

Bachelor's Thesis

# **Inbetriebnahme und Charakterisierung einer prototypischen bidirektionalen Wärmeübergabestation**

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
Bachelor of Science  
an der TUM School of Engineering and Design  
der Technischen Universität München.

**Betreuer** Thomas Licklederer  
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher  
Chair of Renewable and Sustainable Energy Systems

**Eingereicht von** Lorenz Lukas  
Lichtenbergstraße 4  
85748 Garching

**Eingereicht am** München, 31.10.2022



## Abstract

The climate crisis and the gas shortage in Germany in 2022 are only two reasons for a change in building heating technology. This can be achieved through district heating networks. Heat transfer stations are an important component of these district heating networks. Such a prototypical bidirectional heat transfer station is first commissioned and then characterised in this paper. Based on the production- and consumption mode, characteristic operating states are first worked out. These states are based on the flow and return temperatures of existing heating systems.

During commissioning, it was found that the production mode could not be tested. However, this does not diminish the significance of the results.

Therefore, in this paper the heat transfer station is characterised for the consumption mode. Important properties, such as the temporal, the hydraulic and the thermal behaviour of the heat transfer station could be worked out. From these findings, many well-founded conclusions can be drawn about the behaviour in production mode.

*keywords* - **bidirectional, heat transfer station, heat exchanger, pump characteristic curve**

## Zusammenfassung

Die Klimakrise sowie der 2022 vorherrschende Gasmangel in Deutschland sind nur zwei Gründe, die für einen Wandel in der Gebäudeheizungstechnik sprechen. Eben dieser kann durch Fernwärmenetze geschehen. Wärmeübergabestationen stellen hierbei einen wichtigen Bestandteil dieser Fernwärmenetze dar. Eine solche prototypische bidirektionale Wärmeübergabestation wird in dieser Arbeit zunächst in Betrieb genommen und anschließend charakterisiert. Ausgehend von dem Erzeuger- und dem Verbrauchermodus werden zunächst charakteristische Betriebszustände herausgearbeitet. Diese Zustände orientieren sich an den Vor- und Rücklauftemperaturen bestehender Heizungssysteme.

Während der Inbetriebnahme wurde festgestellt, dass der Erzeugermodus nicht getestet werden konnte. Dies schmälert allerdings die Aussagekraft der Ergebnisse nicht.

Deshalb wird in dieser Arbeit die Wärmeübergabestation für den Verbrauchermodus charakterisiert. Wichtige Eigenschaften wie das zeitliche, das hydraulische und das thermische Verhalten der Wärmeübergabestation konnten herausgearbeitet werden. Aus diesen Erkenntnissen können begründet viele Rückschlüsse auf das Verhalten im Erzeugermodus gezogen werden.

*Schlagwörter* - **bidirektional, Wärmeübergabestation, Wärmeübertrager, Pumpenkennlinie**



## Bachelor- / Masterarbeit

# Inbetriebnahme und Charakterisierung einer prototypischen bidirektionalen Wärmeübergabestation

### Motivation

Konventionelle Wärmenetze verteilen die Energie unidirektional von zentralen Erzeugungseinheiten an die Verbraucher. Die Dezentralisierung der Energieerzeugung und –Speicherung zusammen mit der fortschreitenden Kopplung von Wärme- und Elektrizitätssektor führt zur Idee einer neuen Art von Wärmenetzen: Angelehnt an Smart Grids im Strombereich werden auch wärmeseitige die Verbraucher zu Prosumern (Producer + Consumer + Storage). Sie tauschen Energie bidirektional innerhalb des geschlossenen Wärmenetzes aus. Dazu sind neuartige thermohydraulische Infrastrukturen notwendig, u.a. bidirektionale Wärmeübergabestationen welche technisch den Wärmeaustausch zwischen den Prosumern (Gebäudeseite) und dem Wärmenetz realisieren.

In den Räumlichkeiten des Zentrums für Energie und Information entsteht derzeit ein experimentelles Netzlabor, welches ein Energiesystem aus 5 Gebäuden inkl. verbindendem Wärmenetz und elektrischem Smart Grid emuliert. Hier sind ebenfalls Prototypen für bidirektionale Wärmeübergabestationen aufgebaut.

### Hauptaufgaben

Ziel der ausgeschriebenen Arbeit ist es eine existierende prototypische bidirektionale Wärmeübergabestation in Betrieb zu nehmen und zu charakterisieren. Die Charakterisierung umfasst u.a. das aufzeichnen des thermohydraulischen Verhaltens in verschiedenen Betriebszuständen und unter verschiedenen Randbedingungen. Das Thema kann im Rahmen einer Bachelor- oder Masterarbeit bearbeitet werden. Die inhaltliche Breite und Tiefe der Aufgabenstellung wird entsprechend nach Absprache angepasst.

1. Einarbeitung in die Thematik und die Funktionsweise der prototypischen Wärmeübergabestation
2. Einarbeitung in die Laborumgebung und die genutzten Softwareumgebungen
3. Ausarbeitung eines Inbetriebnahme-Ablaufs und eines Experimentierkonzeptes zur Charakterisierung
4. Hardwaretechnische (handwerkliche) Vorbereitungen im Labor am Prototypen
5. Softwaretechnische Vorbereitungen für die Experimente (Einstellungen, Programmieren von Routinen etc.)
6. Durchführung der Experimente
7. Aufbereitung und Auswertung der Ergebnisse
8. Identifikation von kritischen Betriebszuständen, Ableitung von Verbesserungsvorschlägen
9. Ggf. Vergleich der Experimentierergebnisse mit existierenden Modellen
10. Zusammenfassung aller Ergebnisse in einer wissenschaftlich fundierten schriftlichen Ausarbeitung (ggf. Veröffentlichung auf einer internationalen Konferenz)

### Voraussetzungen

- Hintergrundwissen zu Wärmenetzen
- Handwerkliches Geschick
- Interesse an praktischen Aufgaben und der Durchführung von Experimenten
- fundiertes Grundverständnis der Thermodynamik und der Strömungslehre
- Vorkenntnisse in LabVIEW wünschenswert
- Zuverlässige, eigenständige und wissenschaftliche Arbeitsweise

### Was wir bieten

- Mitwirkung an der Erforschung der Energiesysteme der Zukunft
- Einbindung in Multidisziplinäre Forschungsgruppe
- Praktische Aufgabenstellung mit Laborumsetzung
- Individuelle Betreuung durch motivierte Wissenschaftler in kollegialer Atmosphäre
- Möglichkeit der Veröffentlichung in internationalen Zeitschriften und Konferenzen

### Bewerbung

Bitte senden Sie Ihre vollständigen Bewerbungsunterlagen mit kurzem Lebenslauf, Abschlusszeugnissen und aktueller Notenübersicht an [thomas.lickleder@tum.de](mailto:thomas.lickleder@tum.de)



# Rechtserklärung

Hiermit erkläre ich,

Nachname: Lukas

Vorname: Lorenz

Matr.Nr.: 03710706

dass ich die beiliegende Bachelor's Thesis zum Thema:

## **Inbetriebnahme und Charakterisierung einer prototypischen bidirektionalen Wärmeübergabestation**

selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, sowie alle wörtlichen und sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet und die entsprechende Quelle angegeben habe.

Ich bestätige, die „TUM Richtlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und für den Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten an der Technischen Universität München, 2015“, wie sie auf der Internetseite der Stabsstelle Chancengleichheit nachzulesen sind, anzuerkennen.

Vom Lehrstuhl und seinen Mitarbeitern zur Verfügung gestellte Hilfsmittel, wie Modelle oder Programme, sind ebenfalls angegeben. Diese Hilfsmittel sind Eigentum des Lehrstuhls bzw. des jeweiligen Mitarbeiters. Ich werde sie nicht über die vorliegende Arbeit hinaus weiter verwenden oder an Dritte weitergeben.

Einer weiteren Nutzung dieser Arbeit und deren Ergebnisse (auch Programme und Methoden) zu Zwecken der Forschung und Lehre, stimme ich zu.

Ich habe diese Arbeit noch nicht zum Erwerb eines anderen Leistungsnachweises eingereicht.

München, 31.10.2022

\_\_\_\_\_





# Erklärung zur Weitergabe der Arbeit

Ich erkläre mich einverstanden mit der Weitergabe der vorliegenden Arbeit an:

## **Inbetriebnahme und Charakterisierung einer prototypischen bidirektionalen Wärmeübergabestation**

- Aktuell oder zukünftig am Lehrstuhl wissenschaftliche Arbeit schreibende Studierende
  - Pauschal durch Mitarbeitende
  - Nur nach jeweiliger vorheriger Rücksprache.
- Aktuell oder zukünftig am Lehrstuhl wissenschaftliche Mitarbeitende
  - Pauschal durch Mitarbeitende
  - Nur nach jeweiliger vorheriger Rücksprache.

Mein Urheberrecht und persönliches Nutzungsrecht bleibt davon unberührt.

München, 31.10.2022 \_\_\_\_\_

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>Themenstellung</b>	<b>IV</b>
<b>Rechtserklärung</b>	<b>V</b>
<b>Erklärung zur Weitergabe der Arbeit</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Stand der Technik Wärmenetz . . . . .	3
2.1.1 historische Entwicklung von Wärmenetzen . . . . .	3
2.1.2 Prosumer . . . . .	4
2.1.3 bidirektionale Fernwärmenetze . . . . .	5
2.2 Stand im CoSES . . . . .	6
2.3 Wärmeübergabestationen im Vergleich . . . . .	7
<b>3 Forschungsfrage</b>	<b>11</b>
<b>4 Versuchsstand</b>	<b>13</b>
4.1 Ziel des Versuchsstands . . . . .	13
4.2 Aufbau des Versuchsstandes . . . . .	13
4.3 Überblick über die Wärmeübergabestationen im CoSES-Labor . . . . .	15
4.4 Wärmeübergabestation von Haus 1 . . . . .	16
4.5 Hardware des Versuchstandes . . . . .	17
4.5.1 Sensoren . . . . .	17
4.5.2 Aktoren . . . . .	18

4.5.3	Wärmeübertrager . . . . .	19
4.6	Software des Labors . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Inbetriebnahme der Wärmeübergabestation</b>	<b>23</b>
5.1	Hardware . . . . .	23
5.2	Software . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Charakterisierung der Wärmeübergabestation</b>	<b>29</b>
6.1	Ausarbeitung der Charakterisierungszustände . . . . .	29
6.2	Ziel der Charakterisierung . . . . .	32
6.3	Ablauf der Charakterisierungstests . . . . .	32
6.4	Analyse der Tests . . . . .	33
6.4.1	Wärmeübertrager . . . . .	33
6.4.2	Zeitanalyse . . . . .	37
6.4.3	hydraulische Analyse . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Schlüsselerkenntnisse</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>43</b>
	<b>Literatur</b>	<b>45</b>
	<b>Anhang</b>	<b>A</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	betrachteter Teil des thermischen Netzes, [10] . . . . .	5
2.2	Schema des thermischen Netzes im CoSES-Labor, [13] . . . . .	6
2.3	Schemata der Einspeisemöglichkeiten für dezentralisierte Produktionen: Scheme 1: 'supply to return'; Scheme 2: 'supply to supply'; Scheme 3: 'return to return'; Scheme 4: 'return to supply', [17] . . . . .	8
3.1	Schema der Wärmeübergabestation, [19] . . . . .	11
4.1	betrachteter Teil des thermischen Netzes, [13] . . . . .	14
4.2	Versuchsaufbau . . . . .	14
4.3	Schema der Wärmeübergabestationen im CoSES-Labor, [20] . . . . .	15
4.4	Schema der Wärmeübergabestation von Haus 1 des CoSES-Labor, [21] . . . . .	17
4.5	Kennlinien des Proportionalventils Sauter AVM105SF132, [26] . . . . .	18
4.6	Pumpenkennlinien . . . . .	19
4.7	Aufbau der Software . . . . .	21
5.1	Ventilkennlinie . . . . .	24
5.2	Volumenstrommessung . . . . .	25
5.3	Systemstruktur . . . . .	26
6.1	Schema für die Bestimmung der Temperaturen für den: . . . . .	31
6.2	Vergleich gerechneter Wärmedurchgangskoeffizienten mit den gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten . . . . .	35
6.3	Übertragungsverhalten . . . . .	36
6.4	Bestimmung der Übertragungszeit . . . . .	37
6.5	Pumpenkennlinie . . . . .	38
6.6	Bestimmung der Zeit, bis sich ein konstanter Volumenstrom einstellt . . . . .	39

# Tabellenverzeichnis

0.1	Formelzeichen . . . . .	XII
0.2	Abkürzungen . . . . .	XIII
6.1	Temperaturen gängiger Heizungssysteme . . . . .	30
6.2	Temperaturen für Verbrauchermodus . . . . .	30
6.3	Temperaturen für Erzeugermodus . . . . .	31
6.4	Verlusttemperatur . . . . .	37
6.5	Koeffizienten . . . . .	39
8.1	Komponenten und Signale aus Abbildung 4.4 . . . . .	A
8.2	erster Abschnitt: Verbrauchermodus Fußbodenheizung; zweiter Abschnitt: Verbrauchermodus Brennerheizung; dritter Abschnitt: neuer Radiator	B

# Formelzeichen

Symbol	Einheit	Benennung
$A$	$m^2$	Fläche
$\alpha$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmeübergangskoeffizient
$c_p$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	isobare spezifische Wärmekapazität
$c_v$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	isochore spezifische Wärmekapazität
$\dot{C}$	$\frac{J}{K \cdot s}$	Wärmekapazitätsstrom
$\eta$	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamische Viskosität
$\epsilon$		Effektivität
$k$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmedurchgangszahl
$L$	$mm$	charakteristische Länge
$\lambda$	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit
$LMTD$	$K$	logarithmische mittlere Temperaturdifferenz
$\dot{m}$	$\frac{m}{s}$	Massestrom
$Nu$		Nußeltzahl
$\omega$	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
$p$	$bar$	Druck
$Pr$		Prantlzahl
$\dot{Q}$	$kW$	Wärmestrom
$Q$	$J$	Wärme
$Re$		Prandtlzahl
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
$T$	$^{\circ}C$	Temperatur
$U$	$V$	Spannung
$\dot{V}$	$\frac{l}{min}$	Volumenstrom
$\Delta x$	$mm$	Wandstärke

Tabelle 0.1: Formelzeichen

# Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Ausgeschrieben
<i>ltg</i>	low Temperature Grid
<i>htg</i>	high Temperature Grid
<i>lth</i>	low Temperature House
<i>hth</i>	high Temperature House
<i>vfg</i>	Volumeflow Grid
<i>vfh</i>	Volumeflow House
<i>HTS</i>	Heat Transfer Station
<i>prim</i>	primäre Seite
<i>sec</i>	sekundäre Seite
<i>calc</i>	berechnete Größe
<i>mea</i>	gemessene Größe
<i>nom</i>	Größe aus dem Auslegungsfall
<i>grid</i>	netzseitig
<i>house</i>	hausseitig

Tabelle 0.2: Abkürzungen





# Kapitel 1

## Einleitung

Für einen mit dem Auto zu der Technischen Universität München anreisender Student ist der Anblick des Twin-Cubes des Leibniz-Rechenzentrum nichts Unbekanntes. Vor allem an kalten Tagen ist die Abwärme des Rechenzentrums in Form von Kondenswasser deutlich erkennbar. Mit dem Verweiß auf das ungenutzte Abwärmepotenzial wollte ich meine Einleitung beginnen. Jedoch stellte sich bei der Recherche heraus, dass die Technische Universität München die Abwärme der Rechner zur Heizung des restlichen LRZ Gebäudes verwendet. [1]

Das Interesse an der Abwärmenutzung liegt im Sommer 2022 neben der omnipräsenten Diskussion über die Klimakrise auch an dem gegenwärtigen Ukraine-Krieg, infolgedessen die Angst vor einer Gasknappheit in Deutschland ausbrach. Denn Gas stellt mit  $345 \text{ TWh}$  von insgesamt  $724 \text{ TWh}$  nahezu die Hälfte der Endenergie im Wärmesektor zu Verfügung[2]. Dass einige Menschen sich vor einem kalten Winter fürchten, ist somit nachvollziehbar. Auch der Präsident der Technischen Universität München rief in einer E-Mail zum Energiesparen auf und kündigte eine Reduktion der Raumtemperatur in den Gebäuden der Universität an[3]. Neben der Sparsamkeit in Kriegszeiten muss allerdings auch langfristig der Verbrauch konventioneller Energieträger reduziert werden, um den Klimawandel aufzuhalten. Denn mit einem Drittel ist die Raum- und Prozesswärme für einen beachtlichen Anteil an dem  $\text{CO}_2$  Ausstoß Deutschlands verantwortlich[2].

Eine Möglichkeit zur Reduktion dieser Emissionen stellt die Nutzung von Abwärme dar. Der AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.) schätzt, dass mit Hilfe des ungenutzten Abwärmepotenzials 19 Millionen Tonnen  $\text{CO}_2$  pro Jahr eingespart werden könnten. Dies entspricht dem jährlichen  $\text{CO}_2$  Ausstoß von 2.2 Millionen deutscher Bürger[2]. In dem Bericht des AGFW's wird zwischen unterschiedlichen Quellen für Abwärme differenziert. Während die durch Industrie erzeugte Abwärme heiß, dafür aber oft entlegener ist, gibt es etliche kleinere Abwärmequellen, die überwiegend zugänglicher, aber kälter sind. Um allerdings das gesamte Potenzial der Abwärme in Deutschland nutzen zu können, sind gerade diese kleineren Quellen von Bedeutung, speziell vor dem Hintergrund einer steigenden Nachfrage nach Klimaanlage und einem Zuwachs von Rechenzentren. Beides Objekte, welche sich durch eine hohe, zumeist ungenutzte Abwärmemenge auszeichnen. Als Positivbeispiel für die Verwendung dieser Abwärme können erste Supermärkte in Europa genannt werden. Diese nutzen die Abwärme ihrer Klimageräte, um damit ihre eigenen Räumlichkeiten zu heizen. Teilweise

sind sie sogar in der Lage überschüssige Wärme in Fernwärmenetze einzuspeisen. Mit dieser Technologie können zwischen 60% und 70% des ansonsten anfallenden  $CO_2$ 's eingespart werden[4]. Die Verwendung konservativer Heizungssysteme in Supermärkte kann so gänzlich überflüssig werden.

Sowohl die geringen Temperaturen der Abwärmequellen als auch die zahlreichen kleineren Wärmeproduzenten stellen bestehende Wärmenetze vor große Herausforderungen. Um dieser Herausforderungen Herr zu werden, müssen Veränderungen vorgenommen werden. So können beispielsweise geringere Temperaturen des Netzes durch dezentralisierte Wärmepumpen bei den Konsumenten vor Ort ausgeglichen werden. Die geringen Temperaturen des Wärmenetzes werden so vor Ort um die benötigten Grade angehoben. Um effektiv Wärmepumpen verwenden zu können, ist allerdings eine Kopplung der Sektoren zwischen elektrischer und thermischer Energie vonnöten, da eben jene Wärmepumpen stets mit Strom betrieben werden. Die Folgen eines Netzes mit dezentralisierten Produzenten können seit Jahren im elektrischen Bereich beobachtet werden. So gibt es hier, vor allem getrieben durch die Integration von erneuerbaren Energien, ein sehr flexibles Netz. Während tagsüber durch Photovoltaik und Windkraftanlagen sehr viel Strom erzeugt wird, müssen konventionelle Stromkraftwerke in der Lage sein, Fluktuationen der Stromversorgung sehr schnell auszugleichen. Hierfür ist eine gute Kommunikation der Produzenten untereinander, aber auch zwischen Produzenten und Konsumenten notwendig.

