung erreicht werden, da die Emissionen beim Ein- und Ausschalten etwa 5-mal größer sind, als die Werte bei stationärem Betrieb (siehe Abb. 18). [31, S. 38]

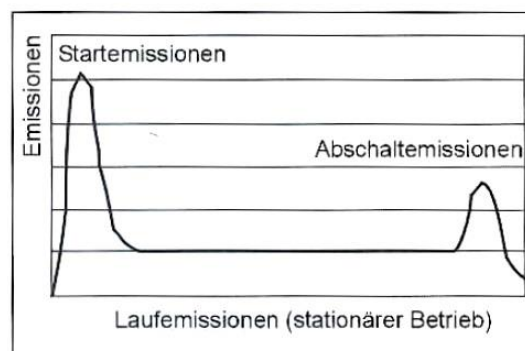


Abbildung 18: Emissionsentwicklung beim Betrieb von Heizkesseln [31]

Zusätzlich erlauben die Speicher stromgeführte Betriebsweisen des BHKW, da durch die Entkopplung des Wärmebedarfs von der Erzeugung zusätzliche Freiheitsgrade erreicht werden. Zum Beispiel, wie oben erwähnt, wird der am Energie-Campus erzeugte Strom in das Netz eingespeist bzw. verkauft, deswegen wird das BHKW idealerweise nicht betrieben, wenn es einen niedrigen Strompreis auf dem Markt gibt. Wenn das BHKW nicht betrieben wird, kann der Wärmebedarf des Gebäudes mithilfe der Wärmespeicher gedeckt werden. Und umgekehrt, wenn es kein Wärmebedarf gibt, aber es wirtschaftlich günstig ist, den Strom zu produzieren, kann die Wärmeenergie in den Speicher gespeichert und später genutzt.

Das Wärmespeicherungssystem spielt eine wichtige Rolle in der Gebäudewärmeversorgung sowie im Forschungsbetrieb, deswegen muss es besonders intensiv untersucht und möglichst effizient verwendet werden.

.



## **3 Wärmespeicherungssystem**

### **3.1 Grundlagen: Wärmespeicher**

Wärmespeicher ermöglichen das Wärmeangebot zeitlich an den Bedarf anzupassen. Durch Wärmespeicher lassen sich viele Energiequellen wie Sonnenenergie oder industrielle Abwärme effizient nutzen. Während des Tages wird beispielweise die einstrahlende Sonnenenergie gewonnen und in Form von Wärme gespeichert, die danach für den Spitzenbedarf genutzt wird, der meistens auf die Morgen- und Abendzeit fällt. Große Speicher werden in Fernwärmenetzen eingesetzt, die von Kraftwerken gespeist werden. Die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme ermöglicht eine rationale Energienutzung. Die Wärmeleistung ist immer etwas größer als die elektrische Leistung. Deswegen muss die Wärmeversorgung während des Spitzenbedarfes anhand von Spitzkraftwerken gedeckt werden. Das aber kann bei Nutzung großer Wärmespeicher vermieden oder verringert werden. Außerdem ist die Installation und Bedienung eines Wärmespeicherungssystems günstiger und umweltfreundlicher als die eines Kraftwerkes. [31, S. 6] Vor diesem Hintergrund hat die Nutzung von Wärmespeichern große Vorteile. Heutzutage gibt es eine große Auswahl der Wärmespeicher.

#### **3.1.1 Wärmespeicherklassifikation**

Die Wärmespeicher können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden. Nach dem physikalischen Prinzip unterscheiden sich fühlbare, latente und chemische Speicher voneinander. Speicherung fühlbarer oder sensibler Wärme erfolgt durch eine Temperaturerhöhung des Speichermediums. Diese Art der Wärmespeicherung tritt am häufigsten im Haushalt auf. Während der Speicherung latenter Wärme ändert sich der Aggregatzustand des gespeicherten Stoffes bei konstanter Temperatur. Dabei werden die Schmelz- und Verdampfungswärme eines Stoffes genutzt. Im Vergleich zu den fühlbaren Wärmespeichern spielt dieses Speicherprinzip jedoch aufgrund wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien eine geringere Rolle. Die chemische Wärme wird als Bindungsenergie bei Stoffreaktionen gespeichert. In der Regel operieren die chemischen

Wärmespeicher mit sehr hohen Temperaturen und werden im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden kaum angewendet. [31, S.9]

Außerdem lassen sich die Speicher auch nach der Dauer der Wärmespeicherung unterscheiden. Es gibt Kurzzeit- und Langzeitwärmespeicher. Die Kurzzeitspeicherung von Wärme erfolgt über mehrere Tage. Die Langzeit-Wärmespeicher dienen zur Wärmespeicherung über einen Zeitraum von mehreren Monaten. In der Regel besitzen Langzeitspeicher ein viel größeres Speichervolumen als Kurzzeitwärmespeicher. [31, S.69]

Nach Temperaturniveau unterscheidet man Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturspeicher. Der Speicherungsprozess von einigen Stoffen, wie zum Beispiel Natrium oder Metallkarbonat, kann in Hochtemperaturbereichen von etwa 800°C geschehen. Die Wärmespeicher können auch für Klimatisierung und Abkühlung genutzt werden. In diesem Fall werden Niedertemperaturspeicher eingesetzt. Für die Wärmeversorgung im Haushalt werden Mitteltemperaturspeicher verwendet.

Abschließend können die Speicher sich nach Träger- und Speichermedium unterscheiden. Unter dem Wärmeträgermedium versteht man einen Stoff, der die Wärme in den Speicher transportiert. Als Wärmespeichermedium wird ein Medium bezeichnet, das die vom Wärmeträgermedium abgegebene Wärme aufnimmt und speichert. Deswegen sind die Stoffe mit einer hohen spezifischen Wärmekapazität als Wärmespeichermedium von Vorteil. Über einen der höchsten Werte verfügt Wasser, seine spezifische Wärmekapazität beträgt 4,19 kJ/kg·K. Deswegen wird Wasser sehr häufig als Speichermedium in sensiblen Wärmespeichern genutzt. Darüber hinaus hat Wasser noch andere Vorteile, die es zu einem perfekten Stoff für die Wärmespeicherung machen. Es ist ungiftig, überall verfügbar sowie leicht zu transportieren. Neben der hohen spezifischen Wärmekapazität besitzt Wasser auch eine geringe Wärmeleitfähigkeit und eine temperaturabhängige Dichte. [31, S.11]

Wenn ein Wärmeträgermedium und ein Wärmespeichermedium nicht identisch sind, werden indirekt beheizte Wärmespeicher eingesetzt. Die indirekt beheizten Wärmespeicher besitzen ein Wärmetauschsystem im Behälter und können auch als ein kombiniertes System genutzt werden. Solche Wärmespeicher werden bei der Speicherung von Wärmeenergien der Solarthermie, oder bei der direkten Verbindung mit Gas- oder Öl-

Heizkesseln verwendet. Außerdem sind kombinierte Systeme für die Wärmespeicherung bei der Wärmebereitung des Trinkwassers geeignet. Hierbei wird die Trennung des Trinkwassers vom Heizwasser unter besonders hohen hygienischen Bedingungen durchgeführt.

Bei der Nutzung des gleichen Stoffes für Wärmeträger und Speichermedium ist kein Wärmeübertrager erforderlich und der Speicher kann direkt beheizt werden. Zu solchen Speichertypen gehört der Warmwasserpufferspeicher, der perfekt zu einer geschlossenen Warmwasserheizungsanlage passt.

Am Energiecampus werden solche Warmwasserpufferspeicher für kurzzeitige Wärmespeicherung eingesetzt. Da die Wärmeüberträger schon im BHKW vorhanden sind und Trinkwasserwärmebereitung über Elektro-Durchlauferhitzer erfolgt, werden am Energiecampus die Speicher nur zum Heizen genutzt. Für größere Wärmekapazitäten werden drei gleiche Pufferspeicher verwendet, jeweils mit 946 Liter Speichervolumen. Die am Energiecampus vorhandenen Wärmespeicher haben die Bezeichnungen Speicher 4 bis 6, da der zweite und dritte Speicher vorgesehen aber noch nicht installiert sind. Der Speicher 1 dient für die Kältespeicherung. Die Aufgabe solcher Pufferspeicher ist möglichst viel Wärme vom BHKW aufzunehmen, sie weitgehend verlustfrei aufzubewahren und den Verbrauchern bei Wärmebedarf zur Verfügung zu stellen. [31, S.1]

### 3.1.2 Energieeffizienz der Pufferspeicher

Ein Speicher ist umso effizienter, je länger er die Wärme speichern kann und je kleiner seine Wärmeverluste sind. Der Wärmeverlust durch Speicherwände lässt sich anhand folgender Gleichung bestimmen:

$$Q_V = U \cdot A \cdot (T_i - T_a)$$

$Q_V$  = Wärmeverlust in J;

$U$  = Wärmedurchgangskoeffizient in  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$A$  = Fläche der Wärmeübertragung in  $m^2$ ;

$T_i$  = Innentemperatur des Speichermediums in K;

$T_a$  = Außentemperatur der Umgebung in K.

Der Wärmedurchgangskoeffizient bzw. U-Wert ist von den Wärmeleitfähigkeiten der Speicherwand und der Wärmedämmung sowie vom Wärmeübergangswiderstand zwischen der Außenwand des Speichers und der Umgebungsluft abhängig.

Da der Speicher eine zylindrische Form hat, ergibt sich folgende Berechnung seines U-Wertes:

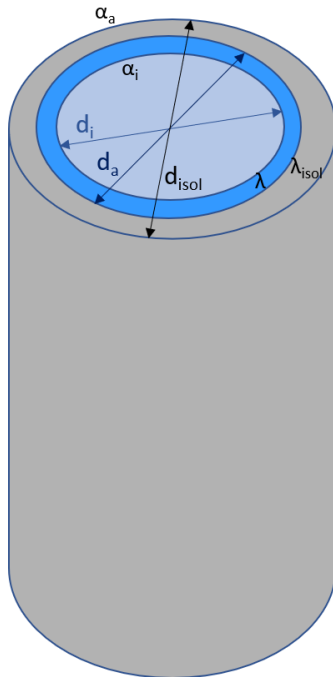


Abbildung 19: Querschnitt eines wärmeisolierten Speichers (eigene Darstellung)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\lambda_{isol}} \ln \frac{d_{isol}}{d_a} + \frac{1}{\alpha_a d_{isol}}}$$

$\alpha_i$  = Wärmeübergangswiderstand innen des Speichers in  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$d_i$  = Speicherinnendurchmesser in m;

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit der Speicherwand in  $W/(m \cdot K)$ ;

$d_a$  = Speicheraußendurchmesser in m;

$\lambda_{isol}$  = Wärmeleitfähigkeit der Isolation in  $W/(m \cdot K)$ ;

$d_{isol}$  = Speicherdurchmesser mit Isolation in m;

$\alpha_a$  = Wärmeübergangswiderstand außen des Speichers in  $W/(m^2 \cdot K)$ .

Da der Speicher ein Teil des dynamischen nicht-stationären Heizungssystems ist und ständig mit dem Wasser durchströmt wird, verändert sich die Speichertemperatur im Laufe der Zeit sowie über die Speicherhöhe. Deswegen stellt die Bestimmung der Wärmeverluste durch Speicherwände eine komplexe Berechnung dar. Außerdem ist die Bestimmung des Wärmeübergangswiderstands auch sehr aufwendig. In diesem Fall kann die Speichereffizienz mithilfe einer Energiebilanz durch die effektive volumenspezifische Wärmespeicherung bzw. zugeführte und abgeführte Wärmeenergie pro Arbeitszyklus dargestellt werden:

$$0 = Q_B - Q_L - Q_V$$

$Q_B$  = die vom BHKW zugeführte Wärmemenge in J;

$Q_L$  = die zum Verbraucher abgeführte Wärmemenge in J;

$Q_V$  = Wärmeverluste J.

Durch folgende Formel können die Wärmeverluste berechnet werden:

$$Q_V = Q_B - Q_L$$

Die dem Pufferspeicher zugeführten und abgeführten Wärmeenergien sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Wärmeenergie kann anhand des zeitlichen Integrals aus dem Produkt von Massenstrom, spezifischer Wärmekapazität und Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf auf der BHKW- bzw. Verbraucherseite bestimmt werden:

$$Q_n = \int \dot{m}_n \cdot c_p \cdot (T_{n,VL} - T_{n,RL}) dt$$

$\dot{m}_n$  = Massenstrom in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität in  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ;

$T_{n,VL}$  = Vorlauftemperatur in K;

$T_{n,RL}$  = Rücklauftemperatur in K;

$t$  = Zeit in s.

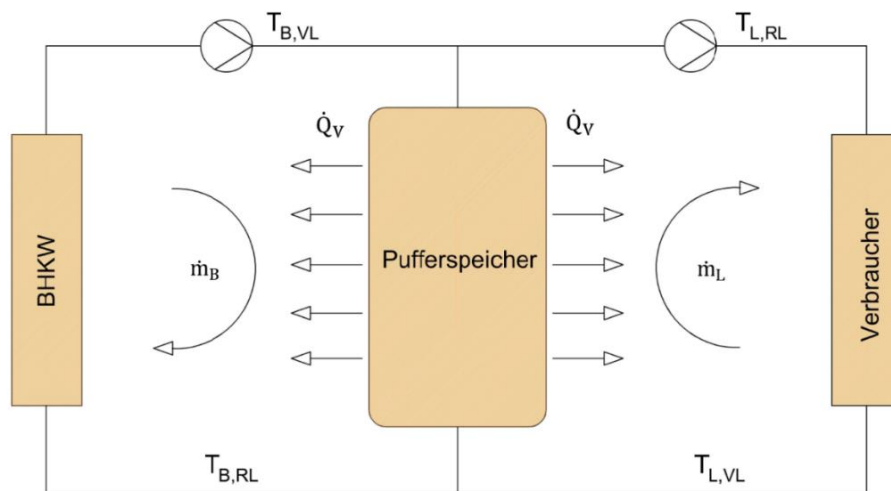


Abbildung 20: Energiebilanz einer Wärmespeicheranlage (eigene Darstellung)

Der vom BHKW zugeführte Volumenstrom hängt von der Wärmespeicher-Beladungsanforderung ab. Der zum Verbraucher abgeführte Volumenstrom hängt von Wärmebedarf des Gebäudes ab. Während die Vorlauftemperatur in jedem Heizkreis höher als die Rücklauftemperatur ist, bleiben die Vorlaufvolumenströme gleich den Rücklaufvolumenströmen, da es sich um geschlossene Kreisläufe handelt.

Die Energiebilanz der realen Wärmespeicheranlage kann leider nicht erstellt werden, da nicht genug Daten zur Verfügung stehen. Auf dem Heizungsrücklauf bzw. Vorlauf vom Verbraucher erfolgt keine Temperaturmessung. Die Berechnungen können nur dann durchgeführt werden, wenn die Vorlauftemperatur von der Verbraucherseite ( $T_{L,VL}$ ) bekannt wird.

Die volumenspezifische Wärmespeicherung hängt maßgeblich von dem Vorlauftemperaturniveau des BHKWs und dem Rücklauftemperaturniveau des Verbrauchers ab, aber auch von der Temperaturverteilung im Pufferspeicher. Für die bessere Temperaturverteilungsdarstellung kann ein Pufferspeicher als ein Schichtspeicher betrachtet werden. Die Anzahl solcher Schichten entspricht normalerweise der Anzahl der Temperaturfühler innerhalb des Speichers. Der Speicher am Energiecampus wird in drei Schichten unterteilt. Für jede Schicht kann die Energiebilanz erstellt werden, dabei müssen aber auch speicherinterne Wärmeübertragungsprozesse, wie Wärmeleitung und Konvektion, berücksichtigt werden. Die Grundlagen speicherinterner Prozesse werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

### **3.2 Grundlagen der Wärmeübertragung**

Die Erwärmung eines Körpers erfolgt durch einen thermischen Energietransport. Laut des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik fließt die Wärme von einem Körper mit einer hohen Temperatur zu einem Körper mit einer niedrigen Temperatur. Dieser Prozess heißt Wärmeübertragung und kann durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung erfolgen. Die Wärmestrahlung erfolgt durch elektromagnetischen Wellen und wird in dem Fall des Wärmespeichers vernachlässigt. Eine weitere Art der Wärmeübertragung ist die Wärmeleitung, die durch mikroskopische Teilchenbewegung bzw. Molekülen oder Elektronen in einer Umgebung mit einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung erfolgt. Der Wärmeleitungsprozess kann anhand der Fouriergleichung beschrieben werden. Der lokale Wärmestromdichte-Vektor ist direkt proportional dem örtlich vorhandenen Temperaturgradienten. [32, S. 12]

$$\vec{q} = -\lambda \operatorname{grad} T$$

$\vec{q}$  = Wärmestromdichte-Vektor;

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K);

$\operatorname{grad} T$  = Temperaturgradient, der in kartesischen Koordinaten drei Komponenten umfasst:

$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \dot{q}_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \dot{q}_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes stellt einen Proportionalitätsfaktor dar und charakterisiert die Intensität des Wärmeleitungsvorgangs. Da der Wärmestrom in Richtung abnehmender Temperatur fließt, wird in der Fouriergleichung das Minuszeichen aufgenommen. [32, S.12]

Der Wärmeleitungsprozess findet in Festkörpern statt. Ebenfalls tritt die Wärmeleitung auch in Gasen und Flüssigkeiten auf, aber nur wenn sich der Stoff in vollkommener Ruhe befindet. Bei einer Fluidströmung findet hier eine Überlagerung des Wärmeleitvorganges und Konvektion statt. [33, S.2] Unter dem Begriff Konvektion wird der Energietransport durch die makroskopische Bewegung des Fluides verstanden. Bei der Konvektion handelt es sich nicht nur um Wärmeleitung, sondern auch um einen Stoffübertragungsprozess, weil bei bewegten Fluiden auch ein Diffusionseffekt beobachtet werden kann. Man unterscheidet zwischen einer freien und einer erzwungenen Konvektion. Bei der freien oder natürlichen Konvektion spielt die Temperaturabhängigkeit der Fluidichte eine große Rolle. Ein Fluidstoff mit einer hohen Temperatur besitzt eine niedrige Dichte. Die Dichte nimmt zu, wenn die Temperatur sinkt. Durch den Dichteunterschied bewegt sich die warme Fluidschicht nach oben und die kalte nach unten. Bei der erzwungenen Konvektion wird die Strömungsgeschwindigkeit durch eine Pumpe aufgezwungen, was den Wärmeübertragungsprozess maßgeblich beschleunigt.

