



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Masterthesis**

Hendrik Schweichler

# **Simulationsgestützte Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Nahwärmenetze**

**Hendrik Schweichler**

**Simulationsgestützte Untersuchung von  
Optimierungsmöglichkeiten für Nahwärmenetze**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Energie- und Anlagensysteme  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Abteilung Intersektorale Energiesysteme und Netzintegration  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Achim Schmidt  
Zweitprüfer: Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp

Abgabedatum: 07.05.2018

# **Zusammenfassung**

**Hendrik Schweichler**

## **Thema der Masterarbeit**

Simulationsgestützte Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Nahwärmenetze

## **Stichworte**

Nahwärmenetz, Verteilnetz, Rücklaufeinbindung, Netztopologie, Blockheizkraftwerk, Heizkraftwerk, Exergie, Dymola, Modelica.

## **Kurzzusammenfassung**

In der Arbeit wurden mit Hilfe eines Simulationsmodells Optimierungsstrategien für das Nahwärmesystem Freiburg Weingarten untersucht. Ziel der Untersuchung ist vor dem Hintergrund der sinkenden Wärmenachfrage auf Grund der fortschreitenden Gebäudesanierung auch zukünftig einen wirtschaftlichen Betrieb von Nahwärmenetzen zu ermöglichen. Folgende Optimierungsstrategien wurden für das Nahwärmenetz Freiburg Weingarten erarbeitet und untersucht:

-Rücklaufeinbindung: Durch die Einbindung von Teilsträngen mit sanierten Gebäuden in den Hauptrücklauf, kann das Temperaturniveau in Teilen des Netzes abgesenkt werden, um so Wärmeverluste zu reduzieren.

-Anpassung der Netztopologie: Durch den sinkenden Wärmebedarf im Netz sind gerade Teilnetzstränge in den viele sanierte Gebäude stehen überdimensioniert. Mit der Anpassung der Netztopologie an den reduzierten Wärmebedarf, können die Wärmeverluste im Rohrsystem reduziert werden.

Das Simulationsmodell zur Untersuchung der Strategien wurde mit dem Simulationsprogramm Dymola/ Modelica entwickelt und anhand von Messdaten validiert.. Durch die Auswertung der Simulationsergebnisse konnte ein Vergleich zwischen beiden Optimierungsstrategien gezogen werden. Die Rücklaufeinbindung bietet ein höheres Einsparpotenzial und sollte deshalb bevorzugt werden

**Title of the paper**

Simulation of district heat systems for the investigation of optimization potentials

**Keywords**

District heat systems, heat network, CHP, Dymola, Modelica, exergy

**Abstract**

This paper deals with the simulation-assisted analysis of optimization strategies for the local heating system of Freiburg Weingarten. The objective of the analysis is to ensure the economic operation of the local heat distribution network despite the decreasing heat demand due to the progressing building refurbishments. The following optimization strategies have been elaborated and analyzed:

-Return flow integration: Because of the integration of substrings, which are connected to refurbished buildings, into the return line of the network, a drop of the temperature level can be achieved, which reduces the heat losses.

-Adaption of the network-topology: Due to the decreasing heat demands in the network, especially subnetwork-strings (where many refurbished buildings are placed) are often oversized.

The simulation model, which is used for the analysis, was developed using Dyloma/Modelica. For the validation measuring data of a research project from Fraunhofer ISE were used. A comparison between the two strategies was drawn by evaluating the results of the simulation. The strategy of the return flow integration enables a higher potential for savings and should be therefore preferred.

## Danksagung

Hiermit möchte ich allen danken, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an Annette für die vielen Diskussionen zum Thema und die wirklich sehr gute Betreuung der Arbeit.

Ein weiterer großer Dank geht an Ekaterina. Du hast mir neben der Arbeit eine wirklich großartige Zeit in Freiburg beschert und mich stets ermutigt.