Eine weitere Herausforderung, die beide Netze betrifft, die im elektrischen Kontext allerdings bereits gemeistert wurde, ist das Auftreten von Prosumern. Dies sind Stakeholder an einem Markt, die als Erzeuger und Verbraucher fungieren. Die zu bewältigende Aufgabe besteht hierin eine gute Kommunikation sicher zustellen, wann eben jene als Produzent und wann sie als Konsument auftreten. Ebenfalls müssen die Netze auf bidirektionalen Energiefluss ausgelegt sein. Als Beispiel für einen Prosumer ist vor allem im ländlichen Raum die weite Verbreitung von Photovoltaikanlagen auf Dächern anzuführen. So sind einzelne Häuser tagsüber meist fähig, den Eigenbedarf an elektrischer Energie zu decken und zusätzlich dem Netz Strom zu zuführen. Nachts hingegen treten sie als Konsument auf und müssen eben jenen Strom aus dem Netz beziehen.

Im Gegensatz zu dem bereits in der Praxis installiertem Stromnetz hinkt die thermische Versorgung deutlich hinterher. Um jenen Rückstand aufzuholen, gibt es einige Labore, in denen eben jene Herausforderungen eines dezentralisierten und bidirektionalen thermischen Netzes erforscht und bewältigt werden. Im Rahmen eines solchen Labors wird diese Bachelorarbeit geschrieben. Das Interesse liegt hierbei auf der bidirektionalen Wärmeübergabestation eines Prosumers. Diese soll in der Arbeit in Betrieb genommen und charakterisiert werden.

# Kapitel 2

## Stand der Technik

### 2.1 Stand der Technik Wärmenetz

Wärmenetze stellen neben dezentralisierten, individuellen Heizungssystemen eine gemeinschaftliche Möglichkeit der Deckung des Wärmebedarfs von Abnehmern dar. Neben Faktoren wie dem Aufbau der Netze und der Art der Wärmeerzeugung ist vor allem die Versorgungstemperatur eine sehr charakteristische Kenngröße. Gerade von dieser hängt oft die Effizienz des Netzes ab. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die Entwicklung der Wärmenetze gegeben werden.

#### 2.1.1 historische Entwicklung von Wärmenetzen

Den Beginn dieser Technologie machten in den 1880er Jahren mit Wasserdampf gefüllte Betonrohre in den USA. Diese Netze wurden vor allem in Gebieten mit hoher Nachfrage, also hauptsächlich in Städten errichtet. Da das Heizungsmedium auch in die höher gelegenen Wohnungen transportiert werden musste, war Dampf sehr praktisch. Hierfür wurde das Wasser auf Temperaturen über  $100^{\circ}\text{C}$  erhitzt. Die Netze damals verfügten über ein zentrales Heizkraftwerk und verteilten den Dampf in überirdischen Rohrleitungen zu den Abnehmern.[5]

Diese sehr ineffizienten und durchaus gefährlichen Systeme wurden in den 1930er-Jahren adaptiert und die Rohre wurden fortan nicht mehr mit Wasserdampf, sondern mit flüssigem, unter Druck stehendem Wasser durchströmt[6]. Durch diesen erhöhten Druck wurde es möglich, weiterhin mit über  $100^{\circ}\text{C}$  heißem Wasser die transportierte Wärmemenge zu erhöhen und gleichzeitig die Verluste zu reduzieren. Außerdem wurde, um die geringe Effizienz der Dampferzeuger zu steigern, eine Kraft-Wärme-Kopplung durchgeführt[5].

Ab 1980 etablierten sich erstmals Netze der dritten Generation. Aus Effizienzgründen sank die Netztemperatur zum ersten Mal unter die  $100^{\circ}\text{C}$ . Bei Temperaturen zwischen  $60^{\circ}\text{C}$  und  $90^{\circ}\text{C}$  wurde es erstmals wirtschaftlich, diversere Wärmequellen zu verwenden. So besteht bereits bei dieser Generation die Möglichkeit für Solaranlagen oder anderen Erneuerbaren, Energien den Netzen Wärme zu zuführen.[5]

Der aus der Geschichte der Fernwärme abzuleitende Trend ist also eine Steigerung der Effizienz durch eine Reduktion der Vorlauftemperatur. Wobei neben der steigenden Effizienz auch die Möglichkeit der Einbindung von Abwärme oder kleineren Wärmequellen mit der Minderung der Temperaturen einhergeht.

Mit Hilfe von modernerer Technik bindet man die Verbraucher an sich auch in die Veränderung des Netzes mit ein. Hierbei wird unter anderem auf großflächigere Heizkörper wie Fußbodenheizungen gesetzt, welche geringere Vorlauftemperaturen als klassische Heizkörper benötigen. Als Resultat dieser Anpassungen können Fernwärmenetzwerke der vierten Generation bei Temperaturen unter  $60^{\circ}\text{C}$  betrieben werden. Bei dieser Art von Fernwärmenetzen handelt es sich allerdings weiterhin um einen sehr zentralisierten Ansatz, der auch stets auf feste Temperaturen angewiesen ist. [6]

Um den Trend der Temperatursenkung weiter fortzusetzen, operieren Fernwärmenetze der fünften Generation bei noch niedrigeren Temperaturen. Diese können unter  $40^{\circ}\text{C}$  fallen und sind teilweise nur wenige Grade über der Bodentemperatur [6]. Diese geringen Temperaturen reichen selten aus, um die benötigte Energie der Endverbraucher im Wärmebedarfsfall zu decken. Hierfür wird deshalb von kleinen Wärmepumpen Gebrauch gemacht, welche das Netzwasser wiederum als thermische Energiequelle verwenden. Anders als in den vorherigen Wärmenetzgenerationen sind bei der fünften Generation Wärme- und Kältenetz nicht mehr getrennt. Die niedrigen Temperaturen des Netzes können somit auch zur Kühlung verwendet werden. Aufgrund der Aktualität des Themas sind die Grenzen der fünften Generation noch nicht festgelegt. In [7] wird eine solche Definition gefordert.

Da die Dezentralisierung der Energieerzeuger weiter voranschreitet, treten Prosumer immer öfter auf und teilweise ist kein klassischer Produzent mehr in dem Netz vorhanden.

### 2.1.2 Prosumer

Wie gerade herausgearbeitet wurde, tritt sowohl in thermischen als auch in elektrischen Netzen ein neuer Teilnehmer an diesen Netzen auf. In diesem Abschnitt soll kurz genauer auf den Prosumer eingegangen werden. Das Wort Prosumer setzt sich aus den Begriffen 'consumer' und 'producer' zusammen. Ursprünglich beschreibt es einen Stakeholder an einem Markt, der das gehandelte Produkt zeitweise selbst herstellt und anbietet und andernfalls auf das Angebot des Marktes zurückgreift[8]. Eine hohe Anzahl an Prosumern führt in dem jeweiligen Markt zu einer größer werdenden Dezentralisierung der Produktion. Das Prinzip ist im Stromsektor weit verbreitet. Hierbei treten beispielsweise Einfamilienhäuser mit Photovoltaikanlagen auf dem Dach als Produzenten auf. Diese versorgen sich selbst mit Strom. Bei einem Überschuss kann dieser auf dem Markt verkauft werden. Sollte zu wenig Strom produziert werden, wird dieser auf dem Markt eingekauft.

Jacobs erweitert diese Definition um zwei weitere Kreise[9]. Hier werden Prosumer eher als Teilnehmer an dem Markt verstanden. So werden auch Personen oder Firmen, die dem Markt als Speicher zur Verfügung stehen, als Prosumer gesehen. Unter diese Definition fällt ebenfalls die größer werdende Anzahl an Elektroautos. In Deutschland sind im Jahre 2022  $\sim 620.000$  reine Elektroautos und  $\sim 566.000$  Plug-in-Hybride zugelassen. Diese Autos können bei intelligenter Laderegelung leicht Spannungsspitzen im Netz abfangen und können damit dem Markt als Speicher oder Puffer dienen. Des Weiteren werden von Jacobs auch Verbraucher, die angepasst konsumieren, als Prosumer bezeichnet[9]. So gibt es Stromverträge von Anbietern, die Strom zu gewissen Zeiten billiger anbieten können. Falls ein

Haushalt in einer solchen Periode den Strom bezieht, zählt er folglich laut dieser Definition als Prosumer.

Durch diese weiter gefasste Definition des Prosumers lässt sich ein Trend für den jeweiligen Markt ableiten. Dieser muss flexibler und besser vernetzt werden, um schneller auf den Wechsel zwischen Nachfrage und Angebot reagieren können.

### 2.1.3 bidirektionale Fernwärmenetze

Im Gegensatz zu den in Unterabschnitt 2.1.1 beschriebenen konventionellen Netzwerken soll in diesem Kapitel auf die bidirektionalen Fernwärmenetze eingegangen werden. Hierbei unterscheiden sich die Netzwerke durch die Fähigkeit, das Medium zur Übertragung von Wärme innerhalb der Rohrleitungen in beide Richtungen zirkulieren zu lassen. Von dieser sehr neuen Technologie erhofft man sich eine weitere Steigerung der Effizienz. Die Orientierung des Volumenstromes wird in diesen Netzwerken der Nachfrage des Netzes angepasst. Der Exergievorteil steckt hierbei darin, dass beispielsweise stets die kürzeste Verbindung zwischen Erzeuger und Verbraucher gewählt wird. Mit der Verkürzung des Weges, den das warme Wasser zurücklegen muss, sinken auch die Verluste, die bei dem Transport durch Rohrleitungen auftreten. Des Weiteren kann durch eine intelligente Wahl der Richtung die Effizienz einer etwaigen zentralen Produktion gesteigert werden. Denn je niedriger die Temperatur des Mediums ist, das erwärmt werden muss, desto höher ist die Effizienz des zentralen Erzeugers. Noch steckt diese Technologie in den Kinderschuhen, weshalb sich noch keine finale Designoption etabliert hat. In [10] ist hierbei folgende Version abgebildet.

Hierbei ist schematisch dargestellt, wie eben jenes Netz betrieben werden kann.

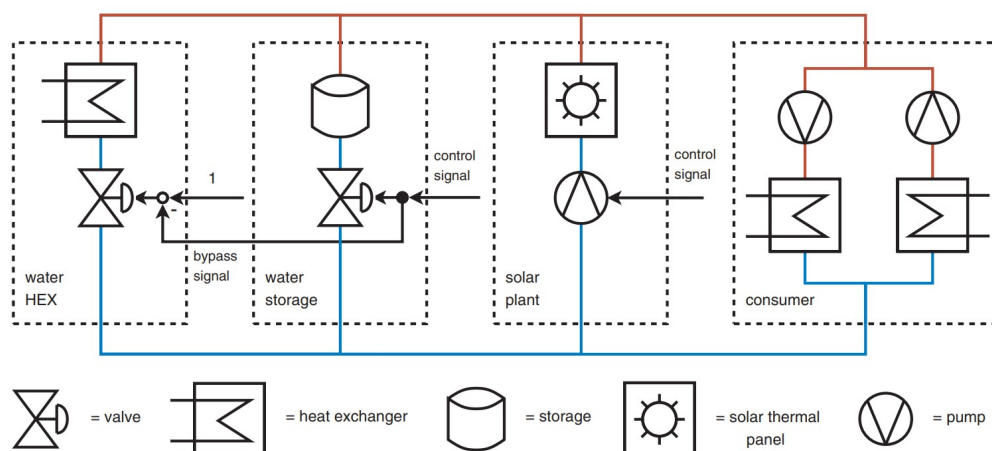


Abbildung 2.1: betrachteter Teil des thermischen Netzes, [10]

Gewählt wurde dieses Beispiel, weil es neben einem Prosumer und externen Erzeugern einen Speicher beinhaltet. Dieser stellt eine elegante Variante dar, überflüssige, aber zu dem Zeitpunkt nicht benötigte Wärme in dem Netz zu speichern. Diese gespeicherte Energie kann mit einer Verzögerung von einem Verbraucher bezogen werden. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Pumpen, so wie in den meisten Designvorschlägen, als Teil der Wärmeübergabestation des Prosumers ausgeführt sind. Das gezeigte Prosumerdesign ermöglicht es, durch zwei entge-

gegengesetzt orientierte Pumpen, die Richtung des Volumenstroms zu beeinflussen. In unterschiedlichen Publikationen wird versucht, ein Vergleich zwischen uni- und bidirektionalen Wärmenetzen aufzustellen. Als zentrale Vergleichsgröße wird hierbei die Exergieeffizienz verwendet. Sowohl in [11] als auch in [12] gewinnen bidirektionale Ausführungen den Vergleich. Es wird allerdings angemerkt, dass hierbei das Abwärmepotenzial von großer Bedeutung für die Effizienz des Netzes ist. In [10] wird gar ein ökologischer und ökonomischer Vergleich angestellt. Auch diese Gegenüberstellungen gewinnt das bidirektionale Netz.

## 2.2 Stand im CoSES

Nun soll eben jenes Netz, in dem diese Arbeit geschrieben wird, genauer beschrieben werden. Das CoSES-Labor an der Technischen Universität München in der Munich School of Engineering bildet ein Microgrid mit fünf Häusern, vier Einfamilienhäusern und ein Mehrfamilienhaus und je einem Netz auf thermischer, elektrischer und kommunikativer Ebene verbunden sind. Das Labor wurde gegründet, um das weltweit erste Labor zu sein, in dem die Abhängigkeiten der elektrischen und der thermischen Seite erforscht werden.

Jedes der Häuser tritt in dem Microgrid als Prosumer auf. Die einzelnen Gebäude sind mit verschiedenen Hardwareelementen ausgestattet, so dass eine möglichst große Palette an unterschiedlichen Verbrauchern und Erzeugern untersucht werden kann. Ebenfalls sind thermische Speicher in Form von großen Tanks verbaut. Diese fassen zwischen 500 und 2000 Litern. Bei großen Tanks ist der Vorteil, dass ein beabsichtigter Temperaturgradient sich in dem Tank einstellen kann. Somit können verschiedene Temperaturen aus dem Tank entnommen werden.

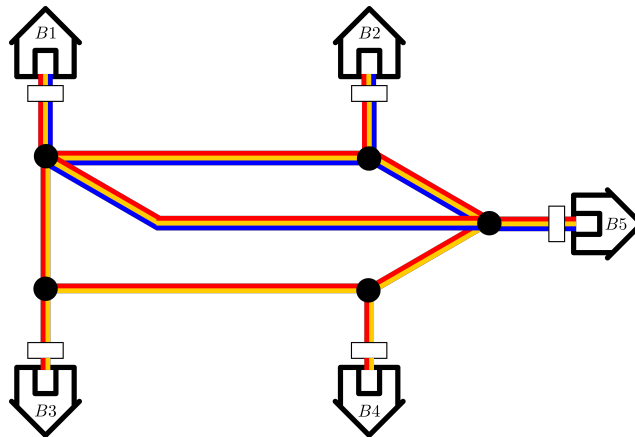


Abbildung 2.2: Schema des thermischen Netzes im CoSES-Labor, [13]

Das thermische Netz ist anders als bisherige Fernwärmenetze nicht radial aufgebaut. Es verbindet drei der Gebäude mit Leitungen von drei verschiedenen Temperaturniveaus. Die anderen beiden Häuser sind an der Hochtemperatur- und der Niedrigtemperaturleitung angeschlossen. In Abbildung 2.2 ist ein Schema dieses Netzes zu sehen. Die unterschiedlich gefärbten Linien stellen verschiedene Temperaturniveaus dar. Die blaue Verbindung visualisiert das tiefe Niveau. Analog entsprechen orange dem mittleren und rot den hohen Temperaturen. Jede Leitung

kann bidirektional betrieben werden. Um ebenfalls hier diverse Szenarien abbilden zu können, befinden sich in den Netzen zwischen je zwei Häusern Emulatoren. Somit können verschiedene Rohrlängen und die damit verbundenen thermischen und hydraulischen Verluste nachempfunden werden.

Die thermische Verbindung des Netzes mit den jeweiligen Häusern stellen die Wärmeübergabestationen dar. Diese bestehen aus Wärmepumpen und den in dieser Arbeit charakterisierten Wärmeübertragern. Beides ist sowohl für das Heizen und das Abkühlen des Mediums geeignet. Die Wärmepumpen sind nur als Unterstützung vorhanden und können bei zu geringen Temperaturen hinzugeschaltet werden. Im Aktionsmodus dient anschließend das Netz als Wärmequelle. Hierbei tritt folglich eine Sektorenkopplung auf, da die thermische Ebene mit der elektrischen verbunden wird. Dank der kommunikativen Verbindung der Häuser und des Netzes kann die zentrale Regelung die Bedürfnisse der jeweiligen Prosumern bedienen. So kann ein Haus entweder mit einem weiteren Haus in Austausch treten oder mit allen vier anderen. Im CoSES-Labor hat man sich für das 'return to supply' Schema entschieden, da dieses zwar regelungstechnisch aufwendiger, aber insgesamt effizienter ist. [14]

Prinzipiell ist das gesamte Labor so aufgebaut, dass Änderungen leicht eingearbeitet werden können, parallel aber der Betrieb aufrecht erhalten werden kann. Außerdem ist das Labor für Temperaturen bis zu  $85^{\circ}\text{C}$  ausgelegt[15].