Innerhalb des Speichers findet sowohl natürliche Konvektion mit Wärmeleitvorgang als auch die erzwungene Konvektion statt. Eine genaue mathematische Modellierung der Konvektionsströmung ist aufwendig. In der einfachsten Näherung werden Wärmeleitung und freie Konvektion in einer effektiven vertikalen Wärmeleitung zusammengefasst. [34, S. 120] Da es sich bei der Temperatur sowie dem Volumenstrom um zeitlich veränderliche Werte handelt, stellt das Wärmespeicherungssystem ein komplexes nicht-stationäres

System dar. Für die Vereinfachung der Berechnung eines solchen Systems wird anstatt der Wärmemenge immer der Wärmestrom berechnet. Bei Speicherschichten kann die freie Konvektion nur entlang der Speicherhöhe berücksichtigt werden. Die freie Konvektion innerhalb des Speichers mit drei Temperaturschichten kann nach der adaptierten Fourierrechnung berechnet werden. [34, S. 120]

$$\begin{aligned}\dot{Q}_f &= \dot{Q}_{f,o \rightarrow m} - \dot{Q}_{f,m \rightarrow u} = A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_o - T_m) - \left( A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_m - T_u) \right) = \\ &= A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_o - 2T_m + T_u)\end{aligned}$$

$\dot{Q}_f$  = freie Konvektion in W;

$A_q$  = Speicherquerschnittsfläche in m<sup>2</sup>;

$\lambda_{eff}$  = effektive Wärmeleitung in W/(m·K);

$z$  = Schichthöhe in m;

$T_o$  = Temperatur der oberen Schicht in K;

$T_m$  = Temperatur der mittleren Schicht in K;

$T_u$  = Temperatur der unteren Schicht in K.

Durch eine hohe effektive Wärmeleitfähigkeit wird die vertikale Temperaturschichtung im Speicher abgebaut. Die effektive Wärmeleitfähigkeit bei guten Speichern ohne innere Einbauten liegt im Bereich der Wärmeleitfähigkeit des Wassers. [34, S. 120] Die Wasserwärmeleitfähigkeit ist von Temperatur und Druck abhängig. Außerdem stellt sie ein Tabellenwert dar und wird nur für bestimmte Temperaturen angegeben. Deswegen werden die fehlende Wärmeleitfähigkeitswerte anhand der Interpolation bestimmt.

Da der Speicher ständig durchströmt wird, findet eine erzwungene Konvektion statt. Die erzwungene Konvektion hängt von der Massenstrombilanz des Speichers ab. Für einen Bilanzraum mit mehreren Ein- und Austritten lässt sich eine Massenstrombilanz erstellen. Laut des allgemeinen Massenerhaltungssatz für offene Systeme kann keine Masse verloren gehen. [35, S. 106] Die zeitlich geänderte Masse im Bilanzraum kann aus der Summe eingetretener Massenströme abzüglich der Summe ausgetretener Massenströme berechnet werden:



$$\frac{dm_{BR}}{dt} = \sum_i \dot{m}_{e,i} - \sum_j \dot{m}_{a,j}$$

$$\dot{m}_{BR} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4$$

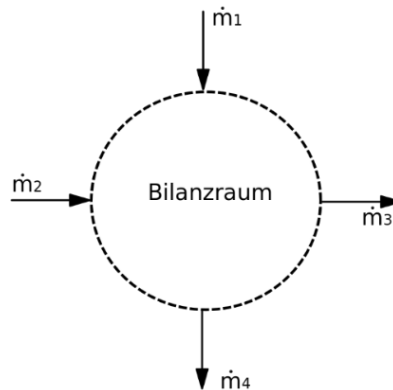


Abbildung 21: Massenstrombilanz [36]

Für speicherinterne Massenströme gilt folgendes:

$$\dot{m}_{oben} = \dot{m}_{mitte} = \dot{m}_{unten} = \dot{m}_s$$

$\dot{m}_{oben}$  = Massenstrom durch obere Speicherschicht in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\dot{m}_{mitte}$  = Massenstrom durch mittlere Speicherschicht in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\dot{m}_{unten}$  = Massenstrom durch untere Speicherschicht in  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Für Schichten mit externen Anschlüssen müssen die externen Wärmeströme zusätzlich berücksichtigt werden. Für die Bestimmung des Energieaustausches zwischen den Schichten von oben nach unten müssen effektive Massenströme bestimmt werden. Wenn der Vorlaufmassenstrom vom BHKW größer als der Vorlaufmassenstrom des Verbrauchers ist, findet eine erzwungene Konvektion über die Speicherhöhe statt, die von oben nach unten ausgerichtet ist (siehe Abb. 22). Der effektive Massenstrom im Speicher lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_B - \dot{m}_L$$

$\dot{m}_B$  = Vorlaufmassenstrom vom BHKW in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\dot{m}_L$  = Rücklaufmassenstrom zum Verbraucher in  $\text{m}^3/\text{s}$ .

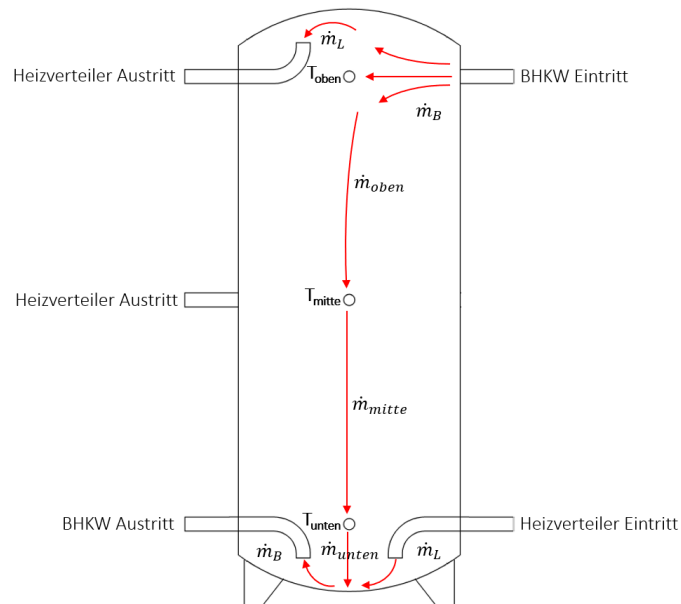


Abbildung 22: Strömungen innerhalb des Speichers bei  $\dot{m}_B > \dot{m}_L$  (eigene Darstellung)

Wenn der Vorlaufmassenstrom vom BHKW geringer als der Vorlaufmassenstrom zum Verbraucher ist, richtet sich die erzwungene Konvektion von unten nach oben (siehe Abb. 23). Dadurch entsteht ein negativer effektiver Massenstrom und der Speicher kühlt sich ab.

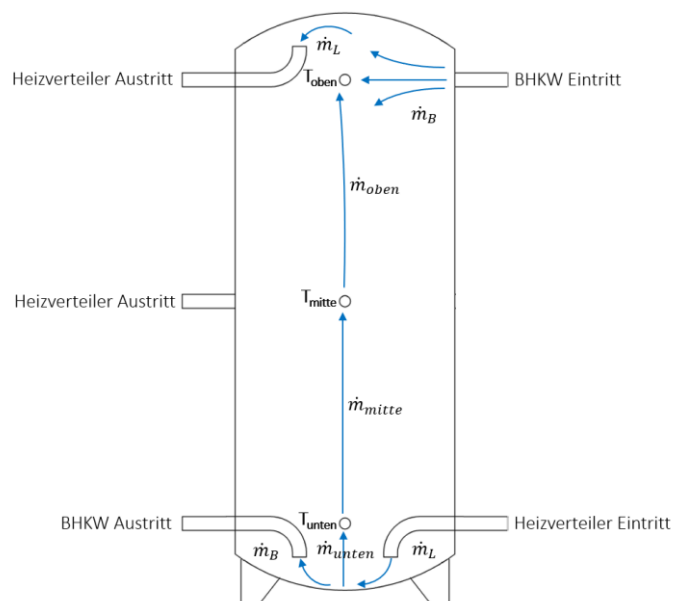


Abbildung 23: Strömungen innerhalb des Speichers bei  $\dot{m}_B < \dot{m}_L$  (eigene Darstellung)

Die erzwungene Konvektion in einer Schicht kann anhand folgender Formel berechnet werden:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{oben} \cdot c_p \cdot (T_o - T_m) + \dot{m}_{mitte} \cdot c_p \cdot (T_m - T_u) = \dot{m}_s \cdot c_p \cdot (T_o - T_u)$$

Die freie Konvektion findet immer von oben nach unten statt, da sie nur durch physikalische Eigenschaften des Speichermediums beeinflusst wird. Die Ausrichtung des Wärmestroms bei der erzwungenen Konvektion ist von Massenströmen abhängig und kann sowohl von oben nach unten, als auch von unten nach oben über die Speicherhöhe ausgerichtet werden.

### 3.3 Bildung der Temperaturschichtung

Wie oben erwähnt, hängt die Temperaturspreizung neben der inneren Wärmeleitung und der Konvektion auch von der hydraulischen Einbindung in das System ab. Jeder Speicher am Energiecampus verfügt neben den Temperaturfühleranschlüssen auch noch über fünf Betriebsanschlüsse (siehe Abb. 24) und wird an zwei Wärmeenergieerzeuger sowie an einen Heizkreisverteiler angeschlossen. Der Speicher 6 verfügt im Gegensatz zu den Speichern 4 und 5 über sechs Betriebsanschlüsse.

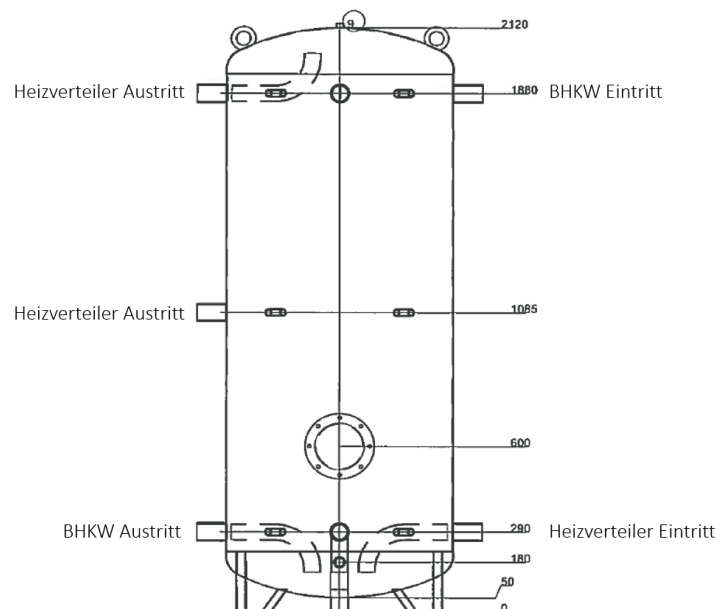


Abbildung 24: Anschlüsse des Pufferspeichers [15]

Als Wärmeerzeuger dienen ein BHKW und eine Wärmepumpe. Bei weiteren Untersuchungen wird das Wärmespeicherungssystem nur mit dem BHKW betrieben. Die aktuelle schematische Systemanbindung ist in Abbildung 25 dargestellt:

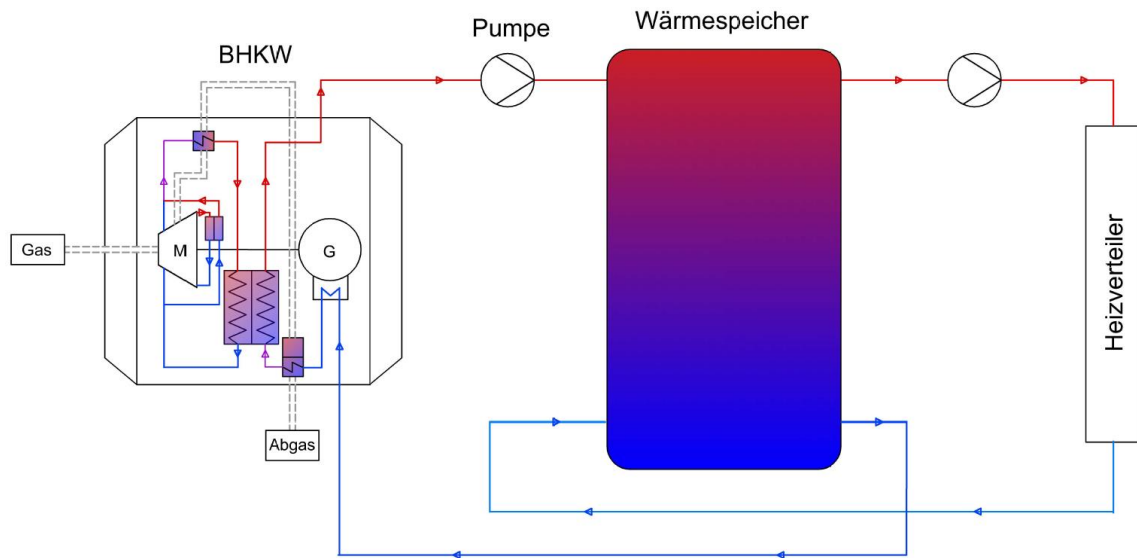


Abbildung 25: Systemanbindung (eigene Darstellung)

Beim Aufbau der Wärmespeicheranlage wurde vorgesehen, dass sie als ein Schichtspeicher funktioniert. Ein Schichtspeicher verfügt über eine klare Temperaturschichtung bzw. Temperaturdifferenz des Wassers über die Speicherhöhe. Die Temperaturschichtung innerhalb des Speichers hängt von den angeschlossenen Systemen und ihrer Betriebsweise ab. Für die Bildung der Temperaturschichten darf das warme Wasser mit dem kalten Wasser innerhalb des Speichers nicht durchmischt werden. Da die Dichte des Warmwassers geringer als die des kalten Wassers ist, befindet sich die warme Schicht oben und die kalte Schicht unten. Deswegen wird beim Beladen das warme Wasser von oben in den Speicher eingespeist und dafür die entsprechende Menge an kaltem Wasser aus dem unteren Speicherbereich entnommen. [31, S. 37] Bei einem Wärmebedarf wird der Speicher gleichzeitig von oben aber vom anderen Anschluss zum Heizverteiler entladen. Wegen der Abkühlung durch Verbrauchs- und Transportverluste besitzt der Heizrücklauf eine niedrige Temperatur und wird entsprechend der festgestellten Temperaturschichtung durch den unteren Anschluss in den Speicher zurückgeströmt. Also finden im Speicher zwei einseitige Wasserströmungen in oberen und unteren Bereichen statt (siehe Abb. 26).

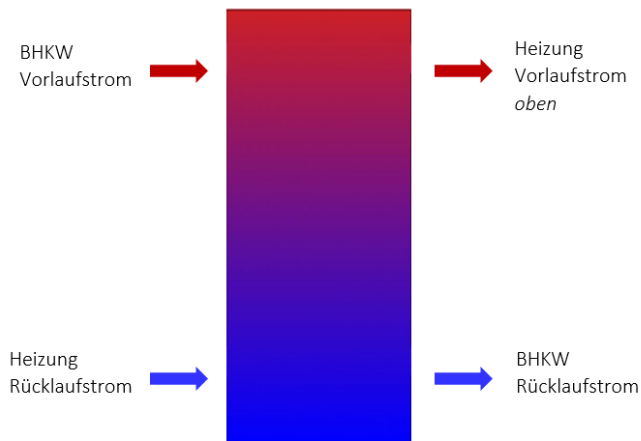


Abbildung 26: Strömungen innerhalb des Speichers (eigene Darstellung)

Eine optimale Schichtung innerhalb des Speichers beeinflussen maßgeblich folgende Effekte:

1. Wärmeverluste an die Umgebung;
2. Vertikale Wärmeleitung des Wassers von warmen zu kalten Schichten;
3. Natürliche Konvektion durch Wärmeleiteffekte und erzwungene Konvektion durch Be- und Entladevorgänge des Speichers.

Die Temperaturschichtung innerhalb des Speichers hat eine positive Auswirkung auf die Systemeffizienz:

1. Da das Wasser zur Heizung aus dem oberen Bereich des Speichers entnommen wird, besitzt das eine hohe Temperatur und kann sofort zu den Verbrauchern geführt werden, ohne dass in einem zusätzlichen Wärmeerzeuger aufgeheizt werden muss. [31, S. 37]
2. Der Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers kann durch ein geringes Rücklauftemperaturniveau verbessert werden. Im BHKW wird die Kondensationswärme des Wasserdampfs im Abgas genutzt, die bei der Verbrennung entsteht. Bei Erdgas sind dies rund 1,61 Wasser je m<sup>3</sup> Gas, da Erdgas einen hohen Anteil an Wasserstoff in chemisch gebundener Form enthält. Die Kondensation des Wasserdampfes beginnt, wenn das Abgas auf unter 55°C abgekühlt wird. [31, S. 38] Die Brennwertnutzung im BHKW am Energiecampus beginnt ab circa 55°C Rücklauftemperatur. [5, S. 23] Deswegen ist es notwendig das

Wasser nur vom unteren kalten Bereich des Speichers zu entnehmen, sowie die passenden Anforderungen der Speichertemperatur einzustellen, damit das Wasser in den zulässigen Temperaturgrenzen liegt. Die Rücklaufemperatur erreicht ihren minimalen Wert nur zu Beginn des Aufheizvorganges, danach steigt sie langsam an. Die Anforderungen für das Ein- und Ausschalten des BHKWs am Energiecampus werden anhand von Temperaturgrenzen innerhalb der Speicher gesetzt. Die Anforderungen können auch variabel versuchsorientiert eingestellt werden. Zurzeit gelten für die Wärmespeicher folgende Temperaturgrenzen:

- wenn die untere Speichertemperatur 60°C erreicht, wird die Beladung abgeschlossen und das BHKW fährt herunter;
- wenn die Wassertemperatur im oberen Bereich des Speichers 30°C beträgt, wird das BHKW wieder eingeschaltet.