Zuletzt möchte ich mich noch bei Hannah bedanken. Deine Worte nach dem ersten Korrektur lesen haben mich in einer schwierigen Phase ermutigt weiterzumachen, da ich sowohl deine fachliche Meinung und noch mehr deine persönliche Meinung sehr schätze. Mit dem Foto möchte mich auch für den schönen Kurzurlaub in Berlin bedanken.



*Januar, 2018*

Hamburg, den 07.05.2018

Hendrik Schweichler

## Formelzeichen

### Lateinische Symbole

Symbole	SI-Einheit	Beschreibung
$A$	$m^2$	Übertragungsfläche von Wärmeübertragern
$c_p$	$J/(kg \cdot K)$	Spezifische Wärmekapazität
$C_{WSP}$	%	Prozentuale Speicherkapazität
$d$	$m$	Durchmesser
$E$	$W$	Exergie
$\dot{E}_x$	$W$	Exergiestrom
$e$	$W/kg$	Spezifische Exergie
$\dot{H}$	$J/s$	Enthalpiestrom
$h$	$J/kg$	Spezifische Enthalpie
$k$	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
$m$	$kg$	Masse
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$P$	$W$	Elektrische Leistung
$Q$	$J$	Wärmeenergie
$\dot{Q}$	$W$	Wärmestrom
$R^2$	–	Bestimmtheitsmaß
$s$	$J/(kg \cdot K)$	Spezifische Entropie
$T$	$K$	Temperatur
$T_m$	$K$	Thermodynamische Mitteltemperatur
$t$	$s$	Zeit
$U$	$J$	Innere Energie
$V$	$m^3$	Volumen
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$W_L$	$W/K$	Wärmeleitwiderstand
$y$	–	Erklärender Wert (Messwert)
$\hat{y}$	–	Erklärter Wert (Modellwert)

### Griechische Symbole

Symbol	SI-Einheit	Beschreibung
$\Delta$	$^\circ$	Differenz
$\vartheta$	$^\circ C$	Temperatur
$\lambda$	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitkoeffizient
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte

## Indices

Symbol	Beschreibung
0	Bezugspunkt
<i>A</i>	Austritt
<i>AUL</i>	Außenluft
<i>E</i>	Eintritt
<i>E</i>	Element
<i>Erd</i>	Erdboden
<i>el</i>	Elektrisch
<i>i</i>	Laufindex für Summen und Schleifen
<i>Iso</i>	Isolierung
<i>Ist</i>	Istwert bzw. Gemessener Wert
<i>max</i>	Maximaler Wert
<i>n</i>	Endwert einer Schleife oder Summe
<i>nom</i>	Normiert
<i>R</i>	Raum
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>Soll</i>	Sollwert vorgegeben durch eine Regelung
<i>th</i>	Thermisch
<i>U</i>	Umgebung
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>WG</i>	Verteilstrang Weingarten
<i>WG.S</i>	Einspeisepunkt des Verteilstrangs Weingarten Süd
<i>WÜ</i>	Wärmeübertrager

## Abkürzung

Abkürzung	Bedeutung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIGR	Gebäude der Straße Binzengrün
BUGG	Gebäude der Bugginger Straße
DW	Deutscher Wetterdienst
EnEV	Energieeinsparverordnung
HKW	Heizkraftwerk
HUGL	Gebäude im Hügelsheimer Weg
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
KA	Kundenanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Low-Ex	Niedriger Exergieanteil
SUBU	Gebäude der Sulzburger Straße
TWE	Trinkwassererwärmung
WG	Weingarten (Stadtteil in Freiburg)
WÜST	Wärmeübergabestation