## 2.3 Wärmeübergabestationen im Vergleich

Da die Wärmeübergabestation das zentrale Forschungsobjekt dieser Arbeit darstellt, wird nun auf unterschiedliche Charakteristika dieser eingegangen. Wärmeübergabestationen sind die thermische Verbindung des Netzes mit dem Haus. Zunächst wird zwischen direkter und indirekter Hausübergabe unterschieden. Bei einer indirekten Hausübergabe sind die Wasserkreisläufe des Hauses und des Netzes getrennt. Bei dieser Art wird die Wärme durch einen Wärmeübertrager von einem Kreislauf auf den anderen übertragen. Im Gegensatz dazu verfügt das Haus bei einer direkten Hausübergabe über keinen eigenen Wasserkreislauf, sondern ist direkt an den des Netzes angeschlossen. Vorteile einer direkten Hausübertragung sind hierbei die erhöhte Effizienz durch die Abwesenheit des Wärmeübertragers und der damit einhergehenden Übertragungsverluste. Aufgrund der geringeren Verluste können diese Systeme mit tieferen Versorgungstemperaturen betrieben werden. Vorteile einer indirekten Hausübertragung sind hingegen leichtere Verantwortungsverteilungen im Schadensfall, da der Schaden leicht der jeweils betroffenen Seite zugeordnet werden kann. Außerdem müssen bei zwei Kreisläufen die Rohrleitungen der Hausseite nicht auf die gleichen Temperaturen und Drücke ausgelegt werden, die auf Netzseite herrschen. Dadurch können die Kosten deutlich gesenkt werden.[16]

Bei der genaueren Betrachtung des Einspeisevorgangs eines Prosumers fällt bei einem 'supply' und einem 'return' Rohr auf, dass es vier Einspeisekombinationen gibt. In der Literatur werden diese als 'supply to return', 'supply to supply', 'return to return' und 'return to supply' bezeichnet. In Abbildung 2.3 sind jene Möglichkeiten schematisch aufgeführt. Ersichtlich sind drei verschiedene Kreisläufe. Die 'return'- und die 'supply' Rohre stellen den Netzkreislauf dar. Die mit Grün dar-

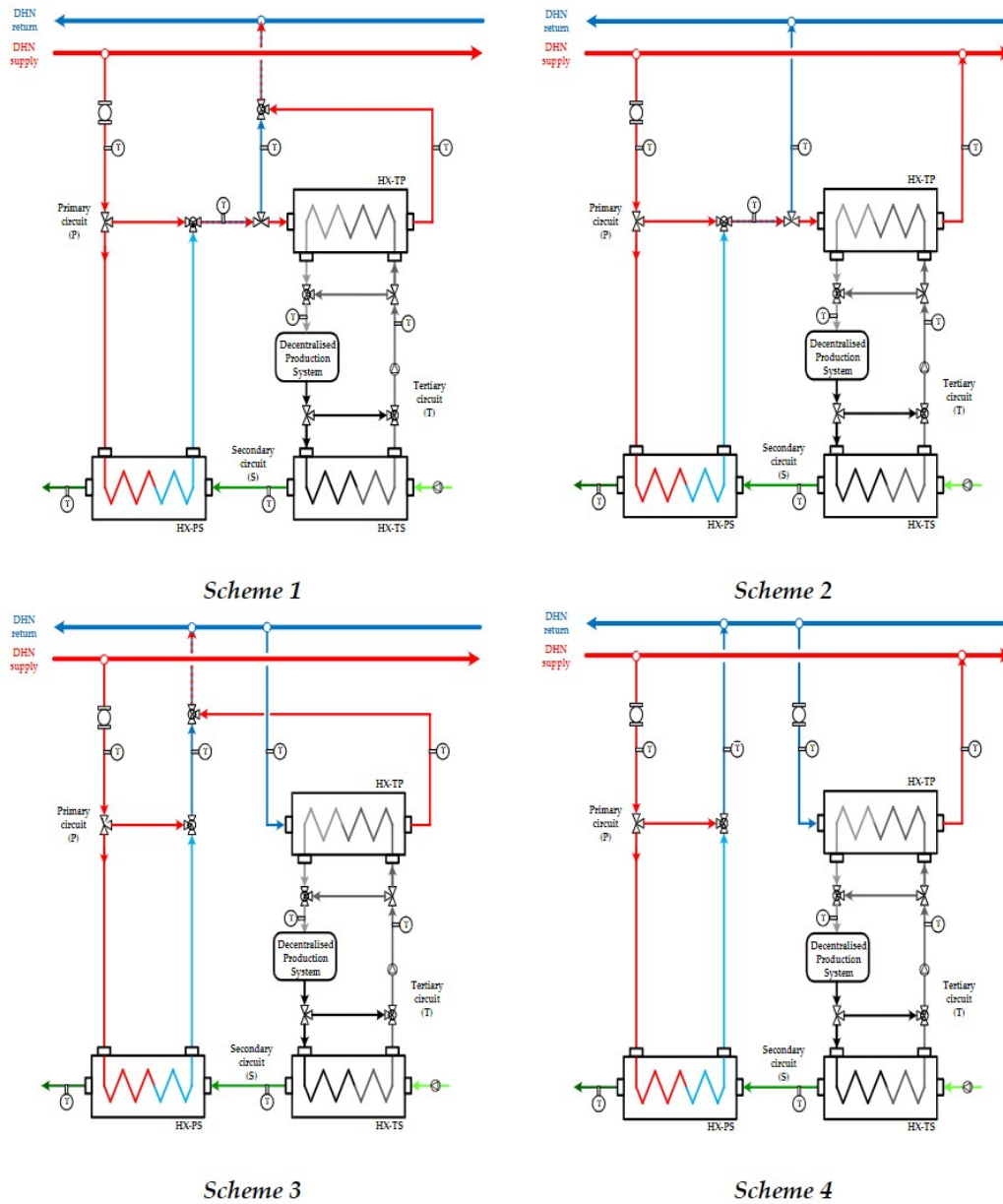


Abbildung 2.3: Schemata der Einspeisemöglichkeiten für dezentralisierte Produktionen: Scheme 1: 'supply to return'; Scheme 2: 'supply to supply'; Scheme 3: 'return to return'; Scheme 4: 'return to supply', [17]

gestellten Rohre stehen für den Hauskreislauf. Alle übrigen Leitungen bilden den Kreislauf, der das Netzsystem mit dem Haussystem verbindet. Da sich das Fluid des Netzes nicht mit dem des Hauses mischt, handelt es sich um einen indirekten Anschluss. In jeder Anschlussmöglichkeit können die Häuser sowohl über den Wärmetauscher 'HX-PS' Wärme aus dem Netz beziehen, als auch über die hauseigene Produktion Wärme selbst erzeugen. Diese wird über den Wärmetauscher 'HX-TS' zunächst dem Haus und bei Überproduktion mittels 'HX-TP' dem Netz zugeführt. Die Varianten unterscheiden sich somit durch die Anschlüsse des Wärmetauschers 'HX-TP'.



Im Verbrauchermodus wird bei Schema 1 das Medium aus dem 'supply' Rohr entnommen und gibt die Wärme in 'HX-PS' ab. Daraufhin wird das erkaltete Wasser dem 'return' Rohr wieder zugeführt. Im Erzeugermodus wird es in den Wärmetauscher 'HX-TP' weitergeleitet und dort durch die überflüssige Wärme erwärmt. Anschließend wird es ebenfalls in das 'return' Rohr eingespeist. Eben jener Hub der 'return' Temperatur ist der Grund für die seltene Verwendung jener Technik. Denn dies führt bei der zentralen Produktion zu geringeren Effizienzen und somit zu der Notwendigkeit, die Regelung des gesamten Systems zu ändern.

Die gestiegene Effizienz des zentralen Wärmeerzeugers wird hierbei stets mit einer geringeren Effizienz des dezentralen Einspeisers bezahlt. Denn je tiefer die Eingangstemperatur in einen Wärmetauscher oder eine Heizapparatur ist, desto höher ist die Effizienz des jeweiligen Apparates.

Bei dem Prinzip 'supply to supply' wird genau wie in 'supply to return' konsumiert. Der einzige Unterschied bei dem Erzeugermodus ist, dass nicht in das 'return' Rohr eingespeist wird, sondern wieder in das 'supply' Rohr. Somit wird die Wärme gleich dem nächsten Konsumenten zu Verfügung gestellt; die 'return' Temperatur wird auch nicht angehoben. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass folgende Mitglieder des Netzes nicht mit einer fixen Temperatur rechnen können. Denn je nachdem, ob der Prosumer produziert, konsumiert oder nichts von beidem, herrscht eine andere Temperatur. Im Gegensatz zu bestehenden Netzen können diese Temperaturdifferenzen größer sein als bisher üblich.

Das Verhalten im Verbrauchermodus bei Schema 3 ist analog zu den anderen beiden. Im Erzeugermodus hingegen wird aus der 'return' Leitung entnommen und nach Passieren von 'HX-TP' auch wieder in diese eingespeist. Die Folge ist erneut ein Anstieg der 'return' Temperatur und damit ein Effizienzverlust im gesamten System.

Die finale Version 'return to supply' stellt die meistverbreitete Lösung dar. Der Verbrauchermodus ist erneut identisch zu den bereits erklärten Schemata. Im Erzeugermodus wird das durch Konsumenten abgekühlte Wasser in der 'return' Leitung abgezapft und in den Wärmetauscher 'HX-TP' geleitet. Anschließend wird es der 'supply' Leitung zugeführt. Im Vergleich zu den anderen Systemen wird nicht die 'return' Temperatur angehoben. Des Weiteren wird die Wärme effizienter genutzt, da nicht das bereits erwärmte 'supply' Medium weiter erhitzt werden muss, sondern das bereits erkaltete 'return' Fluid. Nachteilig ist hierbei allerdings, wie bei Schema 2, eine Variation der Temperatur für folgende Prosumer.[17]

Hydraulisch bewertet Burcar die Einspeisemodelle, in denen das Anzapf- und Einspeiserrohr dasselbe ist, als für den Netzbetreiber schlechter. Die Begründung liegt hierbei darin, dass für einen kontrollierbaren Volumenstrom durch den dezentralen Produzenten zunächst ein hydraulischer Widerstand eingebaut werden muss. Dieser kann dem benötigten Durchfluss angepasst werden. Bei den Modellen 'return to supply' und 'supply to return' hingegen profitiert der Betreiber des Netzes durch die Notwendigkeit einer einspeisereigenen Pumpe. Diese Pumpe muss hierbei den Druckunterschied von Vor- und Rücklauf ausgleichen.[18]



# Kapitel 3

## Forschungsfrage

In diesem Kapitel soll die genaue Forschungsfrage formuliert und das Thema abgegrenzt werden. Zentraler Forschungsgegenstand ist die bidirektionale Wärmeübergabestation in dem CoSES-Labor in Garching. Aufgrund der baugleichen Ausführung in allen Häusern und zwischen allen Temperaturniveaus werden sich die experimentellen Untersuchungen auf die Wärmeübergabestation von Haus 1 und hierbei auf den Warm-Medium Temperaturstrang beschränken. Ein Schema dieser Wärmeübergabestation ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Da die Wärmeübergabestation die thermische Hausseite mit der thermischen Netzseite verbindet, sind sowohl für die Inbetriebnahme als auch für die Charakterisierung viele weitere Komponenten des Labors zu verwenden. Diese bereits erforschten Bestandteile der Netze sind in dieser Arbeit nicht von Interesse.

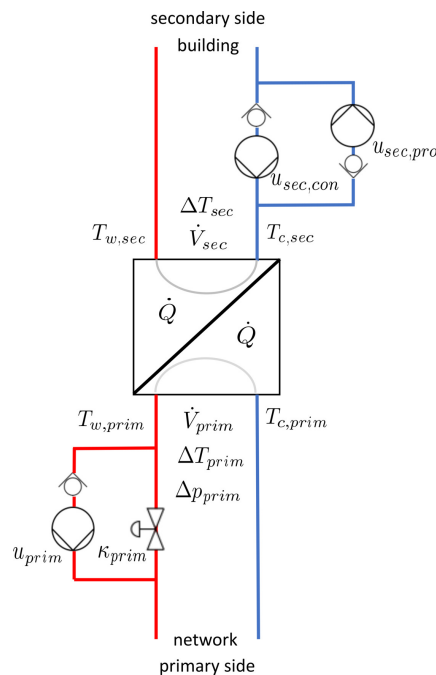


Abbildung 3.1: Schema der Wärmeübergabestation, [19]

Um die Wärmeübergabestation verstehen zu können, ist es wichtig, sich zunächst einen Überblick über den Stand der Technik zu verschaffen. Für die Inbe-

triebnahme muss eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche für die Steuerung der Grundfunktionen der einzelnen Komponenten der Wärmeübergabestation erstellt werden. Diese ist notwendig, um den Versuchsstand zu steuern, ihn zu überwachen und die interessanten Daten zu erfassen. Ferner muss zuerst die korrekte Funktion der einzelnen Komponenten überprüft werden. Dies umfasst das Ansteuern von Aktoren und die Erfassung und Plausibilitätskontrolle von Sensordaten.

Für die Charakterisierung sind zunächst interessante Betriebszustände auszuarbeiten. Durch diese wird das thermohydraulische Verhalten des Versuchsstandes abgebildet. Anschließend können die erfassten Daten als Basis für die Charakterisierung dienen. Um realistische Betriebszustände wählen zu können, ist es notwendig, sich mit bereits bestehenden Heizungssystemen auseinanderzusetzen. Nach Ausarbeitung dieser Betriebszustände muss daraufhin softwaretechnisch ein automatisierter Versuchsablauf erstellt werden. Des Weiteren müssen einige Anpassungen an dem Versuchsstand getroffen werden, damit jene Betriebszustände zu erreichen sind. Anschließend muss man sich Gedanken über die zu erfassenden Größen machen. Hierbei sind vor allem das zeitliche Verhalten von Temperatur und Volumenfluss von Interesse, da mit diesen beiden Größen unter anderem die übertragene Wärmemenge ausgerechnet werden kann. Diese ist für die spätere Regelung in Bezug auf das gesamte Netz von großem Interesse. Die somit erfassten Daten sollen anschließend aufbereitet werden.

Mithilfe dieser Bachelorarbeit sollen Fragen wie: "Verhält sich der Wärmeübertrager so, wie der Hersteller es angibt?", "Stellen die Pumpen die zu erwartende Leistung zu Verfügung?" oder "Wie lange dauert der Wärmeübertrag von der Netzseite zur Hausseite?" beantwortet werden.

# Kapitel 4

## Versuchsstand

### 4.1 Ziel des Versuchsstands

Mit Hilfe des Versuchsstands soll das Verhalten der bidirektionalen Wärmeübergabestation isoliert untersucht werden. Besonders von Bedeutung ist hierbei das thermische Verhalten. Hierfür sind die Charakteristika einzelner Komponenten wie die der Pumpen oder des Wärmetauschers zu analysieren. Neben den thermischen Verlusten soll unter anderem die Trägheit des Systems untersucht werden.

Die Versuche und damit auch der Versuchsaufbau können in zwei Fälle unterteilt werden. Während des ersten Teils befindet sich Haus 1 im Verbrauchermodus. Hierbei bezieht eben jener Prosumer Wärme aus dem Netz, um mit dieser thermischen Energie den eigenen Bedarf zu decken. Im realen Betriebsfall würde das Haus die Wärme über das Heizungssystem an die Räume abgeben. Folglich würde das Heizungswasser kälter werden. Da im Labor allerdings keine zu heizenden Räume verbaut sind, wird das Wasser durch einen weiteren Wärmetauscher gezielt abgekühlt. Mit diesem Bauteil wird somit der reale Wärmeverlust nachgestellt. Im zweiten Teil befindet sich Haus 1 in Erzeugermodus. Hierbei ist das Ziel des Gebäudes, durch überflüssige Energie im hauseigenen Kreislauf über das Netz Haus 2 mit Wärme zu versorgen. Durch diese Unterstützung soll Haus 2 den seiner Wärmebedarf decken können.

### 4.2 Aufbau des Versuchsstandes

Im Folgenden soll der Aufbau des Versuchsstandes für die Charakterisierung der zu untersuchenden Wärmeübergabestation vorgestellt werden. Das in Abbildung 2.2 gezeigte gesamte thermische Netz des Labors kann der Einfachheit halber auf den in Abbildung 4.1 umrahmten Kreislauf reduziert werden. In diesem kleineren Aufbau können weiterhin jegliche Interaktionen der Prosumer nachgestellt werden. Durch die Reduktion auf zwei Häuser und einen Teil des gesamten Netzes vereinfacht sich der Versuchsstand. Dadurch kann der Fokus leichter auf die Charakterisierung der Wärmeübergabestation gelegt werden.

Das Netz des Versuchsaufbaus besteht, wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, aus der Wärmeübergabestation von Haus 1, der Wärmeübergabestation von Haus 2, sowie den zwei 'Grid Emulatoren', die die beiden Gebäude verbinden.

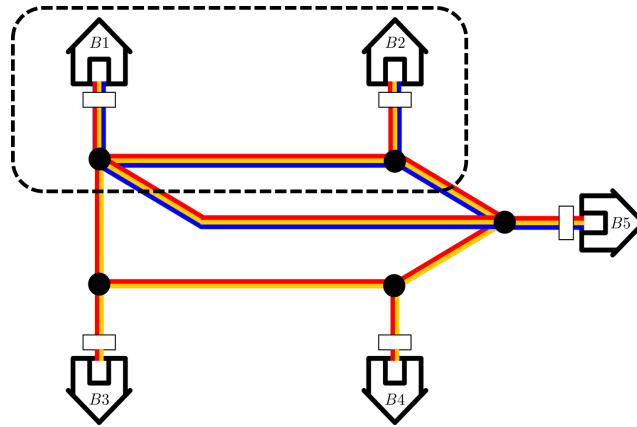


Abbildung 4.1: betrachteter Teil des thermischen Netzes, [13]

Eine angedachte Funktion der 'Grid Emulatoren' ist das Nachstellen von thermohydraulischen Verlusten. Dies ist notwendig, da die verbauten Rohrlängen sich stark von denen realer Rohrleitungen unterscheiden. Um die wirklichkeitsgetreuen thermischen Verluste im Labor zu emulieren, wird die Wassertemperatur durch das Beimischen von kaltem Wasser reduziert. Die zweite Aufgabe der 'Grid Emulatoren' ist das Nachempfinden der zeitlichen Trägheit der Rohrleitungen. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, sind zusätzlich zu der Kaltwasserbeimischung noch Heizstäbe verbaut. Mit Hilfe dieser Kombination bieten die 'Grid Emulatoren' die Möglichkeit, Wasser auf gewünschte Temperaturen zu kühlen oder zu heizen. Die Wärmeübergabestation von Haus 2 ist nur auf Netzseite von Bedeutung. Zum einen schließt sie den Wasserkreislauf auf Netzseite. Zum anderen dient die Pumpe im Verbrauchermodus als Antrieb des netzseitigen Kreislaufs. Im Erzeugermodus soll sie nur durchflossen werden.

Wie durch die Kreise in Abbildung 4.2 hervorgehoben wird, ist die Wärmeübergabestation in Haus 1 von speziellem Interesse. Diese stellt die Verbindung des netzseitigen Kreislaufes mit dem des Hauses da. Außerdem stellt sie invers zu Haus 2 im Erzeugermodus die Pumpe für den Antrieb des netzseitigen Wassers.

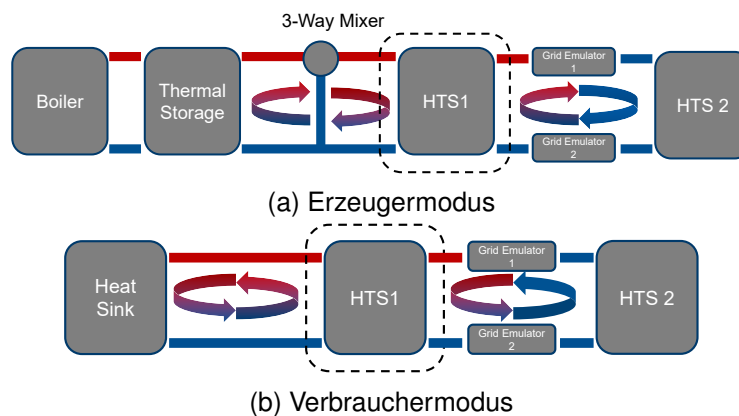


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau

Für den Testlauf auf Hausseite sind zwei Versuchsaufbauten geplant, einer davon für den Erzeuger- und einer für den Verbrauchermodus. Für Letzteren ist, wie

in Abschnitt 4.1 erklärt, eine Kühlung des Wassers vonnöten. Hierfür wird die 'Heat Sink' verwendet. Diese kühlt über einen weiteren Wärmetauscher das Wasser mit Hilfe eines laborinternen Kühlwasserkreislaufes ab. Gesteuert wird die Kühlleistung hierbei über eine PID-geregelte Pumpe. Ein Schema des hausseitigen Kreislaufs im Verbrauchermodus ist in Abbildung 4.2b zu sehen.