3. Die Temperaturschichtung kann auch dazu dienen, dass das aus verschiedenen Schichten entnommene Wasser zu den Verbrauchern zugeführt wird, die unterschiedliche Temperaturniveaus benötigen. Zum Beispiel solche Heizungselemente, wie die Bauteilaktivierung und die Deckenstrahlplatten benötigen eine niedrigere Temperatur als ein Heizkörper. Am Energiecampus ist es jedoch nicht vorgesehen. Die Rohre wurden so ausgelegt, dass das Warmwasser von den oberen und mittleren Schichten entnommen, aber nicht zu jedem Verbraucher separat zugeführt werden kann. Das Heizwasser strömt von den Speichern zum Heizverteiler, wo es an die Verbraucher verteilt wird. Deswegen versorgt die Anlage die Verbraucherheizkreise entweder nur mit dem heißen Wasser oder nur mit dem Wasser auf einem niedrigen Temperaturniveau. Deswegen wird bei Verbrauchern eine Rücklaufbeimischung eingesetzt.

In der Realität kommen ideal geschichtete Wärmespeicher jedoch nicht vor. Die Bildung der Temperaturschichtung in realen Anlagen weichen vom idealen Fall ab. Im folgenden Kapitelabschnitt wird die Temperaturverteilung in der realen Speicheranlage am Energiecampus dargestellt.

### 3.4 Temperaturverteilung in der realen Speicheranlage

Die Temperaturverteilung in der realen Speicheranlage wird anhand des Beispiels von Speicher 4 am Energiecampus dargestellt.

Um die Prozesse, die innerhalb des Speichers stattfinden, sowie das Temperaturverhalten im Laufe der Zeit beschreiben zu können, wird der Speicherbetrieb in zwei Phasen aufgeteilt. Während der ersten Phase wird der Speicher mit heißem Wasser vom BHKW beladen sowie gleichzeitig zum Heizverteiler entladen. Während der zweiten Phase beendet sich der Beladungsvorgang vom BHKW, da die untere Speichertemperatur den Sollwert erreicht und der Speicher wird nur zum Heizverteiler entladen.

Abhängig von der Phase des Be- und Entladezyklus wird der Speicher mit unterschiedlichen Wasservolumen durchströmt. Das Durchflussvolumen hat die größte Auswirkung auf die Temperatur und die Schichtbildung innerhalb des Speichers.

Für die Analyse der Bildung der Temperaturschichtung in der realen Anlage sind folgende Parameter relevant:

- Speicherschichttemperaturen, die das Temperaturverhalten innerhalb des Speichers im Laufe der Zeit sichtbar machen.
- Beladungsvolumenstrom vom BHKW sowie Entladungsvolumenstrom zum Heizverteiler, die die in den Speicher zugeführten und von ihm abgeführten Wassermengen darstellen.
- Die Außentemperatur, die einen direkten Bezug auf den Wärmebedarf hat.
- Rückläufe der Verbraucher, die den Heizungsrücklauf bilden.
- Natürliche und erzwungene Wärmeströme, die speicherinterne Wärmeübertragungsprozesse beschreiben.

#### *Phase 1 (8:26 – 11:01)*

Beim Einschaltzeitpunkt von 30°C wird die Beladung des Speichers angefordert. Während der ersten Phase lassen sich zwei einseitige Strömungen in den oberen und unteren Bereichen des Speichers unterscheiden (siehe Abb. 26).

Zunächst werden der Wärmestrom bei der natürlichen sowie erzwungenen Konvektion nach dem Prinzip, der in Kapitelabschnitt 3.2 beschrieben ist, berechnet. Der Wärmestrom von oben nach unten kann als ein positiver Wärmestrom bezeichnet werden. Das bedeutet, bei der freien Konvektion, dass die obere Temperatur höher als die unteren Temperaturen ist; bei der erzwungenen Konvektion, dass der Vorlaufvolumenstrom vom BHKW größer als der Vorlaufvolumenstrom vom Heizverteiler ist. Die negativen Werte der Wärmeströme entsprechen den umgekehrten Bedingungen.

Aus den Berechnungsergebnissen kann erschlossen werden, dass die freie Konvektion im Vergleich zu der erzwungenen Konvektion eine tausendfach geringere Leistung aufweist, wodurch sie bei der Analyse der speicherinternen Temperaturverteilung vernachlässigt werden kann (siehe Abb. 27). Die Speicherschichttemperaturen werden maßgeblich durch einen erzwungenen Wärmestrom gebildet (siehe Abb. 28).

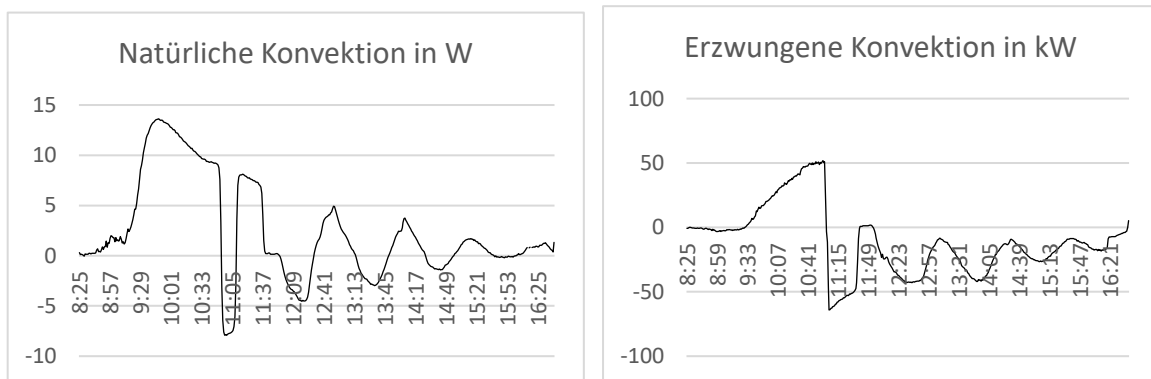


Abbildung 27: natürliche und erzwungene Konvektion (eigene Darstellung)

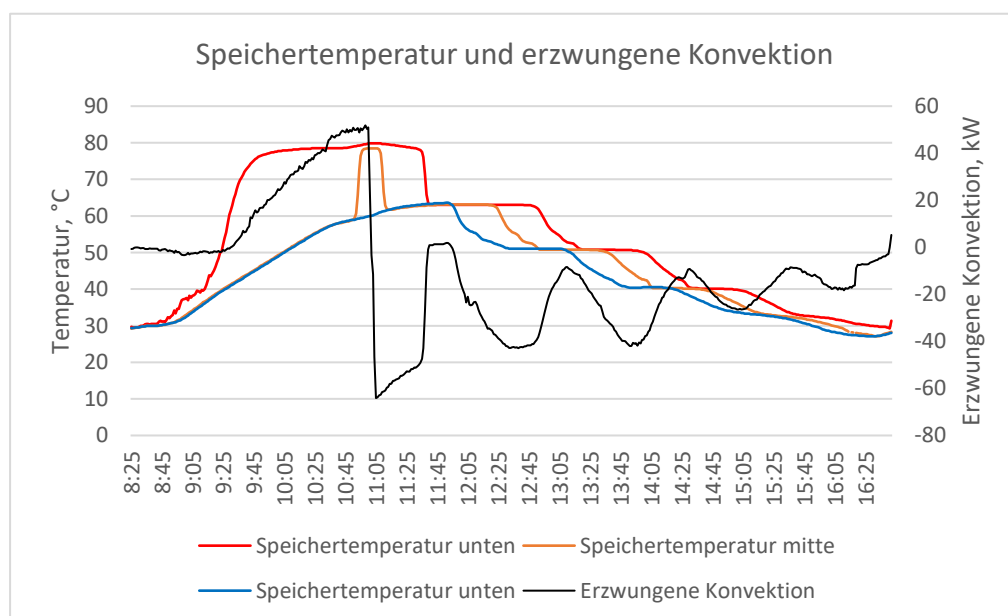


Abbildung 28: Speicherschichttemperaturen und erzwungene Konvektion (eigene Darstellung)



In der Abbildung 29 kann man zu Beginn sehen, dass die obere Temperatur stark ansteigt, während die mittlere und untere Temperatur etwas langsamer zunehmen. Der Grund dafür ist der Unterschied zwischen den Volumenströmen von der BHKW- und Heizverteilerseite. In Abbildungen 30 und 31 kann man sehen, dass der Beladungsvolumenstrom vom BHKW zunächst geringer als der Entladungsvolumenstrom zum Heizverteiler ist. Das bedeutet, dass die größte Menge des in den Speicher zugeführten warmen Wassers sofort entströmt wird und nur wenig Wärme an die unterliegenden Speicherschichten abgibt. Die unteren und mittleren Temperaturen steigen durch den stetig wärmer werdenden Rücklauf vom Heizverteiler.

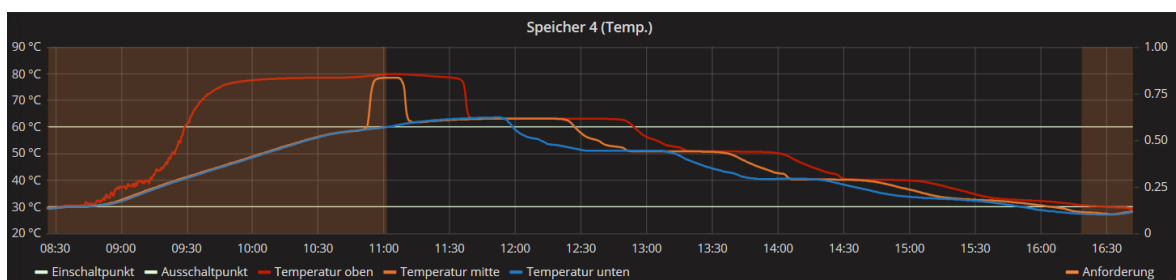


Abbildung 29: Speicherschichttemperaturen [37]

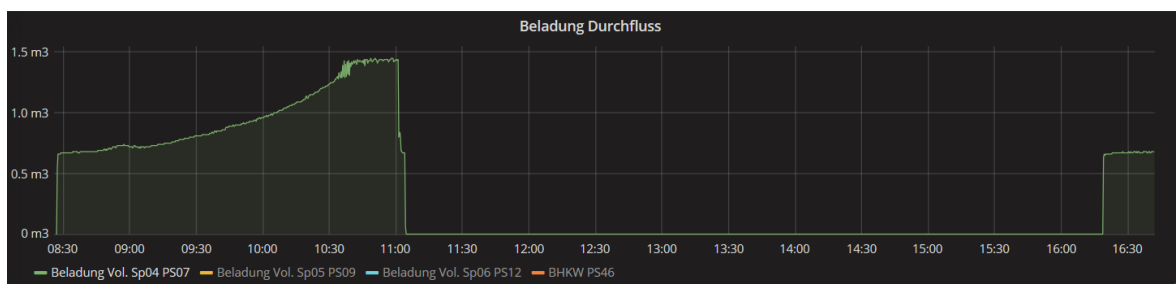


Abbildung 30: Beladungsvolumenstrom vom BHKW

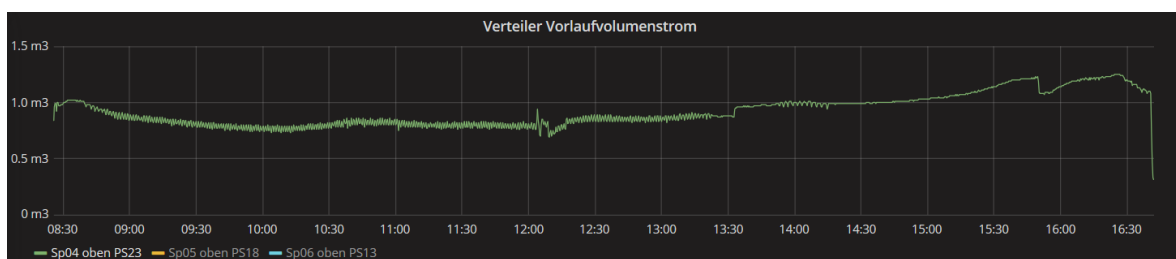


Abbildung 31: Entladungsvolumenstrom zum Heizverteiler

Kurz vor Ende der Beladung steigt die mittlere Temperatur extrem an. Dies kann durch den starken Anstieg des Beladungsvolumenstroms vom BHKW erklärt werden. Der Beladungsvolumenstrom überwiegt den Entladungsvolumenstrom, wodurch mehr Warmwasser von oben nach unten gedrückt wird. Der starke Anstieg im

Beladevolumenstrom resultiert aus einem Anstieg der BHKW Rücklauf­temperatur. Die Sollleistung des BHKW wird ständig geregelt und bleibt immer konstant bei 35,5 kW. Deswegen nimmt die Temperaturdifferenz beim Anstieg der Rücklauf­temperatur ab und dadurch steigt der Beladungsvolumenstrom. (siehe Abb. 32)

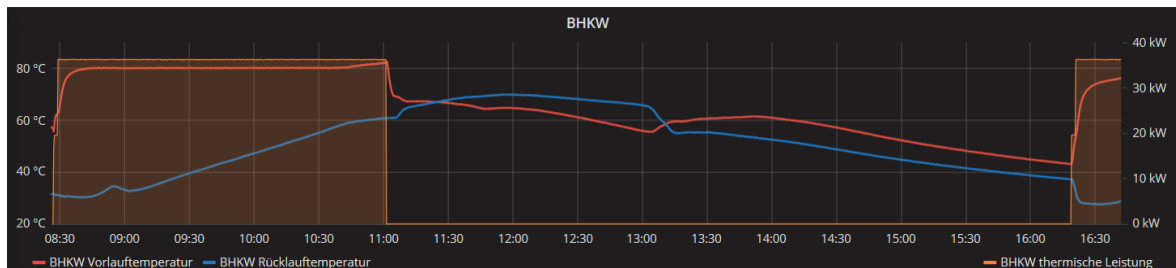


Abbildung 32: Vor- und Rücklauf­temperatur sowie thermische Leistung des BHKW

Die leichte Minderung des Entladungsvolumenstroms kann durch die im ersten Kapitel beschriebene Regelung des Heizungssystems erklärt werden. Infolge des Rücklauf­beimischungsvorgangs wird zum Einen bei hohen Vorlauf­temperaturen weniger Heizungswasser vom Speicher benötigt. Zum Anderen kann man in den folgenden Abbildungen 33 - 35 sehen, dass die Außenlufttemperatur steigt, wodurch der Wärmebedarf der Verbraucher sinkt und eine neue Solltemperatur für die jeweiligen Heizkreise eingestellt wird. Das System passt sich auf den aktuellen Wärmebedarf an und stellt die Beimischungsventile auf ein niedriges Niveau um. Bei der BTA-Regelung ist dieser Vorgang schwieriger nachvollziehen als bei den Heizkreisen EG und OG, da die Beimischungswerte sich stark schwanken (siehe Abb. 36). Die DSP-Regelung wird nicht berücksichtigt, da der DSP-Verbraucher während der Versuchsdurchführung außer Betrieb war.

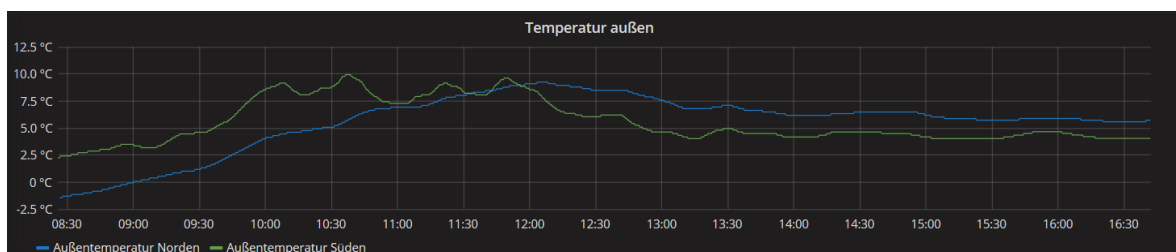


Abbildung 33: Außentemperatur am Norden und am Süden

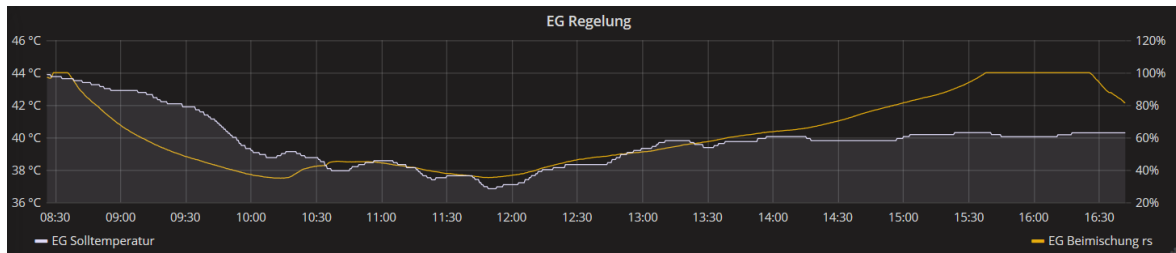


Abbildung 34: Solltemperatur und Regelsollwert des Beimischungsventils des EG Heizkreises

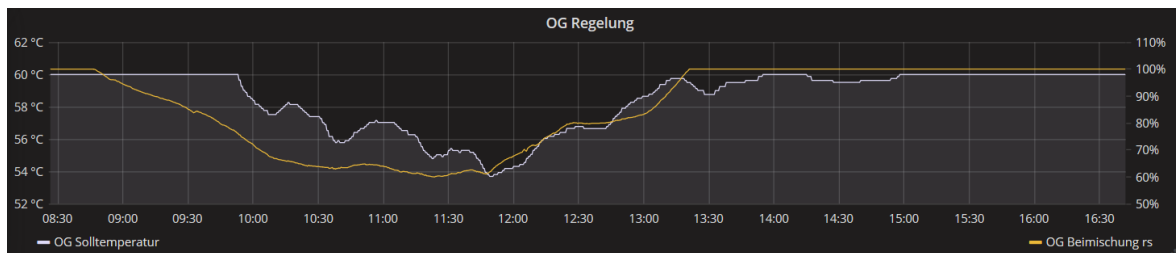


Abbildung 35: Solltemperatur und Regelsollwert des Beimischungsventils des OG Heizkreises

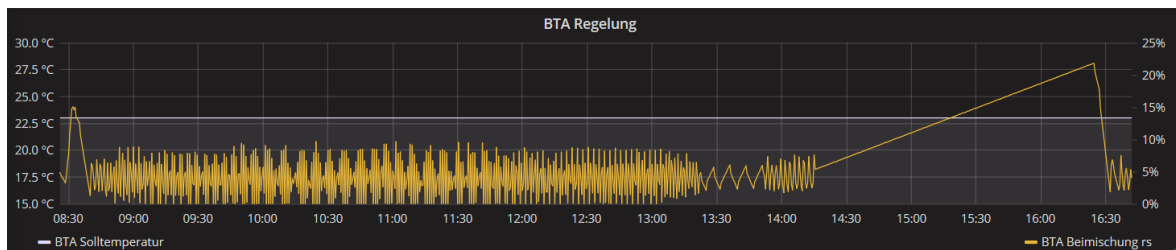


Abbildung 36: Solltemperatur und Regelsollwert des Beimischungsventils des BTA Heizkreises

Wenn die untere Speichertemperatur den Sollwert von 60°C erreicht, ist der Beladungsvorgang zu Ende und die zweite Phase beginnt.