Im Erzeugermodus wird eine Erwärmung des Wassers durch die hauseigene Heizung gewährleistet. Der genaue Aufbau besteht aus einem Warmwasserspeicher, einem Boiler und einem 3-Wege-Mischer. Der Speicher wird zu Beginn von dem Durchlauferhitzer geladen. Während des Versuchs wird der Speicher angezapft. Dieses Wasser wird über einen PID-geregelten 3-Wege-Mischer auf die gewünschte Temperatur eingestellt. Ein Schema des hausseitigen Kreislaufes im Erzeugermodus ist in Abbildung 4.2a zu sehen.

### 4.3 Überblick über die Wärmeübergabestationen im CoSES-Labor

Im Folgenden soll genauer auf den Aufbau der Wärmeübergabestation eingegangen werden. Die Wärmeübergabestationen des CoSES-Labors folgen alle dem in Abbildung 4.3 gezeigten Schema. Dennoch unterscheiden sie sich teilweise geringfügig. So sind beispielsweise unterschiedliche Ventile automatisiert.

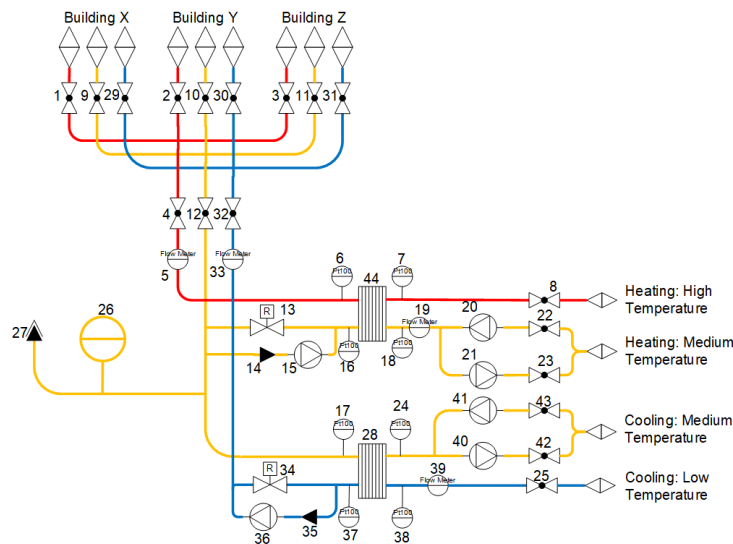


Abbildung 4.3: Schema der Wärmeübergabestationen im CoSES-Labor, [20]

Die Wärmeübergabestation stellt die Verbindung des Wärmenetzes und des jeweiligen Hauses dar. Auf Netzseite erlaubt sie dem Prosumer, darüber zu entscheiden, mit welchen der anderen Teilnehmer des Netzes er in welchen Austausch treten möchte. Gebäude 1 kann beispielsweise von Haus 2 und 3 Wärme beziehen oder zusammen mit Haus 4 Haus 5 unterstützen. Um einen solchen Austausch zu ermöglichen, müssen zunächst wahlweise die Ventile (4, 12, 32) geöffnet werden. Soll mit Haus X in Austausch gegangen werden, ist eine Auswahl der Ventile (1, 9, 29) zu öffnen. Analog wird sind (2, 10, 30) für Haus Y und (3, 11, 31) für Haus Z zu schalten. Die jeweils erste Zahl eines Tripels steht für die Rohrleitung des ho-

hen Temperaturniveaus; die zweite für das mittlere Temperaturniveau und die dritte folglich für das tiefe. Da ein Austausch stets zwischen der mittleren Leitung und der entweder hohen oder niedrigen Leitung stattfindet, muss immer das mittlere Ventil und das jeweilig andere geöffnet sein. Für den Austausch zwischen Haus 1 und Haus 2 auf dem hohen-mittleren Temperaturniveau sind folglich die Ventile (4, 12) und (1, 9) von Haus 1 und Haus 2 zu öffnen.

Neben der Verbindungsauswahl über Ventile verfügen die Wärmeübergabestationen noch über die Steuerung des Volumenstroms. So beinhaltet jede Wärmeübergabestation auf Netzseite eine Pumpe. Diese Pumpe ist zudem mit einem Bypass ausgestattet, in dem sich ein Regelventil befindet. Soll eben genannte Pumpe 15 aktiv werden, muss zunächst das Regelventil 13 geschlossen werden. Anschließend stellt sich ein gegen den Uhrzeigersinn orientierter Volumenstrom ein. Für den Fall, dass der Volumenstrom in die entgegengesetzte Richtung fließen soll, wird die Pumpe eines anderen Hauses aktiv. Ferner muss das Regelventil 13 geöffnet werden. Zum Schutz der Pumpe 15 wird diese gegen ein etwaiges Überdrücken durch ein Durchschlagventil gesichert.

Auf Hausseite verfügt jedes Gebäude über jeweils zwei Pumpen in der Wärmeübergabestation. Jeder dieser Pumpen ist ein Regelventil vorgeschaltet, das zum einen die Pumpe vor einem Überdrücken schützt und zum anderen eine ungewollte Zirkulation in einem kleinen Kreis verhindert. Soll auf Hausseite im Uhrzeigersinn gepumpt werden, muss zunächst das Regelventil 22 geöffnet werden. Anschließend kann durch Pumpe 20 ein Volumenstrom erzeugt werden. Gegen den Uhrzeigersinn muss von Pumpe 21 durch das geöffnete Ventil 23 gepumpt werden. Für den Verbrauchermodus wird auf beiden Seiten in Richtung des Uhrzeigersinnes gepumpt; Für den Erzeugermodus hingegen invers. Analog zu dem beschriebenen Warm-Medium Temperaturstrang verhält sich das Kalt-Medium Niveau.

#### **4.4 Wärmeübergabestation von Haus 1**

Da die Wärmeübergabestationen in allen Häusern des Labors nach dem gleichen Schema errichtet wurden, genügt es, exemplarisch eine Wärmeübergabestation zu charakterisieren. Anschließend kann von dem Verhalten der einen untersuchten auf das Verhalten der anderen geschlossen werden. In Abbildung 4.4 ist die genaue Ausführung des Warm-Medium Temperaturstrangs der Wärmeübergabestation in Haus 1 zu sehen. Da auch die Wärmeübergabestation der Warm-Medium und der Medium-Kalt Leitungen gleich sind, genügt es, eine der beiden zu betrachten. In dieser Arbeit wird folglich die Wärmeübergabestation des Warm-Medium Temperaturniveaus in Haus 1 charakterisiert.

Aus Abbildung 4.4 ist zu entnehmen, dass der Aufbau dem Schema aus Abbildung 4.3 folgt. Die genaue Ausarbeitung ist hierbei aber eben in Abbildung 4.4 zu sehen. In Tabelle 8.1 sind die in Abbildung 4.4 verbauten Komponenten aufgeführt.



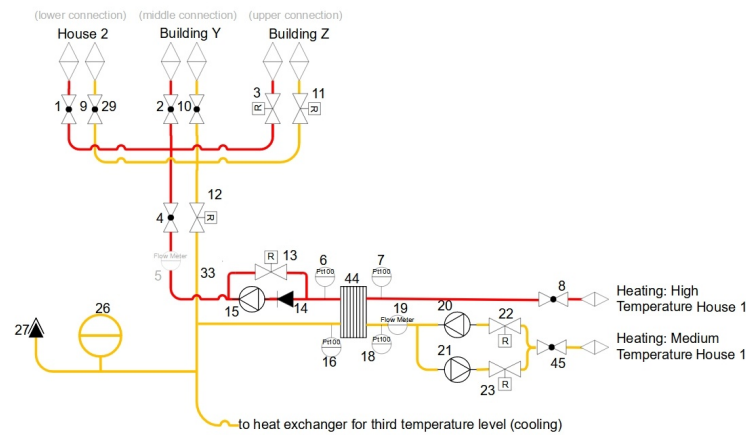


Abbildung 4.4: Schema der Wärmeübergabestation von Haus 1 des CoSES-Labor, [21]

## 4.5 Hardware des Versuchstandes

### 4.5.1 Sensoren

**Drucksensor** Im Labor sind die Drucktransmitter DSU206F002 und DSI206F002 der Firma Sauter verbaut. Die Funktionsweise dieser Drucksensoren wird piezoresistiver Messeffekt genannt. Hierbei tritt durch Zug- oder Druckbelastungen in einer Membran eine Polarisation auf. Diese Ladungen werden anschließend mit Hilfe eines Integrationsverstärkers erhöht. Daraufhin wird die Ladung in ein Signal zwischen 2 und 10 V umgewandelt, um schließlich von dem Computer wiederum in die entsprechenden *bar* umgerechnet zu werden. [22] Die montierten Fühler haben einen Messbereich von 0 bis 6 *bar* und verfügen über eine lineare Kennlinie [23].

**Temperatursensor** Um die Temperatur zu messen, sind in dem CoSES-Labor PT100 Temperaturfühler verbaut. Bei diesem Typen wird eine konstante Stromstärke an den Fühler angelegt. Anschließend misst man den Spannungsunterschied vor und nach dem Durchfließen des Fühlers. Hieraus kann der Widerstand berechnet werden. Dieser wiederum ist abhängig von der Temperatur des Metalls. Mit Hilfe einer bekannten Kennlinie kann leicht die Temperatur des Metalles und somit die des umfließenden Mediums bestimmt werden. Das Besondere bei PT100 Sensoren ist ihr genormter Nennwiderstand von 100  $\Omega$  bei 0°C. Das verwendete Metall ist Platin. [22]

**Durchflussmesser** Es sind zwei unterschiedliche Sensoren für die Bestimmung des Volumenstroms verbaut.

**Ultraschall-Wasserzähler** Dieses Messgerät bestimmt mit Hilfe von Ultraschallwellen die Durchflussmenge. Es werden zwei Schallwellen emittiert, wobei eine stromabwärts und die andere stromaufwärts gesandt wird. Aus der Laufzeitdifferenz kann die Geschwindigkeit des Mediums bestimmt werden.[24]

Im CoSES-Labor sind die Ultraschall-Wasserzähler Hydromess H von Molline montiert. Der Hersteller gibt an, mit 1,3l/h einen sehr geringen Anlaufwert des Zählers

zu haben. Des Weiteren zeichnet er sich durch eine bidirektionale Volumenstrommessung aus. [25]

**Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID)** Die Funktionsweise dieses Messgerätes beruht auf dem des Faradayschen Induktionsgesetzes. Das Medium wird hierbei als der sich bewegende Leiter angesehen. Somit wird eine Spannung induziert, aus dem die Durchflussmenge errechnet werden kann[22]. Im Labor sind die magnetisch-induktiven Messgeräte der Firma Endress+Hauser mit Namen Proline Promag E100 verbaut.

#### 4.5.2 Aktoren

**Ventile** In der Versuchsstrecke sind vier verschiedene Ventile verbaut. Diese sind in Aufgabengebiete einzuteilen. Während zwei Ventiltypen für das Blockieren oder Freigeben der Rohrleitungen zuständig sind, mischen andere Ventile Medien verschiedener Rohre.

**Absperrventile** Für die Richtungssteuerung von Volumenströmen sind Absperrventile unerlässlich. Das Blockieren des Volumenstroms erfolgt bei Kugelhahnventilen durch das Drehen einer durchbohrten Kugel. Die Bohrung steht daraufhin orthogonal zu der Rohrleitung und der Durchfluss ist blockiert. Bei Durchfluss wird die Bohrung der Kugel in Rohrrichtung gedreht. Im CoSES-Labor sind automatisierte Ventile und manuelle vorzufinden. Die automatisierten Ventile werden mittels der zentralen Steuerung geschaltet. Ein boolesches Signal wird an einen Elektromotor weitergegeben, der das Ventil öffnet oder eben schließt. Die automatischen Ventile können zu Testzwecken allerdings auch in einen manuellen Modus gestellt werden. Neben den elektrischen Ventilen sind auch rein manuell zu schaltende Ventile verbaut. Durch Drehen eines Griffes um  $90^\circ$  kann bei diesen die Stellung des Ventils verändert werden.

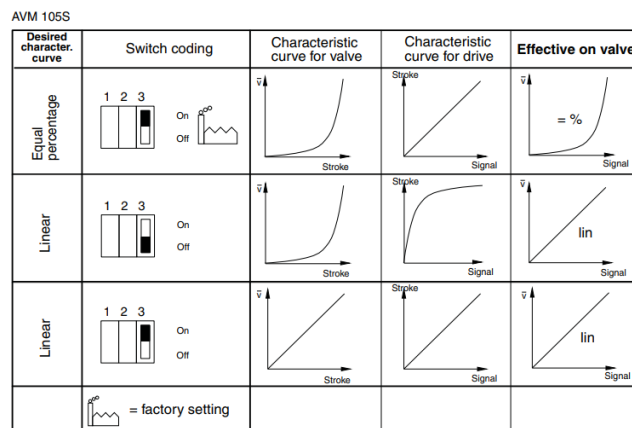


Abbildung 4.5: Kennlinien des Proportionalventils Sauter AVM105SF132, [26]

**Proportionalventil** Diese Art von Ventilen beeinflusst die Durchflussmenge des Mediums. Der Aufbau ist ähnlich wie der eines Absperrventils. Durch Drehung

der Kugel und der darin vorhandenen Bohrung kann die Durchflussmenge beeinflusst werden. Diese Ventile sind stets automatisiert. Sie bekommen von dem System allerdings kein boolesches, sondern ein analoges Signal von 0 bis 10V. Mit steigender Signalgröße stellt sich der Winkel der Bohrung um. Folglich vergrößert sich die Öffnung der Bohrung zur Rohrleitung und letztlich ändert sich der Durchfluss. Der Hersteller Sauter gibt in dem Datenblatt des im Labor verbauten Ventils AVM105SF13 die in Abbildung 4.5 dargestellten Ventilkennlinien an [26]. Durch die Stellung eines Schalters kann die gewünschte Ventilkennlinie gewählt werden. Neben den von Sauter verwendeten Ventilen sind auch Hora MC100/24 verbaut. Bei dieser Art von Proportionalventil wird der Volumenstrom durch den Hub des Ventils geregelt. Bei dem Hora MC100/24 beträgt der maximale Hub 20mm [27].

**Mischventile** Während Absperr- und Proportionalventile in einer Rohrleitung sitzen und somit lediglich zwei Verbindungen besitzen, verfügen Mischventile über drei oder vier Anschlüsse. Bei einem 3-Wege-Mischventil wird die Mischung zweier Volumenströme mit nur einem Abfluss geregelt. Bei einem 4-Wege Mischventil geschieht selbiges mit zwei Abflüssen.

**Pumpen** Der Versuchsstand verfügt über zwei verschiedene Pumpen. Die hausseitigen Pumpen in Haus 1 sind IMP NMT Plus ER 25/40-180. Hierbei handelt es sich um eine Permanentmagnetmotorpumpe. Der Vorteil dieser Pumpenbauart ist, dass keine zusätzliche elektrische Energie notwendig ist, um ein Magnetfeld aufzubauen. Dadurch steigt die Effizienz dieser Pumpenart. Die Pumpe verfügt über eine Förderhöhe von 4,1m. [28]

Im Gegensatz hierzu stehen die etwas größeren IMP NMT PLUS ER 25/90-180 Pumpen. Mit 100W verfügt sie über 78W mehr und hat damit eine Förderhöhe von 8,52m [29]. Die beiden Pumpenkennlinien sind in Abbildung 4.6a und Abbildung 4.6b zu sehen.

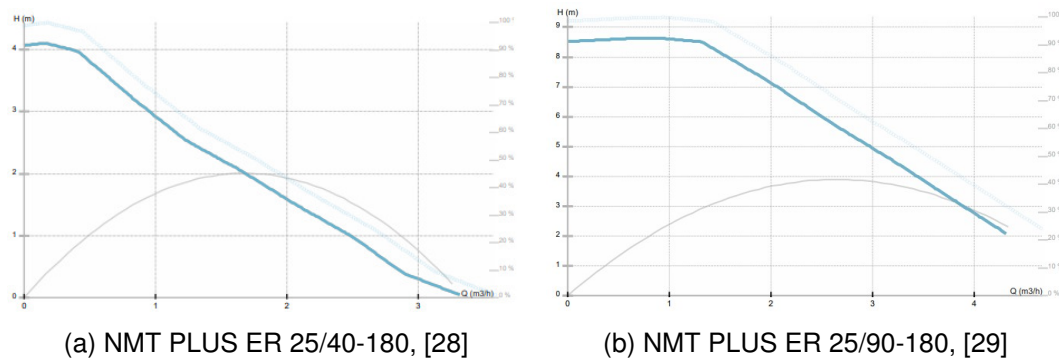


Abbildung 4.6: Pumpenkennlinien

### 4.5.3 Wärmeübertrager

Eine, wenn nicht gar die zentrale Anlagenkomponente in der Wärmeübergabestation ist der Wärmeübertrager. Diese Apparaturen ermöglichen den Austausch thermischer Energie zwischen zwei Fluiden ohne direkten Kontakt oder Vermischung.

Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt die thermische Energie des wärmeren Fluids zu dem kälteren. Die Wärme wird hierbei durch Konvektion von dem warmen Medium auf die Trennwand übertragen. Von dieser Wand wird die Energie auf der anderen Seite von der kalten Flüssigkeit wieder abgegriffen. Die Trennwandoberfläche stellt dabei eine kritische Größe dar. Ersichtlich wird dies bei der Betrachtung der Formel für die Konvektion:

$$\dot{Q} = \rho * \omega * A * c_p * \frac{\delta T}{\delta x} \quad (4.1)$$

Hieraus ist zu entnehmen, dass die Fläche als proportional zu der übertragenen Wärmemenge gesehen werden kann. Deshalb wird versucht, innerhalb eines Wärmeaustauschers ein sehr großes Oberflächen-zu-Volumenstrom-Verhältnis herzustellen. Um dies zu gewährleisten, werden die Volumenströme entweder in viele kleinere Rohre aufgeteilt oder die Flüssigkeiten werden durch sehr enge Spalten an mehreren Platten vorbeigeleitet. Neben der Fläche stellt auch der Wärmedurchgangskoeffizient eine sehr wichtige Kenngröße dar. Dieser beschreibt, wie viel Wärme pro Flächeneinheit und Temperaturdifferenz übertragen werden kann. Folglich überträgt ein Wärmetauscher mit hohem Wärmedurchgangskoeffizient sehr gut Wärme, während ein geringer Wärmedurchgangskoeffizient für eine gute Dämmung eines Objektes sorgt. Genau dies ist allerdings bei einem Wärmeübertrager nicht erwünscht. Wärmeübertrager sind stets bidirektional, da wie bereits beschrieben die Energieflussrichtung durch die Temperaturen der Fluide vorherbestimmt ist. Unterschieden wird dennoch zwischen Gleichstrom- und Gegenstromwärmetauschern. Wie die Namen vermuten lassen, ist bei Gleichstromwärmetauschern die Richtung der Ströme durch den Wärmetauscher gleich orientiert, während bei Gegenstromwärmetauschern die Flussrichtungen entgegengesetzt sind.

In der Wärmeübergabestation im CoSES-Labor ist der Gegenstromwärmetauscher B25THx20/1P-SC-S(4x1" & 22U) von SWEP verbaut. Laut Hersteller verfügt er über eine Wärmetauscherfläche von  $1,13 \text{ m}^2$ . Insgesamt setzt sich diese Fläche aus 20 einzelnen Platten zusammen. Der Wärmedurchgangskoeffizient im Auslegungsfall beträgt laut Hersteller  $5270 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$ . [30]

Das Verhalten des Wärmeübertragers ist von großer Bedeutung für das Verhalten des gesamten Systems. Deshalb sind die thermische Trägheit und die Verluste des Wärmeübertragers von enormem Interesse für die Charakterisierung der Wärmeübergabestation.

## 4.6 Software des Labors

Die Softwareumgebung des CoSES-Labors ist in Ni Veristand eingebettet. Hierbei bietet Ni Veristand neben den Möglichkeiten, In- und Outputs zu generieren, Daten zu speichern, sowie mit der Hardware in Echtzeit zu kommunizieren auch die Möglichkeit, Simulationsmodelle einzupflegen. So ist es kompatibel mit gängigen Programmen wie Labview, Matlab etc. Um mit der Menge von Daten umgehen zu können, ist die Steuerung des Labors in fünf Teile unterteilt. Über das 'Logic' Modell kann beispielsweise der Benutzer manuell Inputs an das System übergeben. Alternativ können an dieser Stelle auch Simulationsmodelle eingepflegt werden. Anschließend werden die Setpoints aus 'Logic' mittels des Modells 'Control' in

digitale und analoge Signale übersetzt. Eben jene Signale werden in dem Modell 'Safety' überprüft. Hierbei wird kontrolliert, ob die Entscheidungen die Sicherheit des Systems gefährden. So werden Fälle wie zum Beispiel das Anlaufen von Pumpen bei gleichzeitig geschlossenem Absperrventil verhindert. Sollte das System akut bedroht sein, wird über die 'Safety' die 'Veristand API' aktiviert, welche wiederum das System in einen sicheren Zustand reguliert. Neben den Eingängen aus 'Logic' werden in der 'Safety' auch die Eingänge aus der 'Conversion' überprüft. Dieses Modell wandelt die Signale der Hardwarekomponenten in reale physikalische Größen um. Bei einem Drucktransmitter mit linearer Kennlinie, einem Ausgangssignal von  $4\text{-}20\text{mA}$  und einem Messbereich von  $0\text{ bis }6\text{bar}$  entspricht das Signal von  $10\text{mA}$  einem realen Druck von  $2,25\text{bar}$ . Zusätzlich gibt es noch das 'VeriStand Interface'. Als einziges Modell läuft dieses auf LabView. Es wird verwendet,

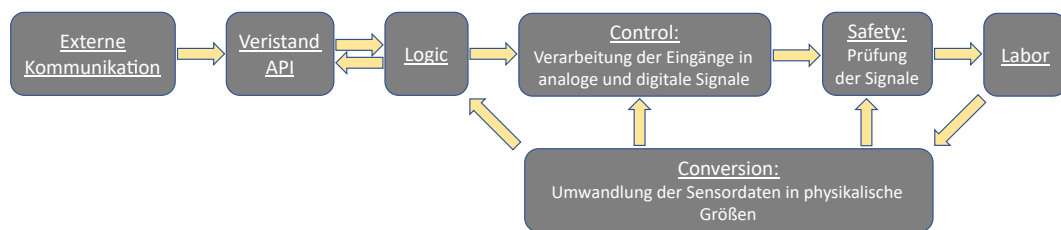


Abbildung 4.7: Aufbau der Software

um neue Software zu testen oder unter anderem auch für die Speicherung von Daten. Hierbei ist allerdings der Umweg über eine API notwendig. Eben jene 'Veristand API' wird auch aktiv, sollte das 'Data Logging' aktiviert sein. Eine vereinfachte Visualisierung der Softwarestruktur ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

Als Visualisierungsoberfläche wird von Ni Veristand der UI-Manager verwendet. Diese Oberfläche erlaubt es dem Benutzer eigene interaktive Darstellungen anzufertigen. Dazu können die Signale aus der 'Conversion' in die Oberflächen eingebaut werden. Somit ist es dem Benutzer möglich, in Echtzeit aus dem Kontrollraum das Labor zu überwachen.

Diese Software läuft auf den Realtime Controllern 'IC-3171' von NI selbst. Über Ethernet Kabel steht dieser sowohl mit den Host-PCs im Steuerraum als auch mit den Schaltschränken im Labor in Verbindung. Diese wiederum verfügen über je zwei Controller, ein 'NI IC 3171' für die Steuerung und Überwachung der thermischen Hardware und ein 'NI PXIe 8880' für die elektrischen Komponenten des Hauses. Während ein 'REM IO' alle Outputs setzt und analoge Signale liest, übernimmt ein 'compactRIO' die Erfassung der restlichen Sensordaten.



## Kapitel 5

# Inbetriebnahme der Wärmeübergabestation

In der DIN EN ISO 12100 wird die Inbetriebnahme als die erstmalige Kontrolle des Verhaltens und der Eigenschaften einer Anlage oder einer Maschine bezeichnet. Außerdem wird das Objekt während dieses Vorganges auf Fehler überprüft. [31] Laut Weber kann eine Inbetriebnahme in drei Schritte unterteilt werden. Nach der elektrischen und mechanischen Vollendung der Anlage beginnt die Inbetriebnahme mit der Herstellung der Betriebsbereitschaft. Hierbei werden erstmalig die Grundfunktionen in ihrer Gesamtheit überprüft. Ferner wird die Anlage in einen ähnlichen Zustand gebracht, in dem der spätere Regelbetrieb stattfindet. Die Stabilisation dieses Status über längere Zeit findet in dem Probetrieb statt. In diesem Stadium werden erstmals unter realen Betriebsbedingungen Tests durchgeführt. Abgeschlossen wird die Inbetriebnahme durch eine sogenannte Leistungsfahrt. Hier ist final ein stabiler Betrieb aller Betriebszustände gefordert. [32]

### 5.1 Hardware

Im CoSES-Labor werden neue Bestandteile des Labors von studentischen Hilfskräften in Zusammenarbeit mit einem Werkstattmeister gebaut. Die erste Kontrolle, wie beispielsweise die Dichtigkeitsprüfung, werden ebenfalls von genannten Mitarbeitern durchgeführt. Obwohl sowohl die Wärmeübergabestation als auch andere Teile des Versuchsstands bereits verwendet worden waren, bestand die Herstellung der Betriebsbereitschaft dennoch zunächst in der Testung der Sensoren und der Aktoren. So wurden alle Ventile mittels einer manuellen Steuerung innerhalb der Regelung geöffnet und geschlossen. Es musste darauf geachtet werden, dass sowohl die Ventile die korrekte Aktion ausführten als auch das richtige Rückmeldesignal in der Steuerung empfangen wurde. Hiermit wurde einerseits die Funktion des Ventils und andererseits auch die korrekte Adressierung des Signals verifiziert. Für die Überprüfung der Pumpen wurde ein Kreislauf innerhalb des Versuchsstands verwendet, in dem sich mindestens ein Volumenstromzähler befand. Anschließend wurde das Eingangssignal der Pumpe von 1 bis 10 gesteigert. Über die Durchflussmesser wurde die Funktion der Pumpen verifiziert. Hierbei wurde festgestellt, dass die netzseitige Pumpe in Haus 2 eine zu geringe Fördermenge aufwies. Diese Pumpe wurde anschließend durch eine Pumpe mit mehr Leistung

ersetzt. Anzumerken ist hier, dass die Lage der Pumpen ungünstig gewählt ist. Die Pumpen auf der Netzseite befinden sich jeweils auf dem höchsten Punkt im Kreislauf. Bei einer Öffnung des Wasserkreises und dem damit einhergehenden Lufteintritt steigt eben jene Luft innerhalb der Rohrleitungen nach oben und bleibt in der Pumpe. Dies birgt die Gefahr des Trockenlaufens. Infolgedessen kann es zum Versagen einer Pumpe kommen. Um die Pumpe zu entlüften, sind zwar Entlüftungsventile angebracht, diese sind aber auf derselben Höhe wie die Pumpen selbst montiert. Letztlich muss ein Volumenstrom im System vorherrschen, um die Luftblase in Bewegung zu versetzen. Mit diesem Strom wird die Luft an die Entlüftungsventile transportiert und folglich aus dem System gedrückt. Im Zuge der Pumpentestung konnte auch die Funktion der Regelventile überprüft werden. Ähnlich wie bei den Pumpen wurde das Eingangssignal dieser Ventile von 1 bis 10 und von 10 bis 1 verändert. Zunächst war über die ventileigenen Kippschalter eine lineare Kennlinie ausgewählt. Bei der Überprüfung der Kennlinie wurde allerdings das Abbildung 5.1 ersichtliche Verhalten dokumentiert. Zu erkennen ist hierbei eine große Hysterese zwischen den Volumenströmen aus dem auf- und dem absteigenden Signal. So unterscheidet sich der Durchfluss bei gleichem Signal nach aufsteigen-

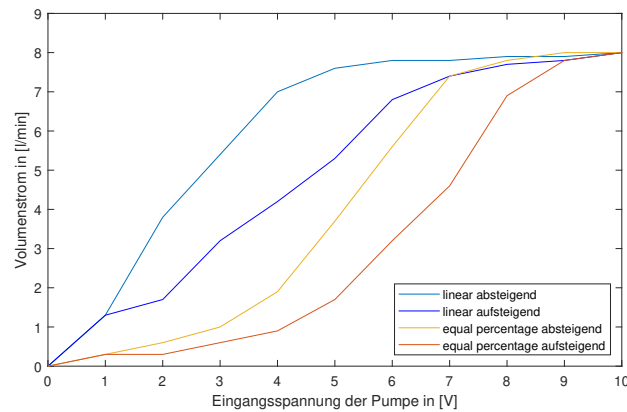


Abbildung 5.1: Ventilkennlinie

der Ansteuerung um  $2,8\text{ l/min}$  von dem bei absteigender Signalansteuerung. Des Weiteren ist bei absteigender Anfahrung in dem Intervall von  $6 - 10\text{ V}$  nahezu keine Veränderung im Volumenstrom zu erkennen. Daraufhin wurde durch Umlegen des Kippschalters die Ventilkennlinie „equal percentage“ getestet. Hieraus ergaben sich die anderen beiden Verläufe des Durchflusses. Die Hysterese ist bei dieser Parametrierung zwar genau so groß, allerdings sind lediglich zwischen  $1\text{ V}$  und  $2\text{ V}$  und zwischen  $9\text{ V}$  und  $10\text{ V}$  nur geringe Unterschiede im Volumenstrom zu registrieren. Aufgrund dieses Verhaltens wurde diese Einstellung als geeigneter befunden.

Dazu wurde der Versuchsstand durch die Überbrückung eines 'Grid Emulators' angepasst. Durch den Aufbau des 'Grid Emulators' mit vielen Krümmungen und Einbauten in den Rohren stellt dieser einen nicht zu vernachlässigenden hydraulischen Widerstand dar. Um diesen zu eliminieren, wurde einer der beiden Emulatoren überbrückt. Die Funktion des Heizens und des Kühlen kann auch von einem einzelnen 'Grid Emulatoren' gewährleistet werden.

Die Überprüfung der Sensoren wurde durch eine Plausibilitätskontrolle und einen Doppelcheck durchgeführt. Bei der Plausibilitätskontrolle wurde darauf ge-



achtet, dass sich die Werte in einem realistischen Rahmen befanden. So sollten Temperatursensoren einen Wert ähnlich der Raumtemperatur anzeigen. Dadurch, dass mehrere Sensoren des gleichen Typus in einem Kreislauf verbaut sind, können Ausgabesignale der Sensoren verglichen und somit in gewisser Weise verifiziert werden. In Folge einer solchen Überprüfung wurde festgestellt, dass einer der Volumenstrommesser nicht ordnungsgemäß arbeitete. Bei der Verifizierung dieses Sensors über einen anderen Volumenstrommesser wurden die in Abbildung 5.2 verarbeiteten Datenpunkte erhoben. Abbildung 5.2 zeigt neben dem über den MID korrekt gemessenen Volumenstrom einen unrealistischen Volumenstrom gemessen über den defekten Sensor. Die Volumenstromwerte sind gegen die Eingangs-

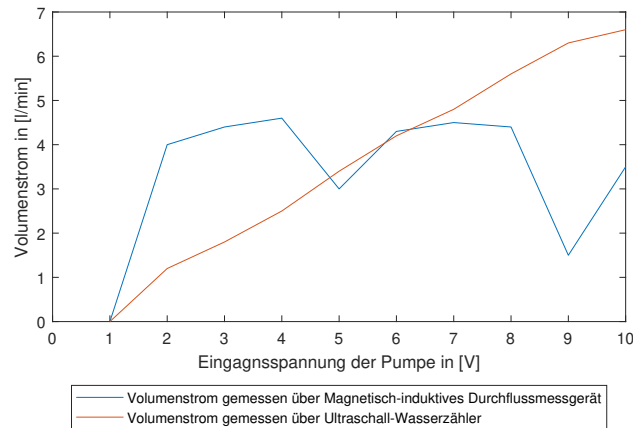


Abbildung 5.2: Volumenstrommessung

spannung der Pumpe angetragen. Durch den Vergleich der beiden Durchflussmesser konnte herausgefunden werden, dass eine Fehlfunktion des Sensors vorlag. Aufgrund dieses Defekts musste der Versuchsstand angepasst werden. Dieser Volumenstrommesser konnte in der Bearbeitungszeit dieser Arbeit nicht ersetzt werden. Unglücklicherweise befand der Sensor sich in dem hausseitigen Kreislauf für den Erzeugermodus. Da der Volumenstrom eine sehr bedeutende Messgröße darstellt, ergab es keinen Sinn, die Erzeugermodi anzufahren. Dieser doch sehr große Wegfall der Tests schmälert allerdings die Aussagekraft der Charakterisierung nicht. Zum einen weist der Wärmetauscher bidirektional die gleichen Eigenschaften auf. Zum anderen sind auf Netzseite in beide Richtungen gleich große Volumenströme zu messen, während auf Hausseite durch die baugleichen Pumpen ein ähnlicher Volumenstrom zu erwarten ist. Während der Inbetriebnahme wurde des Weiteren festgestellt, dass der vierte, angedachte Betriebszustand auf zu hohen Temperaturen operieren würde. Da die Sensoren teilweise nur für Temperaturen bis  $85^{\circ}\text{C}$  ausgelegt sind, wurde sich dazu entschlossen lediglich drei der geplanten vier Betriebszustände anzufahren.

Der nächste Schritt in der Inbetriebnahme ist der Probetrieb. Hierfür wurde sowohl in dem netzseitigen als auch in dem hausseitigen Heizkreislauf der Verbrauchermodus getestet. Dabei traten zwei Probleme bei der Verwendung des 'Grid Emulators' auf. Es wurde festgestellt, dass der Thyristor für die Heizstäbe defekt ist. Glücklicherweise sind genug 'Grid Emulatoren' im Labor verbaut, weshalb der

Defekt an die Werkstatt weitergegeben wurde und auf ein anderes, funktionierendes Modul zurückgegriffen werden konnte. Ferner öffnete sich immer wieder unerwünscht ein Auslassventil in dem 'Grid Emulator'. Dieses Problem wurde durch eine mechanische Deaktivierung des Ventils behoben. Nachträglich muss die Regelung dieses Auslassventils angepasst werden, allerdings überschreitet dies den Rahmen der gegenwärtigen Arbeit. Abgesehen von diesen kleineren Problemen verlief der Probetrieb ohne Komplikationen. Für die finale Leistungsfahrt wurde ein Verbrauchermodus angefahren und für  $15\text{min}$  gehalten. Dieser Test lief ohne weitere Probleme ab.

## 5.2 Software

Im Folgenden soll zunächst kurz der Aufbau des implementierten Programms beschrieben werden.

Das Schema des Frameworks wurde von Thomas Lickleder erstellt. Zu Beginn der Bachelorarbeit wurde es von mir in Labview implementiert. Es wurde vorbereitet, um später in das Gesamtsystem übernommen zu werden. Es bietet dem Benutzer die Möglichkeit, zwischen einem manuellen und einem automatischen Modus zu wählen.

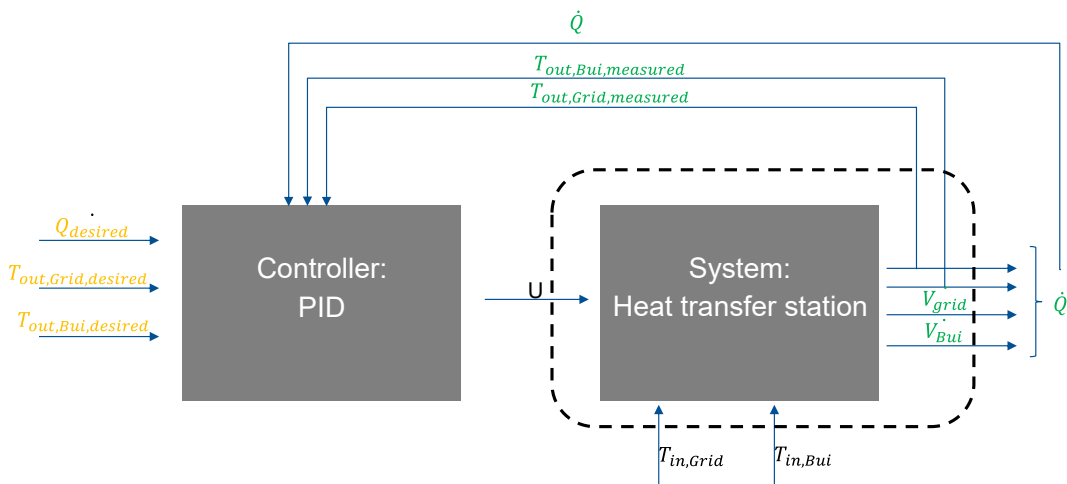


Abbildung 5.3: Systemstruktur

Im automatischen Modus stehen die unterschiedlichen Verbindungen zu den Häusern als Auswahloptionen zur Verfügung. Außerdem sind eine erwünschte zu übertragende Wärmemenge und zwei gewollte Temperaturen als Inputs notwendig. Mit Hilfe dieser Inputs regelt das Programm das System auf die gegebenen Sollwerte. Nach dem Einlesen der Inputs wird mittels eines speziellen PID-Controllers das Eingangssignal der Pumpen und das der Proportionalventile errechnet. Durch diese Anpassung an das Verhalten der Pumpe und des Ventils wird der Volumenstrom in den Rohrleitungen sowohl netz- als auch hausseitig beeinflusst. Über den Durchfluss durch den Wärmeübertrager wird die übertragene Wärmemenge verändert. Eben jene Wärmemenge wird anschließend mit den beiden resultierenden Temperaturen in den PID-Regler überführt, mit den Eingangswerten verglichen und das Ausgangssignal erneut wieder auf die Aktoren übertragen. Für etwaige PID-

Gains sowie Parameter für die Gewichtung der Wärmemenge und der Temperatur sind Eingabemöglichkeiten hinterlegt. Die Bestimmung dieser Werte überschreitet allerdings den Rahmen dieser Bachelorarbeit. In Abbildung 5.3 ist die Struktur der Software für Steuerung abgebildet.