### *Phase 2 (11:01 – 16:18)*

Während der zweiten Phase wird der Speicher nur zum Heizverteiler entladen, wodurch sich nur eine erzwungene Strömung von unten nach oben bildet (siehe Abb. 23).

Nach Abschluss der Beladung findet zwischen der ersten und zweiten Phase eine Übergangsphase statt und das System versucht einen stabilen Betrieb zu erreichen. Während dieser Übergangsphase wird die Temperaturschichtung sehr schnell zerstört und kann eine starke Senkung der mittleren und oberen Temperaturen beobachtet werden.

Eine Beimischung der Heizkreise im EG, OG sowie der Bauteilaktivierungsanlage und Deckenstrahlplatten findet direkt nach der Verteilung statt. Die Durchflussmesser dieser Heizkreise befinden sich vor dem Bypass-Rohr. Die Beimischung des RLT-Heizkreises erfolgt

auf dem Dach. Deswegen befinden sich die Messensoren des RLT-Heizkreises außerhalb des Beimischungskreises.

In Abbildung 37 kann man sehen, dass der Rücklauf des RLT-Heizkreises höher als die der anderen Heizkreise ist.

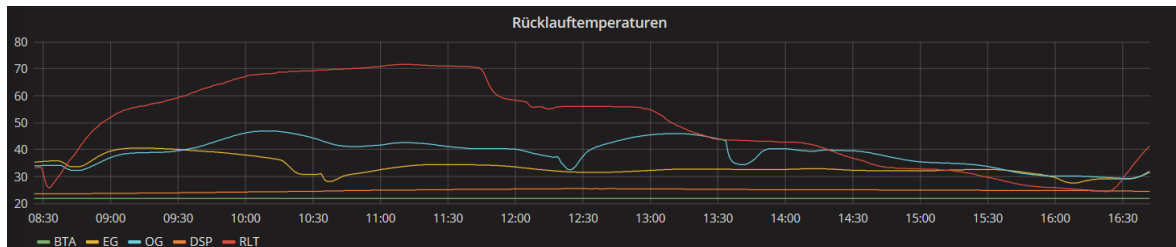


Abbildung 37: Rücklauftemperaturen der Heizkreise

Da sich der Durchflussmesser des RLT-Heizkreises nach dem Bypass-Rohr befindet, bildet sein Rücklaufvolumenstrom den größten Teil des Heizungsrücklaufs aus.

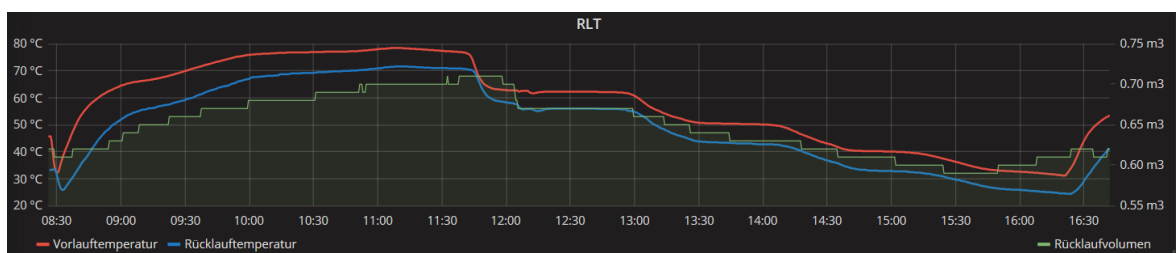


Abbildung 38: Vor- und Rücklauftemperatur sowie Rücklaufvolumen der RLT

Je nach Wärmebedarf beträgt das RLT-Rücklaufvolumen im durchgeführten Versuch 48% bis 93% des Heizungsrücklaufvolumens. Die Rücklauftemperatur des Heizkreisverteilers kann durch die volumengewichtete Errechnung der Heizkreisrücklauftemperaturen bestimmt werden. Die RLT-Rücklauftemperatur würde dann eine größere Auswirkung auf die Rücklauftemperatur des Heizkreisverteilers sowie auch auf die speicherinterne Temperaturverteilung als andere Verbraucher haben.

$$T_{L,RL} = \sum T_{n,RL} \cdot x_n$$

$T_{L,RL}$  = Rücklauftemperatur des Heizkreisverteilers in K;

$T_{n,RL}$  = Rücklauftemperatur des einzelnen Heizkreises in K;

$x_n$  = Volumengewichtung des einzelnen Heizkreises.

$$x_n = \frac{\dot{V}_{n,RL}}{\dot{V}_L} 100\%$$

$\dot{V}_{n,RL}$  = Rücklaufvolumenstrom des einzelnen Heizkreises in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\dot{V}_L$  = Volumenstrom des Heizverteilers in  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Hier gilt folgendes Prinzip:

Nachdem die obere Speichertemperatur infolge des Beladungsabbruchs abnimmt, sinkt die Vorlauftemperatur des RLT-Heizkreises mit Zeitverzögerung von einigen Minuten (siehe Abb. 39).

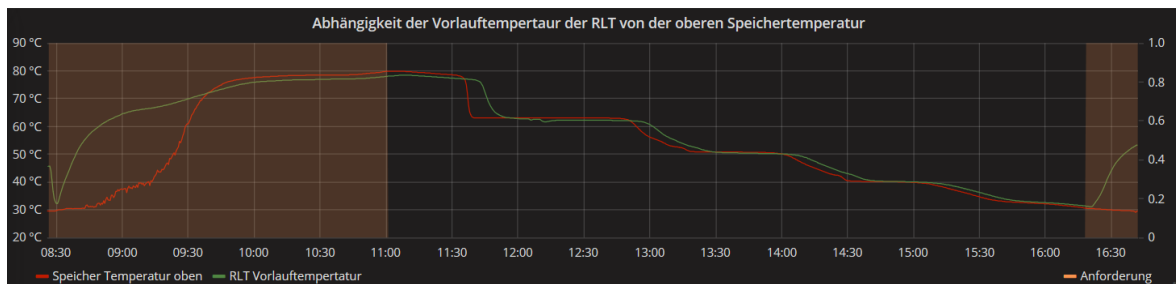


Abbildung 39: Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der RLT von der oberen Speichertemperatur

Danach nimmt die Rücklauftemperatur des RLT-Heizkreises infolge der Senkung der Vorlauftemperatur sowie der Wärmeverbrauchsverluste ab und strömt zurück in den Speicher, wodurch eine Senkung der unteren Speichertemperatur verursacht wird (siehe Abb. 40). Infolge der erzwungenen Wärmeströmung die sich vom unteren Speicherbereich in den oberen Bereich richtet, sinkt auch die obere Speichertemperatur.

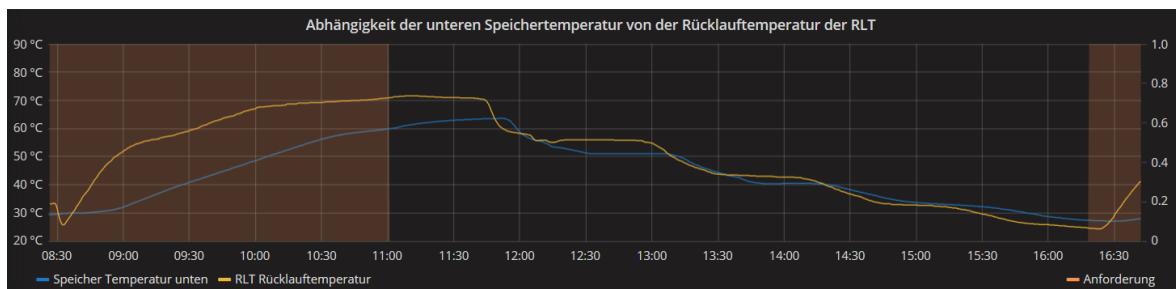


Abbildung 40: Abhängigkeit der unteren Speichertemperatur von der Rücklauftemperatur der RLT

So kann gesagt werden, dass die Vor- und Rückläufe des Speichers und des RLT-Heizkreises stark voneinander abhängig sind.

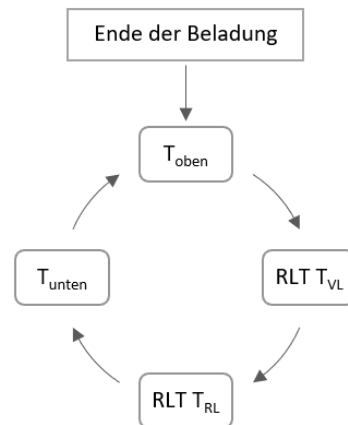
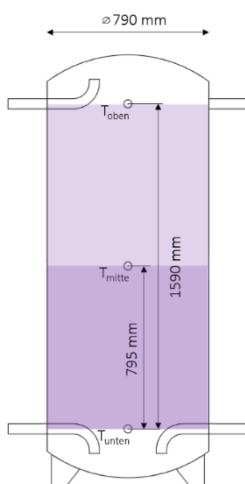


Abbildung 41: Abhängigkeit der Speichertemperaturen von Rücklauftemperatur der RLT

In ungefähr gleichen Zeitabschnitten findet ein Temperatenausgleich innerhalb des Speichers statt (siehe Abb. 43). Während der zweiten Phase erfolgt die Strömung von unten nach oben, wodurch die Warmwasserfront infolge des erzwungenen Konvektionseffekts sich auch von unten nach oben verschiebt.

Um das Temperatenausgleich erklären zu können, muss nicht das Volumen des ganzen Speichers berücksichtigt werden, sondern das Volumen zwischen den Temperatursensoren, weil sie als Ausgangspunkte für die Temperaturoswertung dienen. Das Speichervolumen zwischen den unteren und mittleren sowie zwischen den mittleren und oberen Temperatursensoren beträgt 389,7 Liter, und zwischen den unteren und oberen entsprechend 779,3 Liter.



$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} h$$

$d$  =Speicherdurchmesser in m;

$h$  =Höhe des betrachteten Speicherbereichs in m.

$$V_{unten \rightarrow mitte} = V_{mitte \rightarrow oben} = 389,7 \text{ l}$$

$$V_{unten \rightarrow oben} = 779,3 \text{ l}$$

Abbildung 42: Speichervolumen zwischen Temperatursensoren (eigene Darstellung)

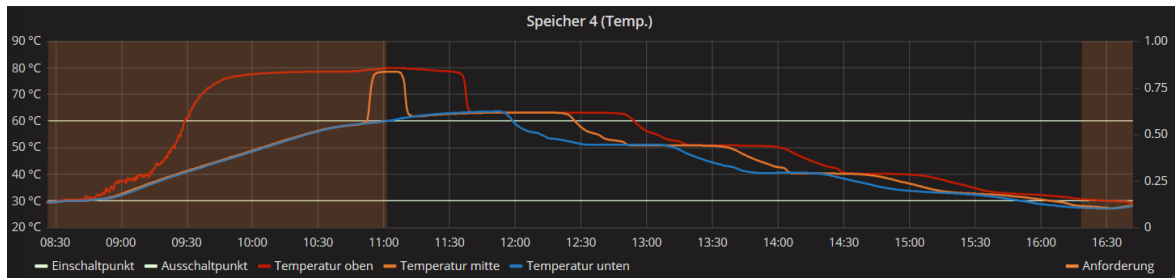


Abbildung 43: Speicherschichttemperaturen

Die untere Temperatur beginnt ungefähr um 11:56 Uhr zu sinken, um 12:25 sinkt die mittlere Temperatur und um 12:51 folgt die Senkung der oberen Temperatur. In 29 Minuten (von 11:56 bis 12:25) nach dem Senkungsbeginn der unteren Temperatur beginnt die mittlere Temperatur auch zu sinken, bis sie ausgeglichen werden. In dieser Zeit wird in den Speicher 400,3 Liter eingespeist, was mit Ausnahme einer kleinen Abweichung dem Speichervolumen zwischen den unteren und mittleren Messsensoren entspricht. Die mittlere Schicht gibt ihre Wärme an das von unten strömende Wasser ab und kühlt sich dadurch ab. Das durch die mittlere Speicherschicht erwärmte Wasser wird nach oben transportiert. In 55 Minuten (zwischen 11:56 und 12:51) nach der Senkung der unteren Temperatur sinkt die obere Temperatur. In dieser Zeit strömen durch den Speicher 770,8 Liter Wasser, was ungefähr dem Speichervolumen zwischen den unteren und oberen Messsensoren entspricht. Das von unten strömende Wasser wird durch die obere Speicherschicht erwärmt und dann zum Heizkreisverteiler geströmt. Da die Werte der durchströmten Wassermengen und die Werte der Speichervolumina zwischen den Messsensoren ungefähr gleich sind, kann gesagt werden, dass der Temperatenausgleich, durch den an die Speichergröße bezogenen Volumenstrom, verursacht wird. Dieser Vorgang wiederholt sich mit ungefähr gleichem Zeitabstand, bevor der Speicher sich komplett abkühlt. Danach beginnt erneut die erste Phase des Speicherbetriebs.

Für die Berechnung der thermischen Leistung sowie der Effizienz des Speichers am Energie-Campus, ist es erforderlich, einen Temperaturfühler auf den Heizungsrücklauf zu installieren.

Die Temperaturschichtung innerhalb des Speichers hat eine positive Auswirkung auf das ganze Heizungssystem. Die Temperaturschichtung wird maßgeblich durch die in dem Speicher zugeführten und die von ihm abgeführten Volumenströme gebildet.

## 4 Überprüfung verschiedener Schaltmöglichkeiten des Wärmespeicherungssystems

Die drei Wärmespeicher am Energie-Campus können entweder parallel oder in Reihe betrieben werden. In Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche der Parallel- und Reihenschaltung durchgeführt. Bevor der Versuchsdurchführung muss die Anlage entsprechend der gewünschten Schaltung eingestellt werden. Dafür müssen alle Ventile innerhalb der Wärmespeicherungsanlage richtig angepasst werden sowie ein Zustand in der GLT-Software eingestellt werden.

### *Externe Steuerung*

Die externe Steuerung wird am Energie-Campus über die Zenon GLT-Software oder den Cybus realisiert. Die externe Steuerung erlaubt die Motorventile automatisch einzustellen, ohne manuell einzugreifen. Es gibt fünf Zustände für die Wärmespeicherungsanlage, die eine automatische Ventilansteuerung zur Folge haben:

1. Beladung/Entladung
2. Beladung BHKW
3. Beladung WP
4. Beladung Heizstäbe
5. Entladung

Beim Zustand „Beladung/Entladung“ werden die drei Speicher in einer Art Reihenbetrieb verschaltet. Diese Betriebsweise entspricht jedoch nicht der ursprünglich gewünschten Reihenschaltung, welche im Laufe dieses Kapitels beschrieben wird.

Bei der externen Steuerung kann auch der Wärmeerzeuger gewählt werden. Bei den Zuständen „Beladung BHKW“, „Beladung WP“ und „Beladung Heizstäbe“ erfolgt die Beladung über den entsprechenden Wärmeerzeuger.

Beim Zustand „Entladung“ erfolgt keine Beladung vom Wärmeerzeuger und die Speicher werden nur zum Heizverteiler entladen.



Darüber hinaus lassen sich mithilfe der externen Steuerung die Beladungsanforderungen bzw. die Temperaturen, bei denen das BHKW ein- und ausgeschaltet wird, für jeden Speicher einstellen.

### *Regulierventile*

Für die automatisierte Steuerung der Wärmespeicherungsanlage am Energie-Campus werden Motorventile der Firma Belimo eingesetzt. Ein Motorventil besteht aus einem Drehantrieb sowie einem Regelkugelhahn. Auf den Rohrleitungen von Speichern zum Heizverteiler sind 3-Wege-Regelkugelhähne installiert. Andere Regulierventile stellen 2-Wege-Regelkugelhähne dar.



Abbildung 44: Drehantrieb SR24A, 2-Wege- und 3-Wege-Regelkugelhahn der Firma Belimo

Die Ventileinstellung kann in GLT-Software oder in Grafana überwacht werden. Für die Ventileinstellungen gelten folgende Zustände, die in der Zenon GLT-Software sowie in Grafana bei Dashboard Ventile angezeigt werden:

Tabelle 10: Bedeutung des Wertes der Ventileinstellung

<i>Ventileinstellung</i>	<i>Auf</i>	<i>Zu</i>
Ventil Auf	1	0
Ventil Zu	0	1
	<i>Störung</i>	<i>Keine Störung</i>
Ventil Zustand	1	0
	<i>Mitte</i>	<i>Oben</i>
Ventil Mitte	1	0
Ventil Oben	0	1

Bei Ventil Zustand leuchtet "1", wenn sich eine äußere Störung ergibt, z. B. beim Handeingriff.

Die 3-Wege-Kugelhähne können nicht komplett zugemacht werden, da sich die installierten Drehantriebe nicht um 180° drehen können (siehe Abb. 45). Deswegen sind die Speicher immer entweder von der oberen oder von der mittleren Schicht zum Heizverteiler entladen. Damit keine Entladung vom Speicher zum Heizverteiler erfolgt, müssen Bohrventile manuell zugemacht werden.

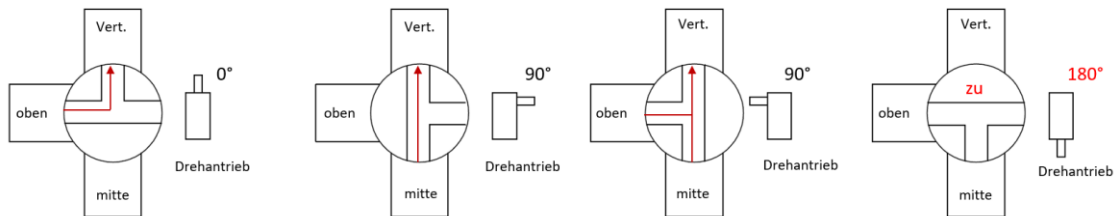


Abbildung 45: 3-Wege-Kugelhahn Zustände (eigene Darstellung)

### 4.1 Parallelschaltung

Bei einer Parallelschaltung erfolgt die Beladung sowie Entladung aller drei Wärmespeicher parallel.

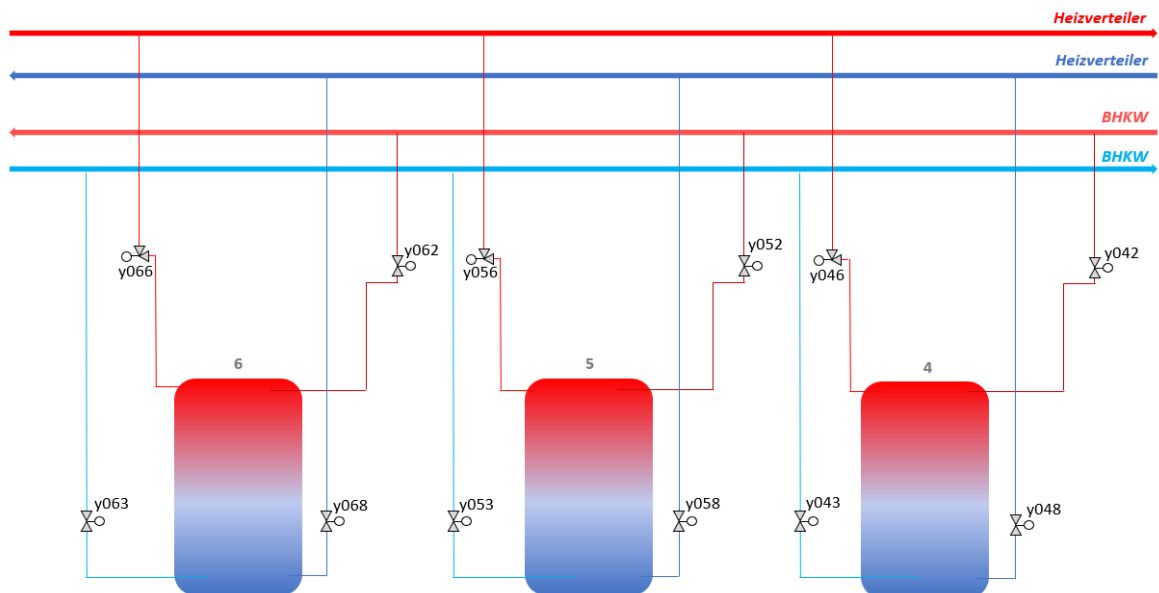


Abbildung 46: Parallelschaltungsschema (eigene Darstellung)

### 4.1.1 Versuchsvorbereitung

#### *Externe Steuerung*

Die Parallelschaltung kann mithilfe der Zenon GLT-Software komplett automatisch realisiert werden. Bei Zenon GLT-Software muss für jeden Wärmespeicher Zustand „Beladung BHKW“ sowie die gewünschten Beladungsanforderungen eingestellt werden.

Da im BHKW die Kondensation des Wasserdampfs im Abgas bei 55°C beginnt, gilt eine Anforderung für die untere Temperatur der Speicher am Energie-Campus von 60°C. Die Anforderung für die obere Temperatur beträgt 30°C, damit das Wasser nicht zu kalt ist und Wärmebedarf gedeckt werden kann.

Bei Zenon GLT-Software müssen folgende Parameter eingegeben werden:

Tabelle 11: Externe Steuerung bei der Parallelschaltung

	<i>Zustand</i>	<i>Anforderung</i>
Speicher 4	Beladung BHKW	$T_{\text{unten}} = 60^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{oben}} = 30^{\circ}\text{C}$
Speicher 5	Beladung BHKW	$T_{\text{unten}} = 60^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{oben}} = 30^{\circ}\text{C}$
Speicher 6	Beladung BHKW	$T_{\text{unten}} = 60^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{oben}} = 30^{\circ}\text{C}$

#### *Ventileinstellung*

Bevor der Versuch durchgeführt wird, muss die Einstellung von Ventilen überprüft werden, da die falsche Ventileinstellung zu großen Fehlern führen kann.

Tabelle 12: Ventileinstellung bei der Parallelschaltung

	<i>Ventilkennzeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Ventilzustand</i>
Speicher 4: Ventile	Y041	WP Vorlauf	zu
	Y042	BHKW Vorlauf	auf
	Y043	BHKW Rücklauf	auf
	Y044	WP Rücklauf	zu
	Y046	Entladung zum Verteiler	oben
	Y048	Verteiler Rücklauf	auf
Speicher 5:	Y051	WP Vorlauf	zu
	Y052	BHKW Vorlauf	auf
	Y053	BHKW Rücklauf	auf
	Y054	WP Rücklauf	zu
	Y056	Entladung zum Verteiler	oben

	Y057	Reihenschaltung Sp 5 - Sp 4	zu
	Y058	Verteiler Rücklauf	auf
Speicher 6: Ventile	Y061	Erzeugervorlauf (3-Wege)	zu
	Y062	BHKW Vorlauf	auf
	Y063	BHKW Rücklauf	auf
	Y064	WP Rücklauf	zu
	Y065	WP Vorlauf	zu
	Y066	Entladung zum Verteiler	oben
	Y067	Reihenschaltung Sp6 - Sp 5	zu
	Y068	Verteiler Rücklauf	auf

Nachdem die externe Steuerung sowie die Ventile eingestellt werden, kann der Versuch durchgeführt werden.

Der Versuch der Parallelschaltung wurde in Zeitraum von 17.03.2018 23:23 – 19.03.2018 04:43 durchgeführt.

### 4.1.2 Versuchsergebnisse

Die Beladung des Wärmespeicherungssystems beginnt um 23:52 Uhr.

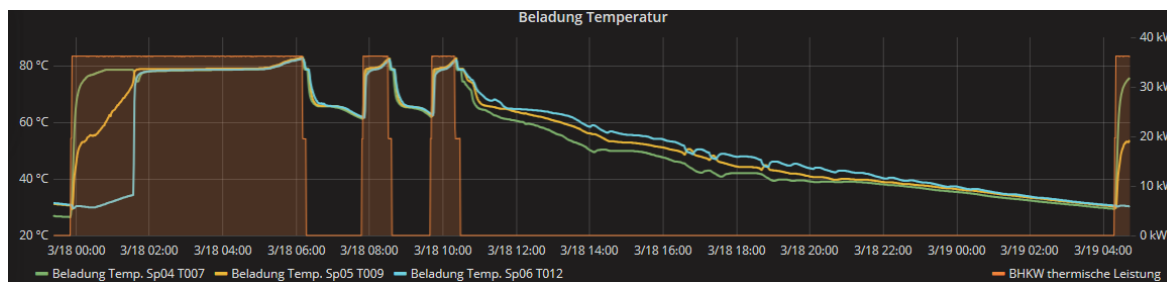


Abbildung 47: Beladungstemperaturen der drei Speicher und thermische Leistung des BHKW

Obwohl am Anfang die Beladung von drei Speichern fast gleichzeitig angefordert wurde, wurden sie trotzdem ungleichmäßig vom BHKW beladen. In Abbildung 48 kann deutlich gesehen werden, dass der Beladungsvolumenstrom zum Speicher 4 am Anfang doppelt so groß als der Volumenstrom zum Speicher 5 ist und der Speicher 6 gar nicht beladen wird.

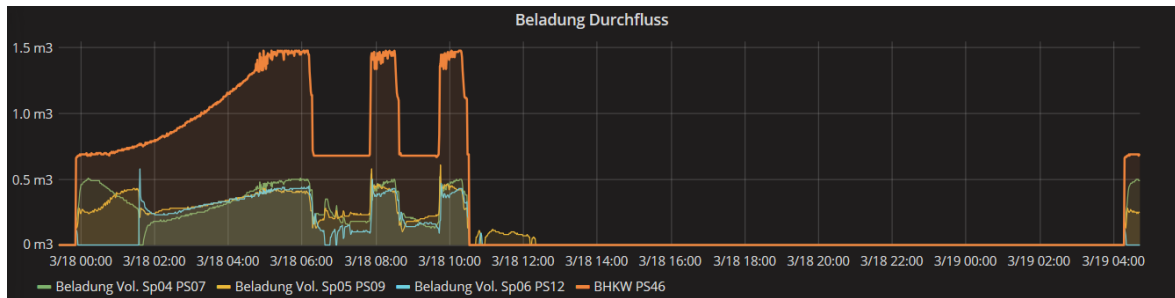


Abbildung 48: Beladungsvolumenströme der drei Speicher und des BHKW

Um 00:58 Uhr nimmt der Volumenstrom zum Speicher 4 ab, während der Volumenstrom zum Speicher 5 steigt. Um 01:35 Uhr steigt der Beladungsvolumenstrom zum Speicher 6 extrem an und der Volumenstrom zum Speicher 4 fällt auf null. Danach stabilisiert sich langsam der Beladungsvorgang der drei Speichern.

Ein weiteres wesentliches Merkmal beim Parallelschaltungsversuch ist, dass die Summe der Beladungsvolumenströme einzelnen Speicher nicht gleich dem Beladungsvolumenstrom des BHKW ist, während der Gesamtdurchfluss vom BHKW im Idealfall immer gleich der Summe der Teildurchflüsse zu den Speichern sein muss. Das Wasservolumen, das in das Rohr reinkommt, muss gleich dem Wasservolumen sein, das rauskommt, weil das Wasser in der Heizungsanlage ein inkompressibles Fluid ist. Eine Volumenänderung könnte nur infolge eines Phasenübergangs des Wassers möglich sein. Dieser findet aber in den Heizungswasserleitungen nicht statt. Dieser Fehler wird mithilfe erneuter Parametrierung der Durchflussmessgeräte sowie andere Maßnahmen eliminiert. Das Verfahren der Messgerätparametrierung sowie sonstige Maßnahmen werden in dem nächsten Kapitel „Verbesserungen für das Wärmespeichersystem“ beschrieben.

In Abbildungen 49, 50, 51 kann man sehen, dass die Beladung des Speichers 5 viel länger gedauert hat, als die Beladung der Speicher 4 und 6.

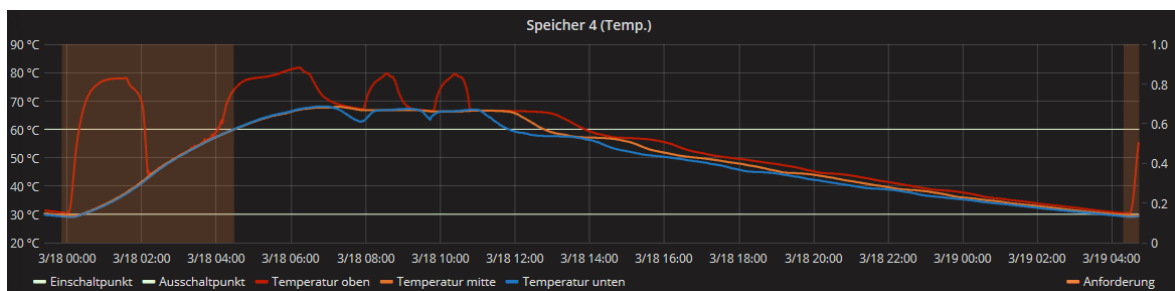


Abbildung 49: Speicher 4 Temperaturen und Anforderung

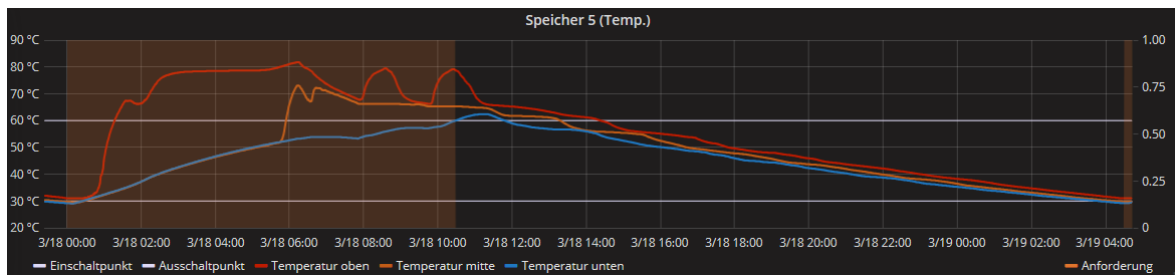


Abbildung 50: Speicher 5 Temperaturen und Anforderung

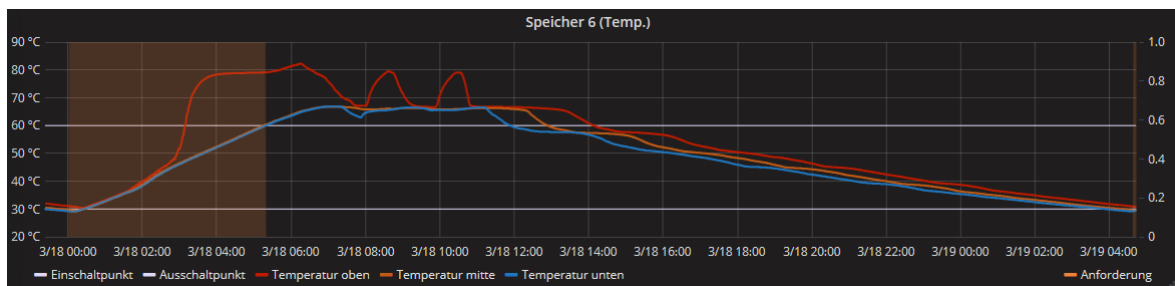


Abbildung 51: Speicher 6 Temperaturen und Anforderung

Tabelle 13: Beladungsdauer der drei Speicher

<i>Beladung</i>	<i>Start</i>	<i>Ende</i>	<i>Dauer</i>
Speicher 4	23:52	04:29	04:37
Speicher 5	00:01	10:29	10:30
Speicher 6	00:02	05:21	05:19

Die dauerhafte Anforderung vom Speicher 5 führt zu den Temperaturschwankungen in anderen Speichern sowie zu einem getackten BHKW-Betrieb. Da nach der Beendigung der Speicheranforderung die Ventile des jeweiligen Speichers nicht automatisch zugemacht werden, werden diese Speicher trotzdem vom BHKW beladen. Die Beladung der schon vollbeladenen Wärmespeicher führt nicht nur zu den Temperaturschwankungen, sondern auch zu einer Erhöhung der unteren Temperatur des Speichers, was eine negative Auswirkung auf die Effizienz des BHKW hat.

Wegen dem Anstieg der unteren Temperaturen in Speicher 4 und 6 steigt Rücklauftemperatur zum BHKW (siehe Abb. 52 und 53). Im BHKW erfolgt auch eine Regelung und wenn die Rücklauftemperatur 60°C überschreitet, wird das BHKW automatisch ausgeschaltet. Wenn die Rücklauftemperatur sich abkühlt, wird das BHKW eingeschaltet, da es eine Anforderung vom Speicher 5 gibt.

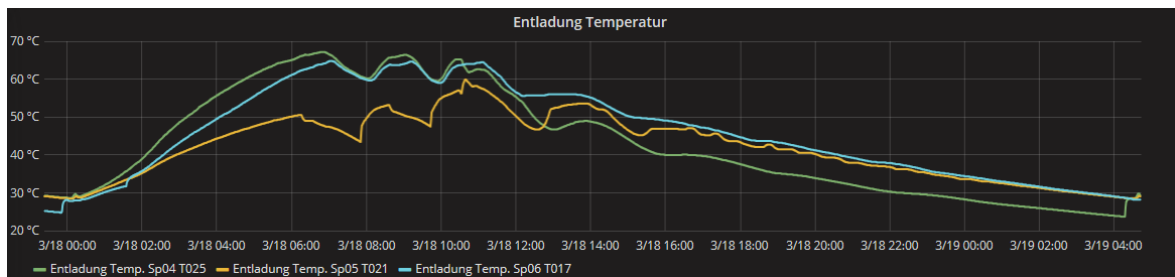


Abbildung 52: Entladungstemperaturen der drei Speicher

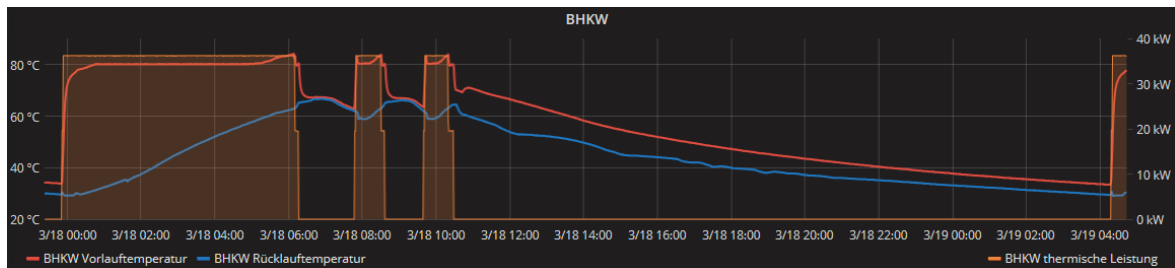


Abbildung 53: Thermische Leistung sowie Vor- und Rücklauftemperatur des BHKW

Die dauerhafte Anforderung vom Speicher 5 kann folgendermaßen erklärt werden:

1. Da der Durchflussstrom vom BHKW mehrere parallele Strömungswege zur Verfügung hat, sucht sich das Heizwasser den Strömungsweg, den es mit dem kleinsten Energieaufwand überwinden kann. Dadurch entsteht im Laufe der Zeit eine ungleichmäßige Beladung von drei Speichern sowie große Schwankungen in den Beladungsvolumen zu den Speichern.
2. Die Beladung des Speichers ist abgeschlossen, wenn die untere Temperatur  $60^{\circ}\text{C}$  erreicht. Wenn ein Wärmebedarf im Gebäude herrscht, steigt die untere Temperatur maßgeblich infolge des warmen Heizungsrücklaufs. Im Zeitraum 23:52 – 06:20 Uhr ist der Volumenstrom vom Speicher 5 zum Verteiler geringer als Beladungsvolumenstrom vom BHKW, d.h. weniger Wasser wird in die untere Speicherschicht des Speichers 5 geströmt (siehe Abb. 54 und 55). Infolgedessen wird die untere Schicht des Speichers 5 langsamer erwärmt und erreicht die untere Temperatur des Anforderungsausschaltpunktes ungefähr um 2-mal später als die unteren Temperaturen der Speicher 4 und 6.