Das Programm entscheidet abhängig von dem Vorzeichen der Wärmemenge über die Orientierung des Volumenstromes und damit, ob sich das Haus im Verbraucher- oder im Erzeugermodus befindet. Abhängig von Verbrauch oder Erzeugung und der Wahl der Austauschpartner im Netz werden anschließend die Ventile geschaltet und die jeweilige richtige Pumpe angesteuert.

Für die Charakterisierung der Wärmeübergabestation wurde in das Framework ein manueller Modus eingebaut. Hiermit ist es möglich, die Spannungen für die Pumpen und das Regelventil, sowie die Stellung der Ventile manuell vorzugeben. Diese Option ist notwendig für die Steuerung der Versuche. Für den automatisierten Ablauf der Tests wurde ein kleines Add-on eingepflegt, das sich automatisch die Werte für die Betriebszustände zieht. Diese Daten wurden in einer Tabelle festgehalten und werden aus dieser an das Programm weiter gegeben. Nach einer zuvor bestimmten Zeit wird anschließend das nächste Wertepaar eingelesen und damit zum nächsten Zustand übergegangen.

Das Programm wurde in den Schritten Probetrieb und Leistungsfahrt mit der Hardware zusammengeführt. Durch die korrekte Funktion des gesamten Systems konnte auch die Funktion des manuellen Modus bestätigt werden.



## Kapitel 6

# Charakterisierung der Wärmeübergabestation

### 6.1 Ausarbeitung der Charakterisierungszustände

Für die Charakterisierung der Wärmeübergabestation sollen Betriebszustände angefahren werden. Neben der Programmierung einer Steuerung für die Anfahrung stellt das Herausarbeiten eben jener Betriebszustände einen wichtigen Teil der Vorbereitungen dar. Nach einigen Überlegungen wurden die ersten Betriebszustände anhand von praxisnahen Werten bestimmt. Hierfür wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen von verbreiteten Heizungssystemen verwendet. Während der Tests sollen alle relevanten Werte zur Analyse des Wärmetauschers betrachtet werden. Von Bedeutung sind hierbei alle messbaren Werte auf beiden Seiten des Wärmetauschers. Um den realen Betrieb möglichst gut nachstellen zu können, wird es auch in den Tests sowohl einen Verbraucher- als auch einen Produktionsmodus geben. Insgesamt sind vier Temperaturen und zwei Volumenströme von Bedeutung. Da das System vier Freiheitsgrade besitzt, werden ebenso viele Werte vorgegeben. Der Einfachheit halber handelt es sich hierbei um je eine Wassertemperatur und eine Spannung für eine Pumpe auf Haus- sowie auf Netzseite.

Trotz unterschiedlicher Temperaturen ist die Aufgabe jedes Heizungssystems, einen Raum/ein Gebäude auf eine gewünschte Raumtemperatur zu erwärmen. Wärmeübertragung lässt sich in drei Wärmeübertragungsarten untergliedern. Wärmestrahlung ist die Art der Wärmeübertragung, die bei besonders hohen Temperaturen von Bedeutung ist. Wärmeleitung dagegen beschreibt den Ausgleich von Temperaturdifferenzen innerhalb von Festkörpern. Konvektion hingegen beschreibt den Transport von Wärme durch sich bewegende Teilchen, wie Luft oder Wasser. Für die Wärmeübertragung in Häusern und Räumen ist vor allem die Konvektion von großer Bedeutung. Nachdem das Wasser durch das Heizungssystem erhitzt worden ist, wird es anschließend in den jeweiligen Raum gepumpt. Dort findet gezielt der Wärmeaustausch zwischen dem Heizungswasser und der Umgebungsluft statt. Wie aus der Formel für Konvektion, siehe Gleichung 4.1 zu erkennen ist, hängt die übertragene Wärmemenge direkt mit der Temperaturdifferenz und der Fläche des Wärmeaustauschers zusammen. Radiatoren in Altbauten werden oft mit einer Vorlauftemperatur von  $90^{\circ}\text{C}$  und einer Rücklauftemperatur von  $60^{\circ}\text{C}$  betrieben. Diese oft gusseisernen Heizkörper verfügen über Lamellen, um die Fläche, über welche

die Konvektion stattfindet, zu vergrößern. Neuere Radiatoren hingegen benötigen lediglich  $75^{\circ}\text{C}$  als Vorlauftemperatur und besitzen meist eine Rücklauftemperatur von  $65^{\circ}\text{C}$ . Diese Temperaturreduktion wird durch eine Vergrößerung der Oberfläche der Radiatoren erreicht. Durch den Anstieg der Fläche kann bei gleichbleibender gewünschter Wärmemenge die Vorlauftemperatur gesenkt werden. Heizungen mit einem effizienzsteigernden Brennwertsystem operieren bei Vorlauftemperaturen von  $60^{\circ}\text{C}$  und Rücklauftemperaturen von  $45^{\circ}\text{C}$ . Der Effekt der Temperaturreduktion durch Flächenvergrößerung wird bei einer Fußbodenheizung maximiert. Fußbodenheizungen genügen Vorlauftemperaturen von lediglich  $40^{\circ}\text{C}$  und Rücklauftemperaturen von  $30^{\circ}\text{C}$ . Diese gerade vorgestellten Temperaturen dienen als Grundlage für die Ausarbeitung der Betriebspunkte. Eine Übersicht über die Heizungssysteme und die jeweiligen Temperaturen ist in Tabelle 6.1 zu sehen.

Heizungssystem	Vorlauftemperatur in [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Rücklauftemperatur in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
alter Radiator	90	70
neuer Radiator	75	65
Brennwertheizung	60	45
Fußbodenheizung	40	30

Tabelle 6.1: Temperaturen gängiger Heizungssysteme

Bei der Bestimmung der Temperaturen orientierte man sich an den gerade herausgearbeiteten Vor- und Rücklauftemperaturen für unterschiedliche Heizungssysteme, siehe Tabelle 6.1. Im Verbrauchermodus soll das Wasser auf Hausseite durch den Wärmeaustausch mit dem Netz eine gewisse Temperatur erreichen, mit der der Heizungsbetrieb gewährleistet ist. Somit sind die Vorlauftemperaturen als eine Art Zieltemperatur zu betrachten, die vom Gebäude benötigt wird, um eine bestimmte Raumtemperatur erreichen zu können. Die Rücklauftemperatur wurde jeweils als gegebene Temperatur am hauseigenen Eingang in den Wärmetauscher gewählt. Als netzseitige Einlasstemperatur wurde die Vorlauftemperatur der jeweiligen Heizung plus einer Verlusttemperatur von  $1,5\text{K}$  im Wärmeübertrager gewählt. Das Schema der Temperaturbestimmung ist in Abbildung 6.1a zu sehen. Hierbei stellen die grünen Temperaturen die gewünschte Temperatur dar. Die violetten Temperaturen visualisieren die angenommenen Verluste, während die orangenen Temperaturen für die resultierenden Temperaturen stehen. Aus der Kombination der Temperaturen aus Tabelle 6.1 und den Verlusten ergeben sich die in Tabelle 6.2 notierten Werte.

Heizungssystem	Vorlauftemperatur Netz in [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Rücklauftemperatur Haus in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
alter Radiator	91,5	70
neuer Radiator	76,5	65
Brennwertheizung	61,5	45
Fußbodenheizung	41,5	30

Tabelle 6.2: Temperaturen für Verbrauchermodus

Im Produktionsfall soll das Haus hingegen als Produzent auftreten und ein anderes Gebäude mit überschüssiger Wärme versorgen. Um ein anderes Haus auf eine gewisse Vorlauftemperatur zu erwärmen, muss das produzierende Gebäude folglich die Vorlauftemperatur plus Verluste bereitstellen. Infolgedessen ergeben

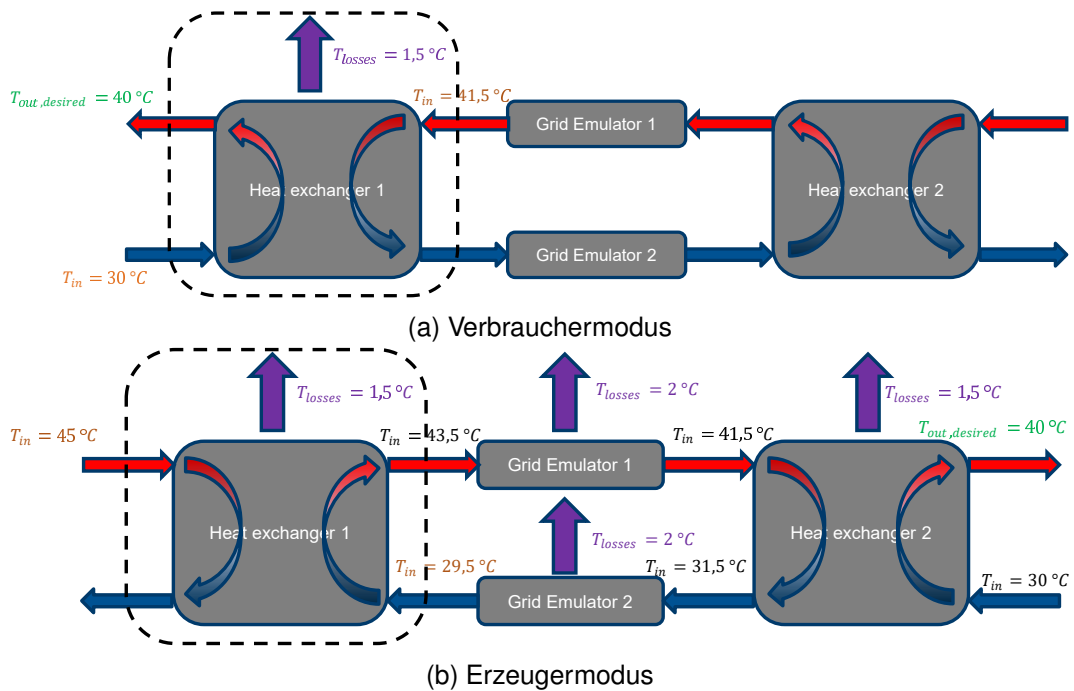


Abbildung 6.1: Schema für die Bestimmung der Temperaturen für den:

sich die hausseitigen Temperaturen am Wärmetauscher. Die netzseitige Temperatur ist vorerst als Rücklauftemperatur des jeweiligen Heizungssystems abzüglich der Verluste zu sehen. Auch hier ergeben sich für die vorläufigen Tests eine Kombination aus zwei Temperaturen. Abbildung 6.1b zeigt hierbei wieder das Schema für die Bestimmung der Temperaturen. Das Resultat des Schemas für alle Heizungssysteme ist in Tabelle 6.3 zu sehen.

Heizungssystem	Rücklauftemperatur Netz in [°C]	Vorlauftemperatur Haus in [°C]
alter Radiator	69,5	95
neuer Radiator	64,5	80
Brennwertheizung	44,5	65
Fußbodenheizung	29,5	45

Tabelle 6.3: Temperaturen für Erzeugermodus

Die eben herausgearbeiteten Temperaturen dienen jeweils als Eingangsgrößen für das System. Die hausseitigen Temperaturen werden im Verbrauchermodus an die Steuerung der 'Heat Sink' weitergegeben. Diese kühlt über einen bestehenden PID-Regler die Temperatur auf Hausseite auf die gewünschte Temperatur. Im Erzeugermodus war angedacht, den geladenen Speicher anzuzapfen. Mittels eines 3-Wege-Mischer sollte anschließend auf die gewünschte Temperatur geregelt werden. Auf Netzseite hingegen erfolgt die Temperaturerhöhung über die in den 'Grid Emulatoren' verbauten Heizstäbe. Mittels der bereits implementierten Steuerung sollte hierbei das Wasser im Verbrauchermodus erwärmt werden. Im Produktionsfall hingegen sollte durch die Beimischung von kaltem und die Abführung von heißem Wasser die Temperatur reduziert werden. Wie allerdings in Abschnitt 5.1 erklärt wurde, konnten die Erzeugerfälle nicht getestet werden.

Für die jeweils anderen beiden Eingangsgrößen wurden der Einfachheit halber nicht die Volumenströme, sondern die Eingangsspannungen der jeweiligen Pumpen verwendet. Hierfür wurden vorerst 45, 80 und 100 Prozent Leistung gewählt. Diese willkürlichen Werte wurden im Verlauf der Tests weiter verändert. Da im Verbrauchermodus der netzseitige Volumenstrom über das Regelventil A-CV-CC geregelt wird, ist hierbei die Kennlinie des Ventils von Bedeutung. Diese ist in 4.5 gezeigt. Um eine größere Abweichung der Werte zu erreichen, wurden anschließend die Werte auf 40, 60 und 100 Prozent verändert. Abschließend wurden diese Werte noch absteigend angeordnet. Der Grund dafür ist, dass mit steigendem Eingangssignal auch der Volumenstrom steigt. Aus logischen Gründen stellt sich schneller ein Gleichgewicht in dem System ein, wenn mehr Durchfluss herrscht. Diese Spannungen wurden bei den haus- und netzseitigen Eingängen identisch gewählt. Hieraus ergeben sich neun Kombinationsmöglichkeiten. Jede dieser Spannungskombinationen wird nun mit jeder der Temperaturkombinationen für Verbraucher- und Erzeugermodus verbunden. Somit ergeben sich acht Datensätze aus jeweils zwei festen Temperaturen und neun Spannungskombinationen. Diese acht mal neun Quartette wurden anschließend in acht verschiedenen .txt files gespeichert und stellen die Inputs für die Charakterisierungstests dar.

## 6.2 Ziel der Charakterisierung

Ziel der Tests ist es, das Verhalten des Systems Wärmeübergabestation zu charakterisieren. Zum einen soll über die Tests die Trägheit des Systems überprüft werden. Dies ist von großem Interesse, da hiermit bestimmt werden kann, wie lange es dauert, bis die Wärme aus dem Netz im Haus ankommt. Von großer Bedeutung wird dies im späteren Verlauf des Projekts für die automatisierte Regelung des Systems. Neben der zeitlichen Komponente wird ebenfalls das hydraulische Verhalten charakterisiert. Hierbei werden die Volumenströme auf beiden Seiten von Bedeutung sein. Interessante Schlüsse wie der hydraulische Widerstand können aus diesen Daten gefolgert werden. Zuletzt ist die Übertragungsrate des Wärmeübertragers wichtig.

## 6.3 Ablauf der Charakterisierungstests

Als Vorbereitung für die Tests werden zunächst die Ventile in den Heizkreisläufen geöffnet, um eine Zirkulation in diesen zu ermöglichen. Anschließend werden die Wassereinlassventile in den 'Grid Emulatoren' geöffnet, um eventuelle Luft aus dem System zu entfernen. Testweise werden die Pumpen angesteuert, um Luftblasen final aus dem System zu befördern. Ferner wird das jeweilige .txt file, in dem sich die Eingänge für den Betriebszustand befinden, ausgewählt. Nachdem das Datalogging gestartet wird, können die Tests beginnen. Hierbei wird jeder Zustand für  $10_{min}$  gehalten. Lediglich der erste Zustand eines neuen Temperaturniveaus wird für  $12_{min}$  angefahren. Diese Anpassung ist notwendig, da die PID-Regler der Heizstäbe und der 'Heat Sink' länger benötigen, um das System auf neue konstante Zustände zu regeln. Während der Tests werden jede Sekunde die Messwerte der Temperatursensoren der Ein- und Ausgangsrohre aus dem Wärmeübertrager und die Volumenstrommessungen auf beiden Seiten gespeichert. Während der knapp



90min, die jedes Temperaturniveau angefahren wird, muss das System im Idealfall nur über den UI-Manager überwacht werden.

## 6.4 Analyse der Tests

In diesem Kapitel sollen die Daten der Tests ausgewertet werden. In Tabelle 8.2 sind alle Kenngrößen der Tests zu sehen. Hieraus können sowohl die Eingangsgrößen als auch die daraus resultierenden Ergebnisse entnommen werden. Die Zahlen sind jeweils die Mediane der letzten fünf Minuten des jeweiligen Testabschnittes.

### 6.4.1 Wärmeübertrager

**Wärmedurchgangszahl** Für die Charakterisierung des Wärmeübertragers soll zunächst das Übertragungsverhalten eben jenes Tauschers untersucht werden. Die technische Kenngröße ist hierbei der Wärmedurchgangskoeffizient. Dieser ist im Auslegungsfall vom Hersteller angegeben als  $5270 \frac{W}{m^2 * K}$ . Hierbei ist anzumerken, dass dieser Wert abhängig von Temperaturen und Volumenströmen ist. Deshalb wird im Folgenden versucht, die auf Messwerten basierende Wärmedurchgangszahl  $k_{mea}$  mit einer berechneten Wärmedurchgangszahl  $k_{calc}$  zu verifizieren.

Die Prandtlzahl  $Pr$  ist definiert als:

$$Pr = \frac{\eta * c_p}{\lambda} \quad (6.1)$$

mit den Angaben des Herstellers kann jene Prandtlzahl  $Pr$  für den Wärmetauscher zu 3,08 berechnet werden, siehe [30].