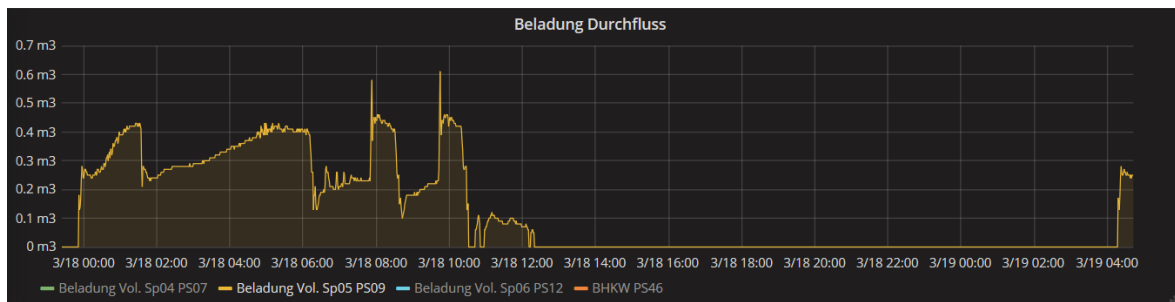


Abbildung 54: Beladungsvolumenstrom des Speichers 5

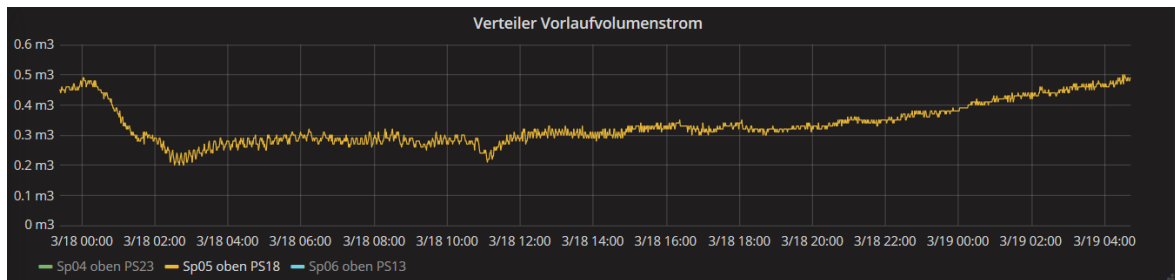


Abbildung 55: Entladungsvolumenstrom des Speichers 5

Um die Temperaturschwankungen in den Speichern zu vermeiden sowie die Soll-Temperatur des Rücklaufs zum BHKW einzuhalten, sollen die Speicher auf die Strecke vom BHKW auf jeden Speicher hydraulisch abgeglichen werden. Die Berechnung des hydraulischen Abgleichs wird im nächsten Kapitel angeführt.

## 4.2 Reihenschaltung

Meistens wird es empfohlen, die Wärmespeicher in Reihe zu betreiben, da die Reihenschaltung im Vergleich zur Parallelschaltung viel effizienter ist. Bei der Reihenschaltung besitzt die Wärmespeicheranlage addierte Wärmetauschfläche sowie klare Durchflussbedingungen.

Bei der Reihenschaltung müssen alle drei Speicher als ein großer Wärmespeicher funktionieren. Deswegen ist das Temperaturverhalten in drei Speichern beim Reihenbetrieb ähnlich wie beim Ein-Speicher-Betrieb. In Rahmen dieser Arbeit wird der Versuch der reinen Reihenschaltung der Speicher durchgeführt. Bei einer reinen Reihenschaltung wird folgende Systemeinstellung verstanden:

Die Beladung vom BHKW erfolgt zunächst im Speicher 6, dann wird Speicher 5 vom Speicher 6 beladen und entsprechend Speicher 4 vom Speicher 5. Die Entladung zum BHKW



erfolgt vom Speicher 4, weil er eine niedrigere Temperatur besitzt. Da der vom BHKW beladene Speicher 6 über eine höhere Temperatur verfügt, wird er zum Heizverteiler entladen. Der Heizungsrücklauf wird in dem Speicher 4 mit einem niedrigen Temperaturniveau eingespeist. Der Speicher 5 wird von der BHKW-Seite sowie von der Heizverteilerseite komplett abgeschaltet (siehe Abb. 56).

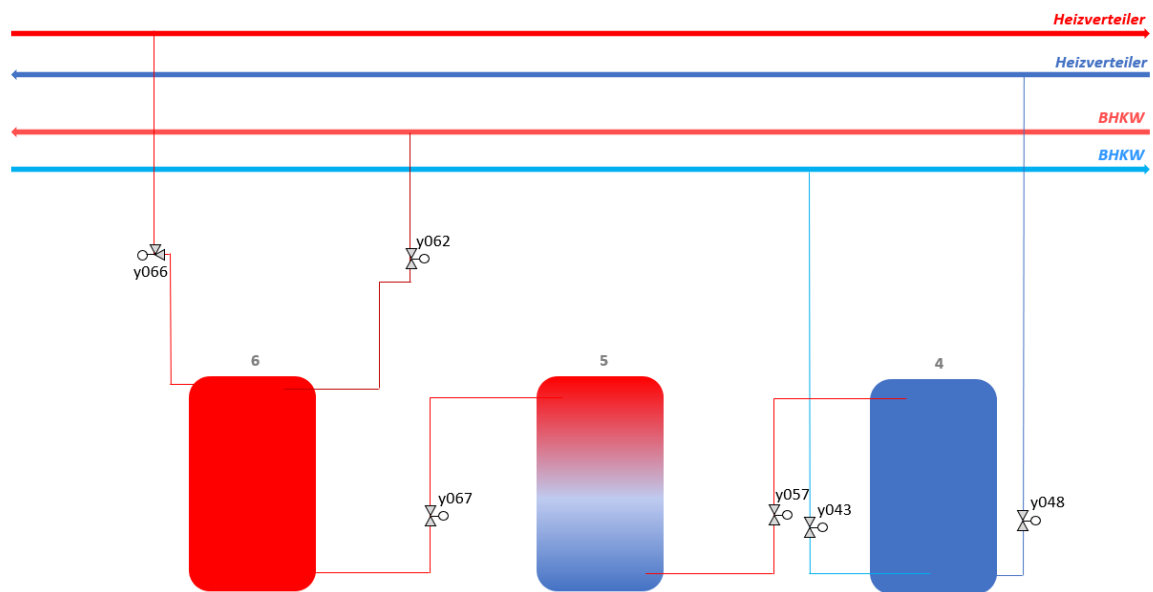


Abbildung 56: Reihenschaltungsschema (eigene Darstellung)

### 4.2.1 Versuchsvorbereitung

#### *Externe Steuerung*

Wie oben erwähnt, kann eine reine Reihenschaltung im Vergleich zur Parallelschaltung nicht durch die Zenon GLT-Software automatisch realisiert werden. In diesem Fall muss die Wärmespeicherungsanlage manuell eingestellt werden.

Da die Heizkreisladungsrohrleitungen 3-Wege-Motorventile besitzen, die nicht komplett zugemacht werden können, müssen die Bohrventile manuell zugemacht werden.

Da das Heizwasser von Speicher 4 zum BHKW entladen wird, müssen die Beladungsanforderungen nur bei dem Speicher 4 eingestellt werden.

Bei der Zenon GLT-Software müssen folgende Parameter eingegeben werden:

## Überprüfung verschiedener Schaltmöglichkeiten des Wärmespeicherungssystems

Tabelle 14: Externe Steuerung bei der Reihenschaltung

	<i>Zustand</i>	<i>Anforderung</i>
Speicher 4	Beladung BHKW	$T_{\text{unten}} = 60^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{oben}} = 30^{\circ}\text{C}$
Speicher 5	Entladung	keine
Speicher 6	Entladung	keine

Tabelle 15: Ventileinstellung bei der Reihenschaltung

	<i>Ventilkennzeichnung</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Ventilzustand</i>	<i>Handeingriff</i>
Speicher 4: Ventile	Y041	WP Vorlauf	zu	
	Y042	BHKW Vorlauf	zu	Motorventil
	Y043	BHKW Rücklauf	auf	
	Y044	WP Rücklauf	zu	
	Y046	Entladung zum Verteiler	zu	Ventil
	Y048	Verteiler Rücklauf	auf	
Speicher 5: Ventile	Y051	WP Vorlauf	zu	
	Y052	BHKW Vorlauf	zu	
	Y053	BHKW Rücklauf	zu	
	Y054	WP Rücklauf	zu	
	Y056	Entladung zum Verteiler	zu	Ventil
	Y057	Reihenschaltung Sp 5 - Sp 4	auf	Motorventil
	Y058	Verteiler Rücklauf	zu	Motorventil
Speicher 6: Ventile	Y061	Erzeugervorlauf (3-Wege)	zu	
	Y062	BHKW Vorlauf	auf	Motorventil
	Y063	BHKW Rücklauf	zu	
	Y064	WP Rücklauf	zu	
	Y065	WP Vorlauf	zu	
	Y066	Entladung zum Verteiler	auf	
	Y067	Reihenschaltung Sp 6 - Sp 5	zu	Motorventil
	Y068	Verteiler Rücklauf	zu	Motorventil

Der Versuch der Parallelschaltung wurde in dem Zeitraum vom 11.01.2018 10:13 bis zum 12.01.2018 10:21 durchgeführt.

## 4.2.2 Versuchsergebnisse

Bei der Reihenschaltung wird erwartet, dass der Speicher 6 als erstes erwärmt wird, dann folgt Speicher 5 und am Ende Speicher 4. In der Praxis hat die Wärmespeicherungsanlage jedoch eine andere Temperaturverteilung.

Zunächst kann ein gleichmäßiger Anstieg der oberen, mittleren sowie unteren Temperatur des Speichers 4 beobachtet werden. Danach steigt, infolge des Beladungsvorgangs, die obere Temperatur des Speichers 6 extrem an. Die Temperaturen im Speicher 5 sowie die mittlere und untere Temperatur des Speichers 6 bleiben lange Zeit auf einem gleichen Temperaturniveau (siehe Abb. 57). Dies kann durch die zugeführten und abgeführten Volumenströme erklärt werden.

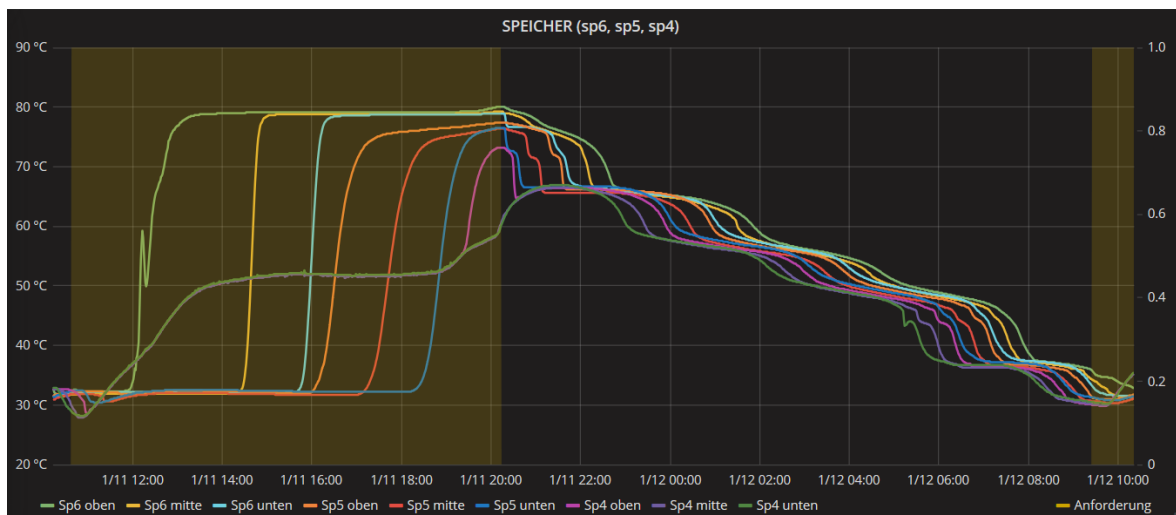


Abbildung 57: Speichertemperaturen der drei Speicher sowie Anforderung des Speichers 4

Wenn der Vorlaufvolumenstrom vom BHKW geringer als der zum Heizverteiler geströmte Volumenstrom ist, entströmt sofort das Heizwasser vom oberen Bereich des Speichers 6, ohne dass die folgenden Speicher beladen werden. Das Heizwasser im Speicher 4 wird durch den stetig wärmer werdenden Heizungsrücklauf erwärmt. (siehe Abb. 58 und 59).

Der gewünschte Zustand der Temperaturverteilung erreicht das Wärmespeicherungssystem nur dann, wenn der Volumenstrom vom BHKW den Heizkreisvolumenstrom überwiegt.

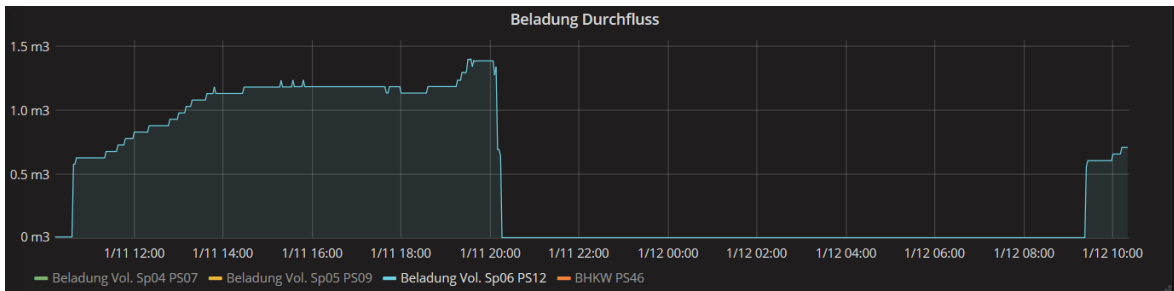


Abbildung 58: Beladungsvolumenstrom des Speichers 6

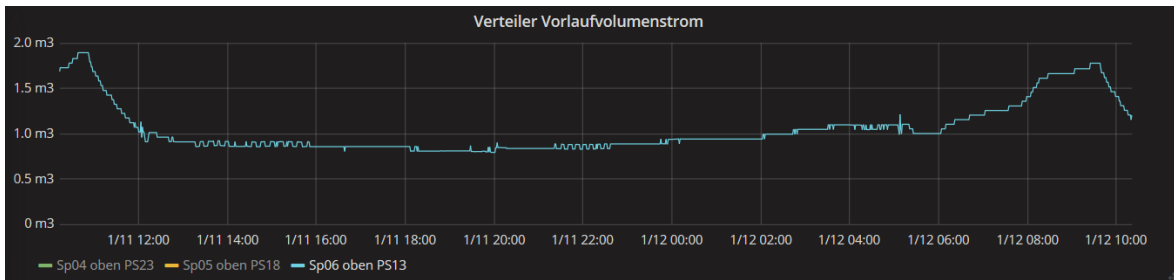


Abbildung 59: Entladungsvolumenstrom des Speichers 6

Infolgedessen erfolgt die aufeinanderfolgende Beladung aller Speicher (siehe Abb. 57). Zunächst steigt die mittlere Temperatur des Speichers 6 extrem an, dann folgt die mittlere und untere Temperatur des Speichers 6 und abschließend nehmen entsprechend die obere, mittlere und untere Temperatur des Speichers 5 zu. Im diesen Zeitraum findet die Wasserströmung in den Reihenschaltungsrohrleitungen statt (siehe Abb. 60).

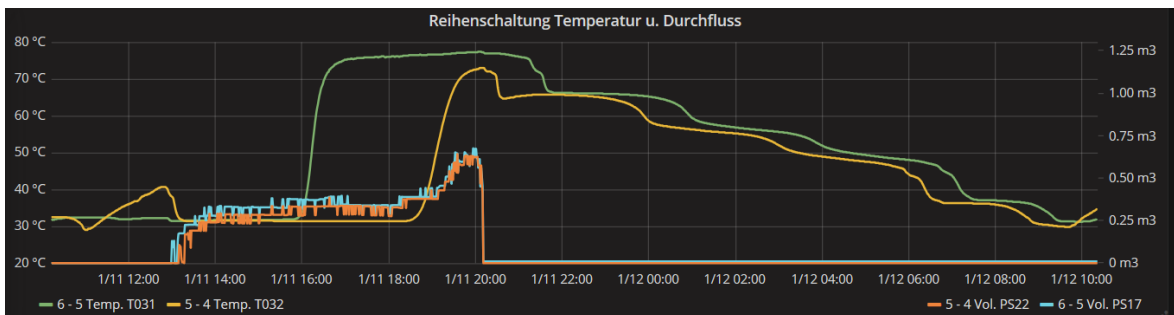


Abbildung 60: Temperaturen und Volumenströme in den Reihenschaltungsrohrleitungen

Wenn die drei Speicher als ein großer Speicher betrachtet werden, wird die obere Temperatur des Speichers 6 als die obere Temperatur eines großen Speichers bezeichnet; die mittlere Temperatur des Speichers 5 entspricht dann der mittleren Temperatur und die untere Temperatur des Speichers 4 der unteren Temperatur eines großen Speichers (siehe Abb. 61). Nach dem Beladungsvorgang ist das Temperaturverhalten eines großen Speichers ähnlich dem Temperaturverhalten des einzelnen Speichers, welches in Kapitel 3 beschrieben wurde.