Die Reynoldyzahl ist gegeben durch:

$$Re = \frac{\omega * L * \rho}{\eta} \quad (6.2)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist nach der VDI wie folgt definiert:

$$k * A = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 * A} + \frac{\Delta x}{\lambda * A} + \frac{1}{\alpha_2 * A}} \quad (6.3)$$

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und des geringen  $\Delta x$  ist dieser Term für die folgenden Berechnungen zu vernachlässigen. Somit kann 6.3 vereinfacht werden zu:

$$k * A \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 * A} + \frac{1}{\alpha_2 * A}} \quad (6.4)$$

In [33] wird das Verhältnis der Produkte des Wärmeübergangskoeffizienten und der Übertragungsfläche wie folgt definiert:

$$r = \frac{\dot{\alpha}_{grid,nom} * A}{\dot{\alpha}_{house,nom} * A} \quad (6.5)$$

Aus 6.4 und 6.5 können folgende Zusammenhänge hergeleitet werden:

$$(\alpha * A)_{grid} = (r + 1) * (k * A) \quad (6.6)$$

und

$$(\alpha * A)_{house} = \frac{r + 1}{r} * (k * A) \quad (6.7)$$

Eben jenes  $\alpha$  kann über die Nußeltzahl ausgedrückt werden:

$$Nu = \frac{\alpha * L}{\lambda} \quad (6.8)$$

Jene Nußeltzahl wiederum kann laut [34] unter der Bedingung einer Reynoldszahl von weniger als  $10^5$  und einer Prandtlzahl von  $0,6 < Pr < 2000$ , wie folgt bestimmt werden:

$$Nu = 0,664 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (6.9)$$

Aus 6.9 und 6.8 kann folgender Zusammenhang hergeleitet werden:

$$\alpha = const.1 * Re^{\frac{1}{2}} = const.2 * \omega^{\frac{1}{2}} \quad (6.10)$$

Wobei unter *const.1* und *const.2* alle Konstanten gefasst werden. Hierbei wird vorausgesetzt, dass alle stoffspezifischen Werte wie die Dichte und die Wärmekapazität in dem betrachteten Intervall temperaturunabhängig sind. Setzt man nun 6.10 für den Auslegungsfall mit einem beliebigen anderen Fall in ein Verhältnis zueinander, kürzen sich zum einen jene Konstanten heraus und man erhält:

$$\frac{\alpha_{nom} * A}{\alpha_1 * A} = \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.11)$$

Kombiniert man anschließend 6.11 und 6.4 und bedient sich 6.6 und 6.7 kann man den Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von den beiden Volumenströmen darstellen als:

$$k_{calc} * A = \frac{(1 + r) * (k_{nom} * A)}{\left( \frac{\dot{V}_{nom,1}}{\dot{V}_{mea,1}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{\dot{V}_{nom,2}}{\dot{V}_{mea,2}} \right)^{\frac{1}{2}} * r} \quad (6.12)$$

Mit Hilfe jener eben hergeleiteten Formel werden die theoretischen Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmt. Für die Berechnung der gemessenen Werte wurde folgende Formel hergeleitet:

$$\dot{Q} = \dot{V} * \rho * c_p * \delta T \quad (6.13)$$

$$\dot{Q} = A * k * LMTD \quad (6.14)$$

Wobei der LMTD definiert ist als

$$LMTD = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\log\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)} \quad (6.15)$$

und

$$\Delta T_b = T_{hot,1} - T_{hot,2} \quad (6.16)$$

$$\Delta T_a = T_{cold,1} - T_{cold,2} \quad (6.17)$$

Aus diesen beiden Formeln kann folgender Zusammenhang abgeleitet werden:

$$k_{mea} * A = \frac{\rho * \dot{V} * \delta T}{LMTD} \quad (6.18)$$

Führt man anschließend die Berechnungen mit den jeweiligen Messwerten durch und trägt sie gegeneinander an, kommt man zu dem in Abbildung 6.2 sichtbaren Graphen. Zwar ähneln sich die Datenpunkte im Verhalten, allerdings ist gerade bei der Betrachtung der Achsen zu erkennen, dass sich die Werte um einen variablen Faktor unterscheiden. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde es nicht geschafft, diesen Faktor zu bestimmen, oder eine Erklärung für diesen zu finden.

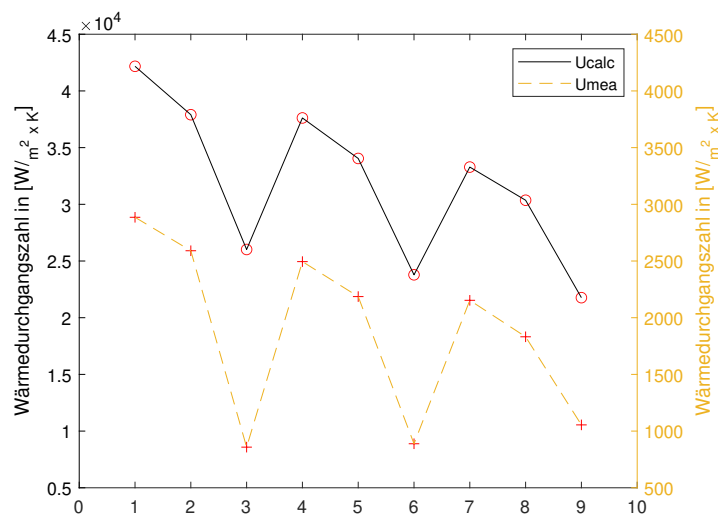
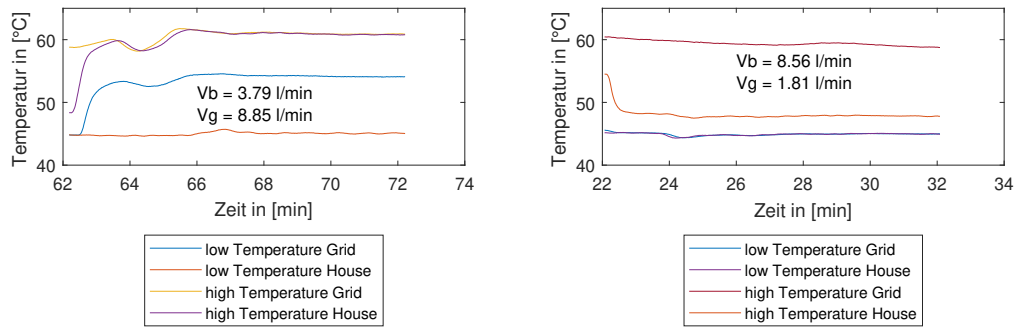


Abbildung 6.2: Vergleich gerechneter Wärmedurchgangskoeffizienten mit den gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten

**Übertragungsverhalten** Wie in Abbildung 6.3 zu sehen ist, gleichen sich jeweils abhängig vom Volumenstrom zwei Temperaturen sehr gut an. Bei einem hohen Volumenstrom auf Netzseite und einem Geringeren auf Hausseite entspricht die hohe Temperatur auf Netzseite der hohen Temperatur auf Hausseite. Währenddessen ist eine hohe Temperatur am Ausfluss auf Netzseite zu erkennen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Haus lediglich einen gewissen Wärmebetrag aufnehmen kann. In dem gezeigten Ausschnitt wird dieser durch das Netz gesättigt und das Netz verfügt weiterhin über viel nicht übertragene Wärme, was an der zu hohen Rückflusstemperatur erkennbar ist. Ähnliches Verhalten ist in Abbildung 6.3b für geringen netzseitigen und hohen hausseitigen Volumenstrom zu sehen. Hierbei konsumiert das Haus nahezu die gesamte technisch mögliche Wärmemenge des Netzes. Dies führt zu der Angleichung der beiden niedrigen Temperaturen. Das Netz schafft es aber gleichzeitig nicht, das Haus ausreichend aufzuwärmen.



(a) geringer Volumenstrom Haus, hoher Vo- (b) geringer Volumenstrom Haus, hoher Vo-  
lumenstrom Netz lumenstrom Netz

Abbildung 6.3: Übertragungsverhalten

**Übertragungsverluste** Des Weiteren lässt sich aus Tabelle 8.2 ablesen, dass sich die Übertragungsverluste in Relation zu der vom Netz abgegebene Wärmemenge zumeist unter einem Prozent liegen. Ebenfalls ist aus Tabelle 8.2 zu erkennen, dass es laut Berechnungen einen negativen Verlust gibt. Dies würde einer Energieerzeugung ent- und damit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik widersprechen. Zu erklären ist diese Zahl durch eine sehr gute Übertragungsrate des Wärmetauschers, eine gewisse thermische Trägheit und durch Messfehler.

**Effektivität** Als Maß für die Güte der Übertragung eines Wärmeübertragers hat sich die Effektivität etabliert. Diese setzt die idealerweise übertragbare Wärmemenge in das Verhältnis zu der real übertragenen Wärmemenge. Sie lässt sich wie folgt ermitteln: Von den Wärmekapazitätsströmen auf beiden Seiten wird jeweils das Minimum ermittelt:

$$\dot{C}_{min} = \dot{m}_{min} * c_v \tag{6.19}$$

Über diese Kenngröße und die Differenz der Eingangstemperaturen wird die maximal mögliche Wärmemenge errechnet:

$$\dot{Q}_{max} = \dot{C}_{min} * (T_{in,hot} - T_{in,cold}) \tag{6.20}$$

Eben jenes Maximum wird anschließend zu der real übertragenen Wärme ins Verhältnis gesetzt.

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} \tag{6.21}$$

Wie in 8.2 zu sehen ist, bewegt sich die Effektivität in einem Intervall von [84%, 100%]. Zu den Zahlen der Effektivität in Tabelle 8.2 muss an dieser Stelle erneut gesagt werden, dass eine Effektivität von über 100% thermodynamisch unmöglich ist. Dieser Widerspruch entspringt aus Messfehlern. Trotzdem kann basierend auf der hohen Effektivität getrost gesagt werden, dass der Wärmeübertrager sehr gut arbeitet. Eben dies kann auch durch die Wärmeverluste gezeigt werden. Rechnet

man aus der Wärmeverlustmenge bezogen auf den Volumenstrom des Netzes eine Verlusttemperatur aus, bewegt sich diese, wie in Tabelle 6.4 zu sehen ist, bei der Brennwertheizung weit unter den  $1,5K$ , die angenommen waren.

Betriebszustand	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{Verlust}$ in $K$	0.04	0.12	0.66	0.039	0.07	0.67	-0.01	0.06	0.46

Tabelle 6.4: Verlusttemperatur

Dieser Rechnung zugrunde liegt folgende Überlegung:

$$dT = \frac{Q_{Verlust}}{c_p * \dot{m}} \quad (6.22)$$

Dennoch ist auffällig, dass das Haus lediglich in zehn Fällen die gewünschten Temperaturen erreichte. Dies liegt allerdings daran, dass in all den anderen Fällen die benötigte Wärmemenge zum Erreichen der Wunschtemperatur höher ist als die Wärmemenge, die vom Netz thermodynamisch abgegeben werden kann. Zu erkennen ist dies an den jeweils höheren Volumenströmen auf Hausseite.

### 6.4.2 Zeitanalyse

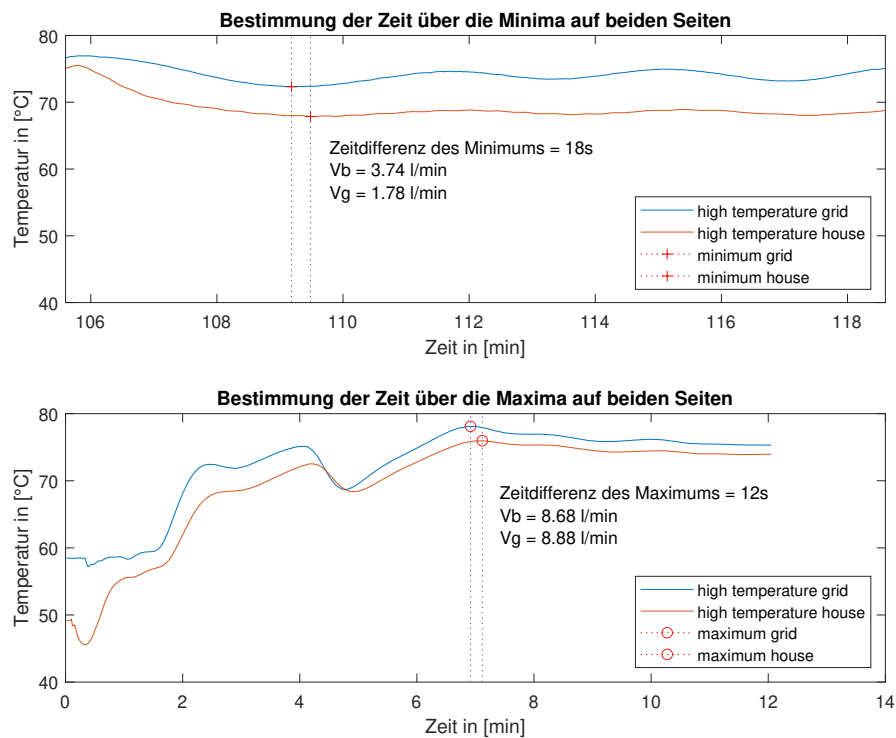


Abbildung 6.4: Bestimmung der Übertragungszeit

Für die Analyse der zeitlichen Trägheit des Systems bietet sich die Messung des Radiators an. Durch die stark alternierenden Werte kann die Zeit bestimmt werden, die benötigt wird, damit die Wärme übertragen wird. Durch die schnelle

Reaktionszeit des Systems ist gut erkennbar, dass der Wärmetauscher eine sehr geringe Trägheit besitzt. Er lässt Wärme sehr schnell durch und speichert sehr wenig davon. Da die Bestimmung der Zeit über den Volumenstrom und die dazugehörige Strecke erfolgt, ist die Variation der Strömungsgeschwindigkeit sehr wichtig. In diesem Fall werden die beiden Extreme betrachtet: einmal die maximalen Geschwindigkeiten und einmal die minimalen Geschwindigkeiten. Für die Bestimmung der Zeit wird in dem Zeitfenster, in welchem der Volumenstrom auf beiden Seiten minimal ist, ein Temperaturminimum auf Netzseite identifiziert. Anschließend wird dieses Minimum auf der Hausseite gesucht. Die Zeitdifferenz dieser beiden Extrema entspricht der Zeit, die benötigt wird, um eine Wärmemenge durch den Wärmeübertrager von der einen auf die andere Seite zu übertragen. Wie in Abbildung 6.4 zu erkennen ist, dauert es bei geringem Volumenstrom 18s. Gleiches Prozedere bei maximalem Volumenstrom dauerte lediglich 12s.

### 6.4.3 hydraulische Analyse

Beeinflusst wird der Volumenstrom durch die Pumpe auf Hausseite und durch das Proportionalventil auf Netzseite. Das Verhalten des Proportionalventils wurde bereits in Abschnitt 5.1 grafisch aufbereitet. Im Folgenden soll ein Vergleich von Abbildung 5.1 und Abbildung 4.5 gezogen werden. Es ist zu erkennen, dass gerade bei der Einstellung "equal percentage" das Verhalten des realen Systems dem prognostizierten Verhalten des Herstellers entspricht. Lediglich zum Ende des Messbereiches setzt eine gewisse Sättigung ein. Das Problem der großen Hysterese ist, für den finalen Gebrauch des Labors durch einen gut eingestellten PID-Regler auch in den Griff zu bekommen. Denn dieser wird auf einen gewünschten Volumenstrom regeln und somit die Öffnung des Ventils anpassen. Dennoch ist eine so große Abweichung auf jeden Fall eine Überraschung gewesen und entspricht nicht dem Verhalten, das erwartbar gewesen wäre.

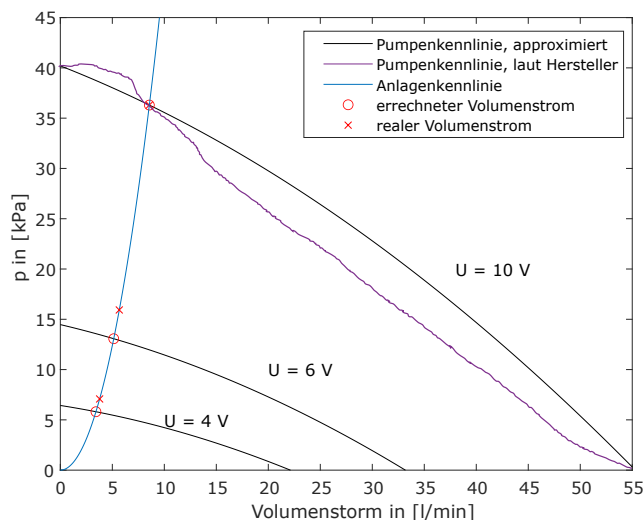


Abbildung 6.5: Pumpenkennlinie

Für die Analyse der Pumpe wurden in Abbildung 6.5 die Kennlinie des Herstellers und die approximierten Kennlinien angetragen. Für die Berechnung der

Pumpenkennlinie wurde folgende Formel verwendet:

$$\Delta p_{Pumpe} = a_1 * \dot{V}^2 + a_2 * U^2 + a_3 * \dot{V} * U \quad (6.23)$$

Die Koeffizienten  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_3$  wurden mit Hilfe zweier Punkte aus dem Datenblatt von Sauter verwendet [28]. Der dritte Punkt zur Lösung der Gleichung wurde über die Formel:

$$\Delta p_{res} = a_4 * \dot{V}^2 \quad (6.24)$$

und mit dem gemessenen Volumenstrom von  $8,56 \frac{l}{min}$  berechnet. Anschließend wurden die Gleichungen gleichgesetzt und für die Spannungen 4,6 und 10V der resultierende Volumenstrom bestimmt. Daraufhin wurde für diese Spannungen mit Hilfe von 6.23 die Pumpenkennlinie bestimmt. Die oberste Kennlinie stellt die Kennlinie bei voller Leistung dar. Die anderen beiden Kurven sollen das Verhalten bei 60% und 40% der Pumpe abbilden. Anschließend wurde mit 6.24 die Anlagenkennlinie bestimmt. Auf der Anlagenkennlinie sind die errechneten und die realen Volumenströme bei gleicher Eingangsspannungen gegen ihren errechneten Druck angetragen. Auf Grund des Modells liegt der errechnete Volumenstrom bei voller Pumpenleistung sowohl auf der Pumpenkennlinie als auch auf der Anlagenkennlinie. Bei den anderen beiden Messpunkten ist zwischen den realen Werten und den errechneten ein Unterschied. Daraus ist abzuleiten, dass das verwendete Modell die Realität nicht abbildet. Die Parameter aus Formel Gleichung 6.23 und Gleichung 6.24 sind in Tabelle 6.5 zu erkennen:

Koeffizient	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
	-0.0058	40.2000	-0.4059	0.4954

Tabelle 6.5: Koeffizienten

Bei gleicher Pumpenspannung weichen die realen und die errechneten Differenzdrücke jeweils um 18% ab, die Volumenströme hingegen weichen um 9% von dem Errechneten ab.

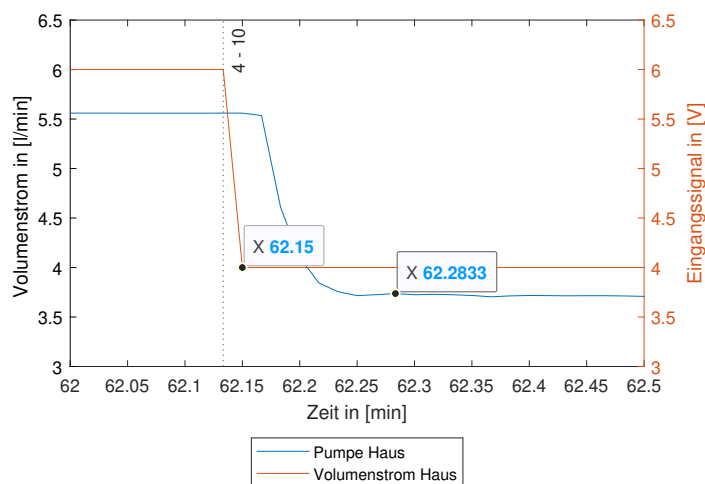


Abbildung 6.6: Bestimmung der Zeit, bis sich ein konstanter Volumenstrom einstellt

Abschließend sollte noch untersucht werden, wie schnell sich ein neuer Volumenstrom nach einer Änderung der Eingangsspannung einer Pumpe einstellt. In Abbildung 6.6 ist zu erkennen, wann das Eingangssignal bei der Pumpe ankommt und wann sich der Volumenstrom stabilisiert. Wie zu erwarten, geschieht beides sehr rasch. Die Differenzzeit muss noch mit 60 multipliziert werden. Anschließend erhält man, dass es lediglich  $8s$  dauert, bis der neue Volumenstrom sich einstellt. Anzumerken ist, dass die Steigerung des Volumenstromes vermutlich länger dauern würde. In dem betrachteten Fall muss das Wasser lediglich abgebremst werden. Allerdings wurde in keinem der vorherrschenden Fälle ein Volumenstrom auf Hausseite gesteigert.



# Kapitel 7

## Schlüsselerkenntnisse

In diesem Kapitel sollen die Erkenntnisse, die in dieser Arbeit erlangt wurden, stichpunktartig zusammengeführt werden.

- Erkenntnisse resultierend aus der Inbetriebnahme:
  - zu geringe Dimensionierung der netzseitigen Pumpe in Haus 2
  - ungünstige Lage der netzseitigen Pumpen im höchsten Punkt des Aufbaus
  - große Hysterese bei den Regelventilen
  - defekter Volumenstrommesser auf Hausseite
  - defekter Thyristor in 'Grid Emulator'
  - Dopplung der Ventilsignale
  - 'Cooling' der 'Grid Emulatoren' zu überarbeiten
  - unerwünschtes Öffnen des Auslassventils bei 'Heating' der 'Grid Emulatoren'
- Erkenntnisse resultierend aus den Tests:
  - Tendenz der Wärmedurchgangszahl aus Berechnung und Messungen ähnlich
  - variabler Faktor zwischen Berechnung und Messung nicht ersichtlich
  - Effektivität im Bereich von [84%, 100%[
  - Zeit der Übertragung im Intervall von [12s, 18s]
  - Abweichungen der gemessenen Volumenströme von dem Modell von ~ 9%
  - Einstellen eines neuen Volumenstroms bei Reduktion eben jenes nach 8s



## Kapitel 8

# Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde erfolgreich die Wärmeübergabestation in Betrieb genommen und charakterisiert. Hierfür wurde für den Erzeuger- und den Verbrauchermodus ein eigener Versuchsstand herausgearbeitet. Zunächst wurde allerdings über die historische Entwicklung der Fernwärmenetze zu dem bidirektionalen Fernwärmenetz im CoSES-Labor geleitet. Anschließend wurden Unterschiede zwischen den Wärmeübergabestationen dargestellt, um näher auf die des Labors einzugehen. Nach der Darstellung des Versuchsstandes wurde die Inbetriebnahme dokumentiert. Aufgrund des Defekts eines Volumenstrommessers wurde begründet, weshalb lediglich die Hälfte der Tests gefahren werden konnte. Trotz dessen wurde belegt, dass die Ergebnisse der Charakterisierung aussagekräftig sind und für folgende Untersuchungen und Modellierungen des Labors verwendet werden können. Daraufhin wurde dargelegt, wie die geplanten Tests abgelaufen wären und eben angesprochene abgelaufen sind. In der Analyse konnten interessante Charakteristika herausgearbeitet werden. So konnte die Zeit, die benötigt wird, um Wärme durch den Wärmeübertrager zu transferieren, bestimmt werden. Außerdem wurde für etwaige Simulationsmodelle eine Übersicht über die gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten erstellt. Während der Charakterisierung konnte ferner eine reale Pumpenkennlinie herausgearbeitet werden. Mit dieser kann nun der Volumenstrom auf Hausseite vorhergesagt werden. Durch die Charakterisierung des Regelventils auf Netzseite ist dies auch auf Netzseite möglich.

Trotz der begründeten bestehenden Aussagekraft sollte überprüft werden, ob sich das System in anderer Richtung wie erwartet verhält. Zudem müssen die für die Steuerung im Gesamtsystem notwendigen PID-Gains und die Gewichtung noch angepasst werden. Anschließend kann die implementierte, automatische Steuerung getestet werden. Des Weiteren ist es notwendig, die 'Grid Emulatoren' zu überarbeiten. So muss die Regelung für das 'Heating' und das 'Cooling' überarbeitet werden, da ein Verlust des Volumenstroms auf Netzseite für weitere Versuche nicht hinnehmbar ist.



# Literatur

- [1] Paul Hoecherl. *LRZ*. URL: <https://www.lanline.de/datacenter/muenchner-hitzkopf-bleibt-kuehl.222103.html> (besucht am 29.08.2022) (siehe S. 1).
- [2] Susanne Stark, Felix V Uthoff AGFW und John A Miller AGFW V Stellvertretender Geschäftsführer Bereichsleiter Energiewirtschaft. *Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung*. URL: [https://www.agfw.de/fileadmin/AGFW\\_News\\_Mediadateien/Energiewende\\_Politik/agfwleitfaden\\_ansicht\\_es.pdf](https://www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energiewende_Politik/agfwleitfaden_ansicht_es.pdf) (besucht am 29.08.2022) (siehe S. 1).
- [3] Thomas Hofmann. *Auswirkungen der Energiekrise auf den Betrieb der TUM in Forschung und Lehre*. (Besucht am 29.07.2022) (siehe S. 1).
- [4] “Auswirkungen intelligenter Energiesysteme auf Supermärkte”. In: (). URL: <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-stories/dcs/smart-energy-systems-impact-on-supermarkets/> (besucht am 30.05.2022) (siehe S. 2).
- [5] Martin Kaltschmitt Wolfgang Streicher Andreas Wiese Hrsg. *Erneuerbare Energien*. 2020. ISBN: 978-3-662-61190-6. DOI: 10.1007/978-3-662-61190-6 (siehe S. 3).
- [6] Henrik Lund u. a. “4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems”. In: *Energy* 68 (Apr. 2014). fernwärme def, S. 1–11. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2014.02.089 (siehe S. 3, 4).
- [7] Simone Buffa u. a. “5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (Apr. 2019). fernwärme def, S. 504–522. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/J.RSER.2018.12.059 (siehe S. 4).
- [8] Heidemarie Hanekop und Volker Wittke. “Kollaboration der Prosumenten”. In: *Prosumer Revisited: Zur Aktualität einer Debatte*. Hrsg. von Birgit Blättel-Mink und Kai-Uwe Hellmann. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 96–113. ISBN: 978-3-531-91998-0. DOI: 10.1007/978-3-531-91998-0\_5. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-531-91998-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-531-91998-0_5) (siehe S. 4).
- [9] Sharon Jacobs. “The Energy Prosumer by Sharon Jacobs :: SSRN”. In: (2015). DOI: 10.15779/Z38XS02. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2662924](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2662924) (siehe S. 4).

- [10] Felix Bünning u. a. "Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization". In: *Applied Energy* 209 (Jan. 2018). DOI: 10.1016/J.APENERGY.2017.10.072 (siehe S. 5, 6).
- [11] Marco Wirtz u. a. "5th Generation District Heating: A novel design approach based on mathematical optimization". In: *Applied Energy* 260 (Feb. 2020). DOI: 10.1016/J.APENERGY.2019.114158 (siehe S. 6).
- [12] R. Zarin Pass, M. Wetter und M. A. Piette. "A thermodynamic analysis of a novel bidirectional district heating and cooling network". In: *Energy* 144 (Feb. 2018). DOI: 10.1016/J.ENERGY.2017.11.122 (siehe S. 6).
- [13] internes TUM WIKI - CoSES Laboratory Documentation. *Wärmenetzübersicht*. URL: <https://wiki.tum.de/display/coseslab/Thermal+Network> (besucht am 18. 10. 2022) (siehe S. 6, 14).
- [14] Daniel Zinsmeister u. a. *A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture* (siehe S. 7).
- [15] Vedran S. Perić u. a. "CoSES Laboratory for Combined Energy Systems At TU Munich". In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)* (2020). DOI: 10.1109/PESGM41954.2020.9281442. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9281442> (siehe S. 7).
- [16] Panos Konstantin. "Fernwärmesysteme im Überblick". In: *Praxisbuch der Fernwärmeversorgung: Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 1–19. ISBN: 978-3-662-55911-6. DOI: 10.1007/978-3-662-55911-6\_1. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-55911-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55911-6_1) (siehe S. 7).
- [17] M. A. Ancona u. a. "Utilities substations in smart district heating networks". In: *Energy Procedia* 81 (Dez. 2015), S. 597–605. ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2015.12.044 (siehe S. 8, 9).
- [18] Gerhard Bucar u. a. *Dezentrale erneuerbare Energie für bestehende Fernwärmenetze*. URL: [https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/edz\\_pdf/0678\\_dezentrale\\_energieerzeugung\\_fuer\\_fernwaerme.pdf](https://www.nachhaltigwirtschaften.at/resources/edz_pdf/0678_dezentrale_energieerzeugung_fuer_fernwaerme.pdf) (besucht am 04. 10. 2022) (siehe S. 9).
- [19] internes TUM WIKI - CoSES Laboratory Documentation. *Schema Wärmeübergabestation*. URL: <https://wiki.tum.de/display/coseslab/Thermal+Network> (besucht am 18. 10. 2022) (siehe S. 11).
- [20] internes TUM WIKI - CoSES Laboratory Documentation. *Schema Wärmeübergabestation*. URL: <https://wiki.tum.de/display/coseslab/CHN+-+Hardware> (besucht am 18. 10. 2022) (siehe S. 15).
- [21] internes TUM WIKI - CoSES Laboratory Documentation. *Schema Wärmeübergabestation Haus 1*. URL: <https://wiki.tum.de/display/coseslab/CHN+House+1> (besucht am 18. 10. 2022) (siehe S. 17).

- [22] Kurt Bergmann. *Elektrische Messung nichtelektrischer Größen*. Vieweg+Teubner Verlag, 1993, S. 311–368. ISBN: 978-3-322-85550-3. DOI: 10.1007/978-3-322-85550-3\_6. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-322-85550-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-322-85550-3_6) (siehe S. 17, 18).
- [23] Sauter. *DSU, DSI: Drucktransmitter*. URL: <https://www.sauter-controls.com/wp-content/uploads/2019/04/947225.pdf> (besucht am 26. 10. 2022) (siehe S. 17).
- [24] *Digitale Funkwasserzähler – das sollten Sie wissen*. URL: <https://wasser.bnnetze.de/wasser-allgemein/wasserzaehler/funkwasserzaehler/> (besucht am 14. 10. 2022) (siehe S. 17).
- [25] MOLLINÉ ®. *Ultraschall-Wasserzähler Hydromess H*. URL: <https://www.molline.de/produkte/ultraschall-wasserzaehler-hydromess-h/> (besucht am 26. 10. 2022) (siehe S. 18).
- [26] SAUTER. *AVM 105S*. URL: <https://www.sauter-controls.com/wp-content/uploads/ImportPDM/1013801.pdf> (besucht am 26. 10. 2022) (siehe S. 18, 19).
- [27] Hora. *Motor-Durchgangs-und Dreiwegeventile bis 150 °C*. URL: [https://www.hora.de/uploads/datenblaetter\\_fc/gebaeudetechnik/1212E\\_BR206GF\\_MC55\\_MC500\\_DE.pdf](https://www.hora.de/uploads/datenblaetter_fc/gebaeudetechnik/1212E_BR206GF_MC55_MC500_DE.pdf) (besucht am 26. 10. 2022) (siehe S. 19).
- [28] IMPPUMPS. *NMT\_PLUS\_ER\_25\_40\_180*. URL: <https://imp-pumps.com/de/pumpen/nmt-plus/> (besucht am 26. 10. 2022) (siehe S. 19, 39).
- [29] IMPPUMPS. *NMT\_PLUS\_ER\_25\_90\_180*. URL: <https://imp-pumps.com/de/pumpen/nmt-plus/> (besucht am 26. 10. 2022) (siehe S. 19).
- [30] SWEP. *B25THx20/1P-SC-S(4x1"22U)*. URL: [https://www.swep.net/products/?type=b\\_&q=&size=25t](https://www.swep.net/products/?type=b_&q=&size=25t) (besucht am 18. 10. 2022) (siehe S. 20, 33).
- [31] “DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen, Allgemeine Gestaltungsgrundsätze, Risikobeurteilung und Risikominderung”. In: () (siehe S. 23).
- [32] Klaus Weber. *Durchführung der Inbetriebnahme*. 2015. ISBN: 9783662481615. DOI: 10.1007/978-3-662-48162-2. URL: [www.springer.com](http://www.springer.com) (siehe S. 23).
- [33] Michael Wetter. “Simulation Model Air-to-Air Plate Heat Exchanger”. In: *Energy* 13(32) (1999), S. 49–54 (siehe S. 33).
- [34] *VDI-Wärmeatlas*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-19981-3 (siehe S. 34).





# Anhang

Nr.	ID	Name	Signals
1	C_BV-TG_TH_1	Ball Valve Thermal Grid	none
2	C_BV-TG_TH_2	Ball Valve Thermal Grid	none
3	A_BV-TG_TH_3	Ball Valve Thermal Grid (automated)	DO
4	C_BV-TG_TH_4	Ball Valve Thermal Grid	none
5	S_FW-TG_TH	Flow Water Thermal Grid	none
6	S_TM-TG_TH_1	Temperature Thermal Grid	PT100
7	S_TM-HC_TH_1	Temperature Heating Circuit	PT100
8	C_BV-HC_TH_1	Ball Valve Heating Circuit	none
9	C_BV-TG_TM_1	Ball Valve Thermal Grid	none
10	C_BV-TG_TM_2	Ball Valve Thermal Grid	none
11	A_BV-TG_TM_3	Ball Valve Thermal Grid (automated)	DO
12	A_BV-TG_TM_4	Ball Valve Thermal Grid (automated)	DO
13	A_CV-TG_TH	Control Valve Thermal Grid	10V
14	C_CV-TG_TH	Check Valve Thermal Grid	none
15	A_PU-TG_TH	Pump Thermal Grid	0-10V & On/Off
16	S_TM-TG_TM_1	Temperature Thermal Grid	PT100
18	S_TM-HC_TM_1	Temperature Heating Circuit	PT100
19	S_FW-HC_TM	Flow Water Heating Circuit	Counter
20	A_PU-HC_TH_IMP	Pump Heating Circuit	0-10V & On/Off
21	A_PU-HC_TH_EXP	Pump Heating Circuit	0-10V & On/Off
22	A_BV-HC_TH_IN	Ball Valve Heating Circuit (automated)	DO
23	A_BV-HC_TH_OU	Ball Valve Heating Circuit (automated)	DO
26	C_EV-TG_TM	Expansion Vessel Thermal Grid	none
27	C_PR-TG_TM	Pressure Release Valve Thermal Grid	none
45	C_BV-HC_TM	Ball Valve Heating Circuit	none

Tabelle 8.1: Komponenten und Signale aus Abbildung 4.4

lth in [°C]	htg in [°C]	Pumpe House in [V]	Ventil Grid in [V]	hth in [°C]	ktg in [°C]	vh in [l/min]	vg in [l/min]	dQ/dt Grid in [kW]	dQ/dt House in [kW]	dQ/dt Verlust in [kW]	Effektivität in [%]	LMTD	Umea in [W/m <sup>2</sup> *K]	Ucalc in [W/m <sup>2</sup> *K]
30.30	41.28	10	10	39.52	32.30	8.41	8.69	5.45	5.42	0.03	84.42	1.88	2886	42171
30.23	41.15	10	6	37.16	30.64	8.42	5.61	4.12	4.07	0.04	96.26	1.57	2591	37903
30.16	40.96	10	4	32.07	30.07	8.40	1.57	1.20	1.12	0.07	100.74	1.31	858	26017
30.33	41.34	6	10	40.92	34.58	5.59	8.73	4.12	4.14	-0.01	95.89	1.66	2495	37617
30.26	41.16	6	6	39.44	31.83	5.59	5.54	3.61	3.58	0.03	85.64	1.64	2186	34045
30.06	40.91	6	4	32.82	30.02	5.56	1.50	1.14	1.07	0.07	100.42	1.21	888	23783
30.33	41.37	4	10	41.31	36.77	3.73	8.82	2.83	2.86	-0.03	98.46	1.33	2153	33284
30.29	41.17	4	6	40.77	34.02	3.73	5.49	2.74	2.73	0.01	96.70	1.49	1832	30360
30.07	40.48	4	4	34.09	30.01	3.71	1.46	1.06	1.04	0.02	100.58	0.99	1055	21767
45.22	60.83	10	10	58.62	48.04	8.56	8.99	8.03	8.01	0.02	86.09	2.51	3197	42702
45.14	60.39	10	6	54.49	45.56	8.57	5.45	5.64	5.60	0.05	97.22	2.08	2691	37798
44.98	59.18	10	4	47.86	44.97	8.56	1.81	1.80	1.72	0.08	100.06	1.61	1067	27342
45.21	60.88	6	10	60.35	51.12	5.67	8.83	6.02	6.00	0.02	96.97	2.24	2681	37863
45.11	60.45	6	6	57.85	46.86	5.67	5.34	5.07	5.04	0.03	88.57	2.15	2345	33881
44.80	59.00	6	4	48.38	44.78	5.64	1.49	1.48	1.41	0.07	100.17	1.52	926	23815
45.09	60.92	4	10	60.89	54.17	3.79	8.85	4.17	4.18	-0.01	99.64	1.61	2593	33460
45.02	60.45	4	6	59.85	49.75	3.78	5.27	3.94	3.92	0.02	96.71	1.99	1966	30214
44.61	58.92	4	4	49.83	44.57	3.77	1.42	1.42	1.37	0.05	100.25	1.33	1031	21665
64.79	76.00	10	10	74.40	66.57	8.68	8.88	5.85	5.82	0.02	86.10	1.68	3457	42733
64.70	74.71	10	6	70.42	64.82	8.65	5.23	3.61	3.46	0.16	98.75	1.18	2931	37475
64.60	74.90	10	4	66.62	64.60	8.64	1.79	1.29	1.22	0.07	100.04	1.23	990	27294
64.57	75.48	6	10	75.10	68.40	5.68	8.50	4.20	4.18	0.02	97.08	1.49	2807	37580
64.44	74.88	6	6	72.92	65.42	5.67	5.14	3.39	3.36	0.04	90.57	1.42	2371	33585
64.32	74.58	6	4	67.39	64.27	5.67	1.80	1.29	1.22	0.08	100.48	1.09	1114	25271
64.12	75.48	4	10	75.37	70.42	3.74	8.43	2.98	2.94	0.04	100.43	1.54	1902	33027
64.15	75.11	4	6	74.71	67.38	3.73	5.11	2.76	2.75	0.00	96.49	1.36	2031	29897
63.68	74.33	4	4	68.49	63.61	3.74	1.78	1.34	1.25	0.08	100.63	0.92	1370	23108

Tabelle 8.2: erster Abschnitt: Verbrauchermodus Fußbodenheizung; zweiter Abschnitt: Verbrauchermodus Brennwertheizung;  
dritter Abschnitt: neuer Radiator