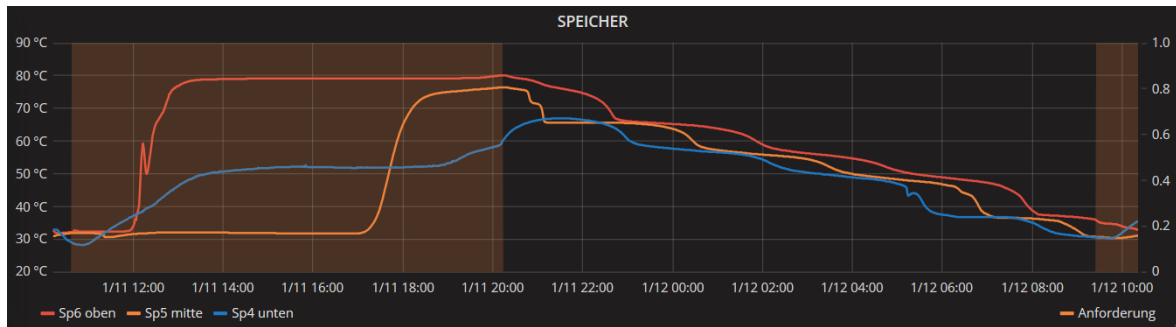


Abbildung 61: Darstellung der drei Speicher als ein großer Speicher durch Temperaturverteilung

Nach der Beladung erfolgt eine Strömung von Speicher 4 zum Speicher 6, wodurch das Heizwasser in den Reihenschaltungsrohrleitungen rückwärts strömt. Da der Durchflussmesser den Volumenstrom nur in eine Richtung messen kann, werden bei der Rückwärtswasserströmung keine Werte angezeigt. Um die Rückwärtswasserströmungen nachvollziehen zu können, werden einige Parameter in den Durchflussmessgeräten geändert. Die Korrektur der Einstellparameter der Durchflussmessgeräte werden im nächsten Kapitel beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur die reine Reihenschaltung untersucht. Dennoch gibt es außer der reinen Reihenschaltung noch viele weitere Möglichkeiten der Reihenschaltung, die mit der am Energie-Campus vorhandenen Wärmespeicherungsanlage realisiert werden können. Da die Wassertemperatur in Speicher 4 infolge des warmen Heizungsrücklaufs schneller als die Wassertemperatur der voranstehenden Speicher zunimmt, kann die Wärmespeicheranlage so verschaltet werden, dass die Einspeisung vom Heizverteiler in Speicher 4 und Speicher 5 oder Speicher 5 und Speicher 6, erfolgt.

### 4.3 Stabiler Betrieb

Die Verschaltungsmöglichkeiten aller drei Speicher sind nicht stabil genug. Eine stabile Verschaltung der Wärmespeicher, die als Grundzustand des Speicherbetriebs dienen kann, ist der Betrieb nur eines Speichers. Die Tatsache besteht darin, dass die Wärmespeicher immer zum Heizverteilerkreis angeschlossen sind. Wenn keine Beladung über das BHKW zu den einzelnen Wärmespeichern erfolgt, werden sie trotzdem vom Heizverteiler mit dem Heizwasser eingespeist. Um einen Wärmespeicher außer Betrieb zu nehmen, muss das auf Heizungsrücklauf vorhandene Motorventil zugemacht werden. Möchte man beispielsweise

nur Speicher 4 betreiben, so müssen die Motorventile Y058 und Y068 manuell geschlossen werden, damit die Speicher 5 und 6 außer Betrieb genommen werden. Der Betrieb nur eines Speichers ist in Kapitel 3 detailliert beschrieben.

Tabelle 16: Ventileinstellung beim Betrieb nur eines Speichers

	<i>Y048</i>	<i>Y058</i>	<i>Y068</i>
Betrieb des Speichers 4	auf	zu	zu
Betrieb des Speichers 5	zu	auf	zu
Betrieb des Speichers 6	zu	zu	auf

Zusammenfassend kann man sagen, dass die beiden Schaltmöglichkeiten sowohl Vorteile als auch Nachteile haben. Die Parallelschaltung im Vergleich zur Reihenschaltung kann durch die GLT-Software automatisch realisiert werden. Um die reine Reihenschaltung automatisch realisieren zu können, müssen neue Motor-Ventile, die um 180°C gedreht werden können, auf Heizungsvorlaufrohrleitungen installiert werden. Außerdem muss auch die Logik bei der GLT-Software Kieback & Peter angepasst werden. Bei der Reihenschaltung ist kein hydraulischer Abgleich des Wärmespeicherungssystems erforderlich, da die Beladung nur in einem Speicher erfolgt. Bei der Parallelschaltung muss das Wärmespeicherungssystem hydraulisch abgeglichen werden, um den getackten BHKW-Betrieb sowie Temperaturschwankungen in den voll-beladenen Speichern zu vermeiden. Für den hydraulischen Ausgleich müssen zusätzlich Strangreguliertventile für jeden Speicher installiert werden. Bei der Reihenschaltung erreicht die Temperaturverteilung den gewünschten Betriebszustand nach einer langen Zeit, da der Entladungsvolumenstrom infolge des hohen Wärmebedarfs sehr groß ist. Deswegen wird empfohlen, die Speicher in Reihe zu betreiben, wenn es einen niedrigen Wärmebedarf gibt. Verbesserungen, wie die Korrektur der Einstellungsparameter des Messgeräts sowie der hydraulische Abgleich für die Parallelschaltung, werden im folgenden Kapitel beschrieben.

## 5 Verbesserungen für das Wärmespeicherungssystem

Während der Durchführung der Versuche sind verschiedene Probleme aufgetreten. In diesem Kapitel werden die Lösungen vorgeschlagen, die zur Verbesserung des Wärmespeicherungssystems am Energie-Campus führen können.

### 5.1 Parametrierung des Durchflussmessers

Während des Versuchs der Parallelschaltung ist ein Fehler aufgetreten. Der Fehler besteht darin, dass der Gesamtdurchfluss vom BHKW nicht gleich der Summe der Teildurchflüsse zu den Speichern ist. Es wurde vermutet, dass dieser Fehler an den ungünstigen Einstellungen des Messbereichs liegt. Der Messbereich bzw. maximaler Durchfluss ist bei  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  eingestellt, obwohl die aktuellen Durchflüsse im ganzem System kaum  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  erreichen. Für die Steigerung der Genauigkeit der gemessenen Werte wird der maximale Durchflusswert bei einigen Messgeräten auf  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  umgestellt.

Zunächst wurde der neue Einstellungswert direkt bei den Durchflussmessgeräten mithilfe des Messumformers mit Anzeige und Tastatur umgestellt. Danach wurde der neue maximale Durchflusswert in der GLT-Software eingegeben, damit der Wert richtig von den DDC-Anlagen in einen digitalen Wert umgewandelt wird.

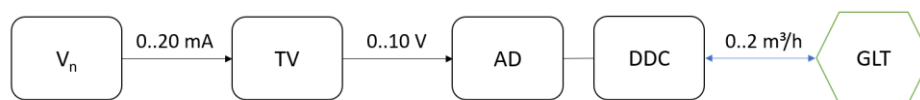


Abbildung 62: Signalweg des Durchflussmessergeräts (eigene Darstellung)

Infolge der Umstellung des maximalen Durchflusswertes ist das Messgerät empfindlicher geworden und zeigt bei einem ganz kleinen Durchfluss auch einen Wert an. Solche Schwankungen können durch die Einstellung einer Schlauchmenge vermieden werden. Bei der Einstellung einer Schlauchmenge werden die Störungen im Durchflussmesser gefiltert sowie die Schwankungen in der Anzeige und allen Ausgängen verringert und ein sehr geringer Durchfluss wird abgeschaltet. Der Wert der Schlauchmenge wird als Prozentsatz

vom Maximaldurchfluss berechnet und kann 0 – 9,9% betragen. Die Schlauchmenge bei den Messgeräten mit einem maximalen Durchfluss von 2 m<sup>3</sup>/h wurde von 1,5% auf 2,5% umgestellt.

Des Weiteren ist noch ein Fehler bei dem Reihenschaltungsversuch aufgetreten. Während der Entladung, der in Reihe verschalteten Speicher, strömt das Heizwasser in den Reihenschaltungsrohrleitungen rückwärts bzw. in eine andere Richtung als es vorgesehen wurde. Der Durchflussmesser erkennt eine Rückwärtsströmung als eine negative Strömung, die als Null-Wert in Grafana gezeigt wird. Um die Rückwärtswasserströmungen nachvollziehen zu können, wurde entschieden, zwei Messgeräte an Reihenschaltungsrohrleitungen (PS17 und PS22) auf einen bidirektionalen Betriebsmodus umzustellen. Bei einem bidirektionalen Modus wird der Durchfluss in beiden Richtungen gemessen.

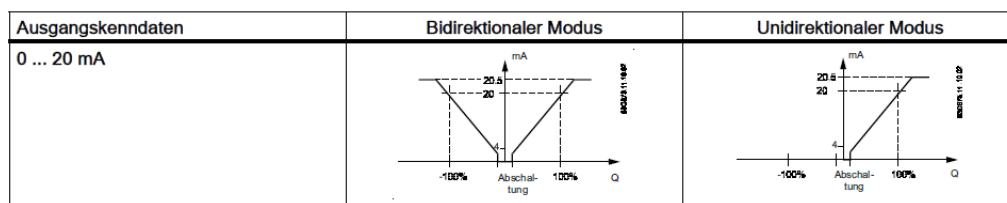


Abbildung 63: Bidirektionaler und unidirektionaler Modus des Durchflussmessgerätes

Wenn es keinen Durchfluss in der Rohrleitung gibt, wird trotzdem manchmal ein Wert angezeigt (siehe Abb. 64). Ein solcher Fehler wird durch die in den Rohrleitungen vorhandenen Gasblasen verursacht. Das kann durch eine ganz einfache Maßnahme eliminiert werden. Die Rohrleitung muss dort entlüftet werden, wo der Durchflussmesser eingesetzt ist, der einen falschen Wert zeigt.

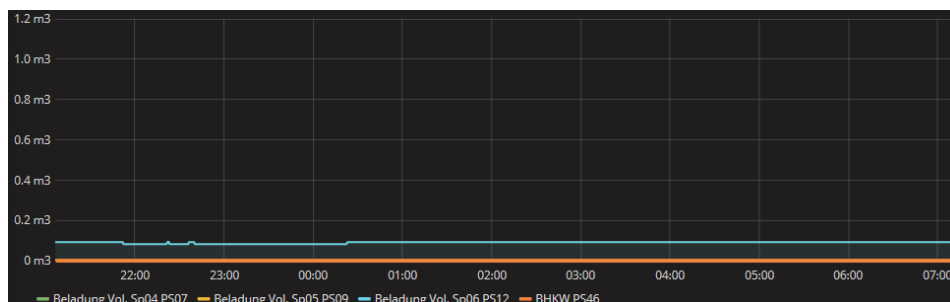


Abbildung 64: Der Beladungsdurchfluss des Speichers 6 vor der Entlüftungsmaßnahme



## 5.2 Hydraulischer Abgleich der Wärmespeicheranlage

Während des Parallelschaltungsversuchs wurde rausgefunden, dass die drei Speicher nicht gleichmäßig beladen werden, welche weitere Systemstörungen, wie beispielweise einen getackten BHKW-Betrieb, verursacht.

Damit die Beladung von den drei Speichern gleichmäßig erfolgt, sollen die Speicher auf die Strecke vom BHKW auf jeden Speicher hydraulisch abgeglichen werden. Unter dem hydraulischen Abgleich wird ein Verfahren verstanden, mit dem innerhalb einer Heizungsanlage alle Heizkomponenten in gleicher Weise mit dem Medium versorgt werden. Der hydraulische Abgleich kann durch die Strangreguliertventile realisiert werden, die dazu dienen, im gesamten Rohrnetz gleiche Druckverluste herzustellen. [40] Um die Strangreguliertventile richtig einzustellen, ist eine Berechnung des Druckabfalls des Systems erforderlich.

In geraden waagerechten Rohrabschnitten mit unveränderlichem Querschnitt muss die Strömung den Reibungswiderstand, Einzelwiderstände der Eingebauten und Trägheitswiderstand überwinden, wodurch ein Unterschied zwischen statischen Druck am Anfang und Ende eines Rohres entsteht. [41, S.59]. Bei tropfbaren Flüssigkeiten kann der Trägheitswiderstand vernachlässigt werden.

In den Rohrleitungen kann der Druckverlust folgendermaßen berechnet werden. [29]

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_R + \Delta p_E$$

$\Delta p_{ges}$  = Gesamtdruckabfall in Pa;

$\Delta p_R$  = Druckverlust durch Rohrreibung in Pa;

$\Delta p_E$  = Druckverlust durch Einzelwiderstände in Pa.

Der Rohrreibungsdruckverlust lässt sich durch die folgende Gleichung bestimmen:

$$\Delta p_R = l \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

$l$  = Rohrlänge in m;

$\lambda$  = Rohrreibungswert;

$d$  = Rohrinne Durchmesser in m;

$v$  = Strömungsgeschwindigkeit in m/s;

$\rho$  = Dichte des Mediums in kg/m.

Ein Rohrreibungswert berücksichtigt die Rauigkeit der Rohrwandung, Turbulenz der Strömung sowie Zähigkeit des geströmten Mediums. Für eine turbulente Strömung lässt sich der Rohrreibungswert folgendermaßen bestimmen. [41]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \frac{\varepsilon}{3,7} + \left( \frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]$$

$\varepsilon$  = relative Rauigkeit des Rohres:

$$\varepsilon = \frac{e}{r}$$

$e$  = mittlere Höhe der Rauigkeitserhebungen in m;

$r$  = innerer Rohrhalmmesser in m;

$Re$  = Reynoldzahl:

$$Re = \frac{vd}{\vartheta}$$

$\vartheta$  – kinematische Viskosität.

Da die Berechnung des Rohrreibungswertes sehr komplex ist, kann der Rohrreibungsdruckverlust durch den Druckverlust pro Rohrlänge berechnet werden.

$$\frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} = R$$

$$\Delta p_R = R \cdot l$$

$R$  = Druckverlust in Pa/m.

Der Druckverlust pro Rohrlänge ist ein tabellarischer Wert und kann aus dem Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung: Anlagenmechanik entnommen werden. Der Wert wird durch den bekannten Massenstrom und dem Rohrdurchmesser für ein nahtloses Stahlrohr nach DIN 2448 bestimmt.

Der Druckverlust der einzelnen Widerstände kann mithilfe folgender Formel berechnet werden:

$$\Delta p_E = \Sigma \zeta \cdot \Delta p_{dyn} = \Sigma \zeta \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

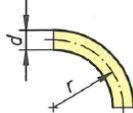


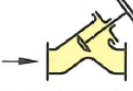

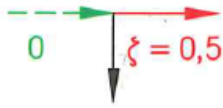
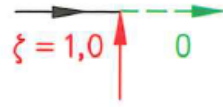

$\Sigma \zeta$  = Summe Widerstandsbeiwerte;

$\Delta p_{dyn}$  = dynamische Druck in Pa.

Zu den einzelnen Widerständen gehören Formstücke und Armaturen sowie Abzweige innerhalb der Rohrleitung. Für die Berechnungen werden auch tabellarische Werte aus dem Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung: Anlagenmechanik verwendet, die ausreichend genau sind. Bei der Heizungsanlagenberechnung wird ein Bohrventil als sogenannter Schieber bezeichnet. Ein Strangreguliertventil stellt ein Schrägsitzventil dar.

[29]

Tabelle 17: Widerstandsbeiwerte der Formstücke und Armaturen sowie Abzweige innerhalb der Rohrleitung

	Formstücke und Armaturen	Darstellung	Widerstandsbeiwert
1	Bogen		0,4
2	Schieber		0,2
3	Kugelhahn		0
4	Schrägsitzventil		2,0
5	T-Abzweig Trennung $TA_T$		1,5
6	T-Durchgang Trennung $TD_T$		0,5
7	T-Abzweig Vereinigung $TA_V$		1,0
8	T-Durchgang Vereinigung $TD_V$		0,5

Da der Volumenstrom in  $m^3/h$  gemessen wird, müssen alle Werte in  $m/s$  umgerechnet werden:

$$\dot{V} = \frac{\pi d^2}{4} v$$

$$v = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2} \left[ \frac{m^3}{h} \right] = \frac{4\dot{V}}{3600 \pi d^2} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{\dot{V}}{900 \pi d^2} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

### Berechnungsdurchführung

Da der hydraulische Abgleich nicht durch eine erneute Einstellung der Heizungsumwälzpumpe, sondern durch die Implementierung der Strangreguliertventile erfolgt, wird der Durchflussmesser, der sich direkt hinter dem BHKW befindet, als Startpunkt der Berechnung angenommen. Als der Endpunkt der Berechnung wird der Abzweig zum Speicher 6 angenommen.

Da keine Maßstabszeichnung des Wärmespeicherungssystems vorhanden ist, wurde die Länge der berechneten Streckenabschnitte manuell gemessen. Die Ungenauigkeiten der Abmessungen der Rohrlänge werden durch die vorhandene Wärmedämmung der Rohrleitungen des Wärmespeicherungssystems verursacht, weil sie nicht abgenommen werden kann.

Für die Berechnung wird der Wert des Volumenstroms verwendet, der am Startpunkt der berechneten Strecke gemessen wird. Während des Beladungsvorgangs verändert sich der Volumenstrom im Laufe der Zeit. Für die Berechnung wird jedoch der Volumenstrom genommen, bei der der Beladungsvorgang relativ stabil ist. Der für die Berechnung verwendete Volumenstrom beträgt 1,465 m<sup>3</sup>/h.

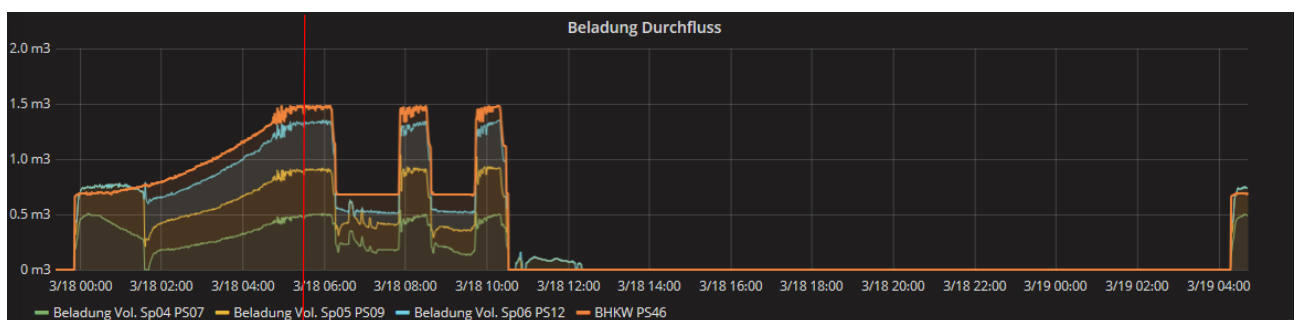


Abbildung 65: BHKW Beladungsvolumenstrom

Für die Vereinfachung der Berechnung werden innerhalb der berechneten Rohrleitungsstrecke sieben Ausgangspunkte gewählt, die entsprechende Streckenabschnitte bilden.

## Verbesserungen für das Wärmespeicherungssystem

1. Durchflussmesser des BHKW;
2. Abzweig zum Speicher 4;
3. Der obere Betriebsanschluss des Speichers 4;
4. Abzweig zum Speicher 5;
5. Der obere Betriebsanschluss des Speichers 5;
6. Abzweig zum Speicher 6;
7. Der obere Betriebsanschluss des Speichers 6.

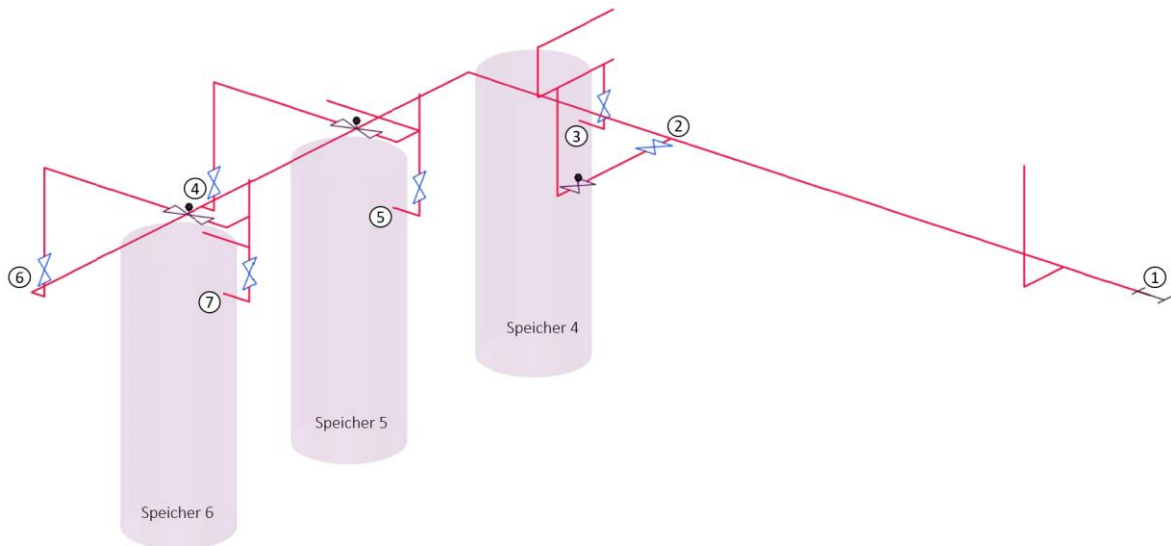


Abbildung 66: Rohrleitungsstrecke der Berechnung des Druckabfalls (eigene Darstellung)

Tabelle 18: Der Gesamtwiderstandsbeiwert der einzelnen Widerstände am jeden Streckenabschnitt

Streckenabschnitt	Länge in m	Einzelne Widerstände	Widerstandsbeiwert	Gesamtwiderstandsbeiwert
1 → 2	4,2	T-Durchgang Trennung TD <sub>T</sub>	0,5	0,5
2 → 3	3,2	T-Abzweig Trennung TA <sub>T</sub>	1,5	5,2 + 2,0
		Schieber	0,2	
		Kugelhahn	0	
		Bogen	0,4	
		T-Abzweig Vereinigung TA <sub>V</sub>	1,0	
		T-Abzweig Trennung TA <sub>T</sub>	1,5	
		Bogen	0,4	
		Schieber	0,2	
		+ Strangreguliertventil	2,0	
2 → 4	4,6	T-Durchgang Trennung TD <sub>T</sub>	0,5	0,9
		Bogen	0,4	
4 → 5	3,6	T-Abzweig Trennung TA <sub>T</sub>	1,5	4,5 + 2,0
		Bogen	0,4	
		Schieber	0,2	

## Verbesserungen für das Wärmespeicherungssystem

		Bogen	0,4	
		Kugelhahn	0	
		Bogen	0,4	
		T-Abzweig Vereinigung TA <sub>v</sub>	1,0	
		Bogen	0,4	
		Schieber	0,2	
		+ Strangreguliertventil	2,0	
4 → 6	1,8	T-Durchgang Trennung TD <sub>T</sub>	0,5	0,5
6 → 7	3,6	T-Abzweig Trennung TA <sub>T</sub>	1,5	4,5 + 2,0
		Bogen	0,4	
		Schieber	0,2	
		Bogen	0,4	
		Kugelhahn	0	
		Bogen	0,4	
		T-Abzweig Vereinigung TA <sub>v</sub>	1,0	
		Bogen	0,4	
		Schieber	0,2	
		+ Strangreguliertventil	2,0	

Tabelle 19: Parameter, die für jeden Streckenabschnitt gleich sind

<i>Parameter</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Wert</i>	<i>SI</i>
Durchfluss	<i>V</i>	1,465 m <sup>3</sup> /h	0,21 m/s
Durchmesser des Rohrs	<i>d</i>	50 mm	0,05 m
Druckverlust (Tabellenwert)	<i>R</i>	10 Pa/m	10 Pa/m
Dichte bei 80°C	<i>ρ</i>	971,79 kg/m <sup>3</sup>	971,79 kg/m <sup>3</sup>

### Berechnungsergebnisse

Aus der Berechnung ergeben sich folgende Druckverluste für den jeweiligen Streckenabschnitt:

Tabelle 20: Rohrreibungsdrukverlust, Druckverlust durch Einzelwiderstände sowie Gesamtdruckverlust jedes Streckenabschnittes

<i>Strecke</i>	$\Delta p_R$ in Pa	$\Delta p_E$ in Pa	$\Delta p_{ges}$ in Pa
1-2	42	10	52,0
2-3	32	109	141
2-4	46	19	65
4-5	36	94	130
4-6	18	10	29
6-7	36	94	130

Da bei der Berechnung ausreichend genaue Werte verwendet werden, wird der Druckverlust bei jedem Speicher grob berechnet.

Tabelle 21: Druckverlust vom BHKW zum jeweiligen Speicher

<i>Strecke</i>	<i>Druckverlust in Pa</i>
Vom BHKW zum Speicher 4	ca. 195
Vom BHKW zum Speicher 4	ca. 250
Vom BHKW zum Speicher 4	ca. 280

Tabelle 22: Druckverlust vom BHKW zum jeweiligen Speicher mit Berücksichtigung der in der Zukunft eingesetzten Strangreguliertventile

<i>Strecke</i>	<i>Druckverlust in Pa</i>
Vom BHKW zum Speicher 4	ca. 235
Vom BHKW zum Speicher 4	ca. 290
Vom BHKW zum Speicher 4	ca. 320

Die implementierten Strangreguliertventile können danach mithilfe der Ergebnisse aus der Tabelle 21 eingestellt werden. Das Wärmespeicherungssystem wird hydraulisch ausgeglichen.

## 6 Zusammenfassung

Das Heizungssystem am Energie-Campus stellt ein experimentelles Heizungssystem dar, dessen Forschungsbetrieb komplett in die Gebäudeinfrastruktur integriert ist. In dieser Arbeit wurde einen Überblick über alle Heizungskomponente sowie Gebäudeautomation und Heizungsregelungsvorgang gegeben.

Unter allen Heizungskomponenten wurde das Wärmespeicherungssystem am detailliertesten untersucht, da es ein zentrales Bauteil des gesamten Heizungssystems ist und als wichtigste Verbindungsstelle zwischen Wärmeerzeuger und Wärmeverbraucher gilt. Wenn das Wärmespeicherungssystem nicht ordnungsgemäß funktioniert, können verschiedene Störungen bei Erzeugers- sowie Verbraucherseite auftreten. Außerdem spielt das Wärmespeicherungssystem eine große Rolle bei den verschiedenen Forschungsszenarien.

In Rahmen dieser Arbeit wurde speicherinterne Temperaturverteilung innerhalb der Wärmespeicher sowie verschiedene Schaltmöglichkeiten des Wärmespeicherungssystems untersucht. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich folgende Punkte und Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die Wärmespeicher sind immer zum Heizverteilerkreis angeschlossen. Wenn keine Beladung über das BHKW zu den einzelnen Wärmespeichern erfolgt, werden sie trotzdem vom Heizverteiler mit dem Heizwasser eingespeist. Um einen Wärmespeicher außer Betrieb zu nehmen, müssen die auf Heizungsrücklauf vorhandenen Motorventile Y048, Y058, Y068 entsprechend den Speichern 4, 5 und 6 manuell zugemacht werden.
2. Die Reihenschaltung kann nicht automatisch durch die GLT-Software Zenon realisiert werden. Für die automatisierte Einstellung der Reihenschaltung muss die Logik in der GLT-Software Kieback&Peter angepasst werden. Daneben müssen die 3-Wege-Motorventile ausgetauscht werden, um die einzelnen Wärmespeicher beim Reihenbetrieb vom Heizverteilerkreis ausschalten zu können.
3. Bei der Parallelschaltung der drei Wärmespeicher kann ein getackter BHKW-Betrieb beobachtet werden. Ein getackter BHKW-Betrieb wird durch die dauerhafte



Anforderung vom Speicher 5 verursacht. Die Anforderung des Speichers 5 dauert eine lange Zeit, weil die Wärmespeicher hydraulisch nicht ausgeglichen sind. Die Wärmespeicher können auf der Beladungsstrecke durch die Implementierung der Strangreguliertventile ausgeglichen werden.

4. Für die Berechnung der Effizienz bzw. der thermischen Leistung des Wärmespeicherungssystems muss ein Temperatursensor auf dem Heizungsrücklauf installiert werden.
5. Die Beimischung des RLT-Heizkreises im Vergleich zu den anderen Verbrauchern erfolgt auf dem Dach und sein Durchflussmesser findet außer Beimischungskreis statt.
6. Das BHKW kann im Sommer ausgeschaltet werden, da die im BHKW gewonnene Wärmeenergie nur zum Heizen genutzt wird, das Trinkwasser wird in den Durchlauferhitzern erwärmt, und Zuluft im Sommer benötigt keine Nachheizung. Außerdem ist der Verkaufspreis des im BHKW erzeugten Stroms ungefähr gleich dem Preis des gekauften Erdgases.
7. Für die Verbesserung des Messvorgangs der Durchflussmesser wurden einige Parameter wie der maximale Messbereich sowie Abschaltung der Schlaumenge umgestellt. Außerdem wurden die Rohrleitungen gut entlüftet, da die Gasblasen auch eine Störung bei der Messung verursachen können.

Bei der effektiven Ausnutzung des Wärmespeicherungssystems können unterschiedliche Forschungsszenarien beim experimentellen Heizungssystem durchgeführt und untersucht werden.

## Literaturverzeichnis

1. „Bundesregierung | Artikel | Meilenstein für Modernisierung Deutschlands“. o. J. Zugriffen 2. April 2018. <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/11/2016-11-14-klimaschutzplan-2050.html?nn=694676>.
2. „NEW 4.0 - Die Ziele |“. o. J. Zugriffen 2. April 2018. <http://www.new4-0.de/2015/06/17/die-ziele/>.
3. Interne Dokumentation. Technologiezentrum Energie-Campus Hamburg.
4. „Was ist ein Blockheizkraftwerk (BHKW)?“ 2016. Viessmann. 14. April 2016. [http://www.bhkw.de/de/was\\_ist\\_ein\\_bhkw\\_.html](http://www.bhkw.de/de/was_ist_ein_bhkw_.html).
5. BHKW Betriebsanleitung. Kraftwerk. Mephisto 16+/20+. Handbuch. 2014-03. Hannover.
6. „Funktion & Wärmequellen“. o. J. Zugriffen 28. Februar 2018. <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>.
7. „Die Wärmepumpe Funktion kurz und verständlich erklärt“. 100 n. Chr. Heizung.de. 15:05 100 n. Chr. <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/die-waermepumpe-funktion-kurz-und-verstaendlich-erklaert/>.
8. Wärmepumpe Betriebsanleitung. Smart Heat.
9. Heizstab Datenblatt. Solar Profi.
10. „Thermische Bauteilaktivierung | Beton | Wärmeschutz | Baunetz\_Wissen“. o. J. Zugriffen 28. Februar 2018. <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/waermeschutz/thermische-bauteilaktivierung-4167005>.
11. Bauteilaktivierung Betriebsanleitung. Rehau.
12. „Heizkörper“. 2018. *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Heizkörper&oldid=175379909>.
13. Deckenstrahlplatten Datenblatt. Best.
14. „Raumluftechnik“. o. J. Zugriffen 28. Februar 2018. <http://www.vaillant.de/heizung/heizung-verstehen/heiztechniklexikon/begriffe-m-r/raumluftechnik/>.
15. Wärmespeicher Herstellerzeichnung. Unitec. 05. August 2014.

16. „Grundlagen der Pumpentechnik“ 2009. WILO. Zugriffen 28. Februar 2018. <https://www.heima24.de/shop/images/products/media/wilo-grundlagen-pumpentechnik.pdf>
17. Umwälzpumpe Betriebsanleitung. Grundfos Magna 32-60. Grundfos Magna 3.
18. „Gebäudeautomation“. 2018. *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Geb%C3%A4udeautomation&oldid=175222505>.
19. „Direct-Digital-Control-Gebäudeautomation“. 2018. *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Direct-Digital-Control-Geb%C3%A4udeautomation&oldid=174114610>.
20. „Gebäudeleittechnik“. 2017. *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Geb%C3%A4udeleittechnik&oldid=167981224>.
21. Temperaturfühler Datenblatt. Oppermann Regelgeräte: Temperaturmessung
22. Sensortechnik. 2014. New York: Springer.
23. „Sensor“. 2018. *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Sensor&oldid=175205966>.
24. Drucksensor Datenblatt. Thermokon.
25. „Magnetisch-induktiver Durchflussmesser“. 2018. *Wikipedia*. [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetisch-induktiver\\_Durchflussmesser&oldid=174778072](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetisch-induktiver_Durchflussmesser&oldid=174778072).
26. „LP – Faradaysches Induktionsgesetz“. o. J. Zugriffen 3. April 2018. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3686>.
27. Endress+Hauser. o. J. *Das magnetisch-induktive Durchfluss-Messprinzip*. Zugriffen 3. April 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=slUq9Nw8mGA>.
28. Durchflussmesser Betriebsanleitung. Siemens.
29. Ihle, Claus, Rolf Bader, und Manfred Golla. 2016. *Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung: Anlagenmechanik SHK Ausbildung und Praxis ; Netzmeister/-monteure*. 9. Auflage, 2. korrigierter Nachdruck 2016. Köln: Bildungsverlag Eins.
30. Interne Dokumentation. Heizgruppe: Betrieb nach Heizkurve.
31. Fisch, Norbert, Michael Bodmann, Lars Kühl, Christian Sasse, und Herdis Schnürer. 2005. *Wärmespeicher*. 4., erw. U. vollst. überarb. Aufl. BINE-Informationspaket. Berlin: Solarpraxis.
32. Herwig, Heinz. 2017. *Wärmeübertragung: ein nahezu allgegenwärtiges Phänomen*. Essentials. Wiesbaden: Springer Vieweg.

33. Baehr, Hans Dieter, und Karl Stephan. 2016. *Wärme- und Stoffübertragung*. 9., aktualisierte Auflage. Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
34. Eicker, Ursula. 2012. *Solare Technologien für Gebäude: Grundlagen und Praxisbeispiele ; mit 47 Tabellen*. 2., vollst. überarb. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
35. Böckh, Peter von, und Matthias Stripf. 2015. *Technische Thermodynamik: ein beispielorientiertes Einführungsbuch*. 2., neu Bearbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
36. „Massenbilanz (Thermodynamik)“. 2018. *Wikipedia*.  
[https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Massenbilanz\\_\(Thermodynamik\)&oldid=174525556](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Massenbilanz_(Thermodynamik)&oldid=174525556)
37. Grafana Darstellung. 21.03.2018 08:25-16:42. Energiecampus. Hamburg
38. Grafana Darstellung. 17.03.2018 23:23 – 19.03.2018 04:43. Energiecampus. Hamburg
39. Grafana Darstellung. 11.01.2018 10:13:11 – 12.01.2018 10:21:35. Energiecampus. Hamburg
40. „Strangregulierventil“. 2014. *Wikipedia*.  
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Strangregulierventil&oldid=134252949>.
41. Richter, Hugo, und Dieter Schmidt. 1971. *Rohrhydraulik: ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung*. 5., neubearb. Aufl. Berlin: Springer.