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	II
Formelzeichen.....	V
Abkürzung.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	3
1.2 Methodik.....	4
2 Grundlagen.....	5
2.1 Nahwärmesysteme.....	5
2.1.1 Funktionsweise und Bauarten.....	5
2.1.2 Informationen zur Betriebsweise.....	7
2.1.3 Exergetische Betrachtung von Wärmenetzen.....	9
2.2 Simulation von Wärmenetzen.....	11
2.2.1 Simulationsprogramm Dymola/ Modelica.....	12
2.2.2 Validierungsbewertung.....	13
3 Nahwärmesystem Freiburg Weingarten.....	14
3.1 Systembeschreibung.....	14
3.1.1 Heizkraftwerk.....	15
3.1.2 Verteilnetz.....	19
3.1.3 Verbraucher.....	20
3.1.4 Regelung.....	21
3.2 Messdaten.....	24
3.2.1 Übersicht der Messdaten.....	24
3.2.2 Aufbereitung der Messdaten für die Simulation.....	27
3.2.3 Auswertung der Messdaten.....	38
4 Simulationsmodell des Verteilnetzes.....	44
4.1 Systemgrenzen des Modells.....	44
4.2 Modellierung.....	45
4.2.1 Rohrleitungssystem.....	45
4.2.2 Verbraucher.....	49
4.2.3 Erzeuger.....	51
4.3 Validierung.....	52

4.3.1	Validierung des Rohrmodells mit den Herstellerangaben .....	53
4.3.2	Validierung des Rohrmodells mit den Messwerten .....	55
5	Optimierung des Verteilnetzstranges Weingarten Süd .....	59
5.1	Optimierungsstrategie Rücklaufeinbindung .....	61
5.2	Optimierungsstrategie Anpassung der Netztopologie .....	64
5.3	Vergleich und Bewertung der Simulationsergebnisse .....	67
6	Zusammenfassung.....	71
7	Literaturangaben .....	73
8	Softwareverzeichnis .....	75
9	Anhang .....	76
A.	Verfahrensfließbild Heizkraftwerk Freiburg Weingarten.....	76
B.	Optische Qualitätskontrolle der Gebäudemessdaten.....	77
C.	Optische Qualitätskontrolle der Gebäudemessdaten.....	78
D.	MATLAB-Skript zur grafischen Auswertung der Datenlücken .....	79
E.	MATLAB-Skript zur Aufbereitung der Rohdaten BUGG50 .....	81
F.	MATLAB-Skript zur Aufbereitung der Rohdaten für BUGG02 und BUGG46.W .....	84
G.	MATLAB-Skript zur Bereinigung der Wärmestrom- und Volumenstromdatenlücken ....	86
H.	Optische Qualitätskontrolle der HKW-Messdaten und der DWD-Messdaten .....	89
I.	Entfernung des HKW Freiburg von der DWD-Wetterstation .....	90
J.	MATLAB-Skript zur Bereinigung der Vorlauftemperatur Messreihen .....	91
K.	MATLAB-Skript zur Bereinigung der Rücklauftemperatur Messreihen.....	92
L.	Technische Spezifikationen der Rohrleitungen.....	94

# 1 Einleitung

Rund 50 % des deutschen Endenergieverbrauchs sind auf die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme zurückzuführen. Damit liegt der Anteil des Wärmesektors am Endenergieverbrauch noch vor dem Stromsektor (ca. 30 %) und dem Verkehrssektor (ca. 20 %) [1]. Soll das Klimaschutzziel erreicht werden, die Treibhausgasemission bis 2050 um 80 % zum Referenzjahr 1990 zu reduzieren, ist neben den Ausbau erneuerbarer Energien wie Windenergie- und Photovoltaikanlagen im Stromsektor auch eine Transformation des Wärmeversorgungssystems nötig.

Bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen im Wärmesektor wird der zentralen Wärmeerzeugung durch Nah- und Fernwärmenetze eine bedeutende Rolle zugeschrieben. Ihr Anteil an der Wärmeversorgung des Wohnungsbestands in Deutschland liegt derzeit bei 10 % (Stand: 2014) [2] mit steigender Tendenz. So hat sich der Anteil der Fernwärmeversorgung bei neu gebauten Wohnungen mit 22 % (Stand: 2014) [3] verdoppelt. Wärmenetze sind vorteilhaft, weil zentrale und somit große Energieerzeuger meist höhere Wirkungsgrade aufweisen und außerdem ermöglichen sie den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). KWK-Anlagen zeichnen sich durch ihre hohe Energieeffizienz aus, da sie im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken neben dem Strom auch nutzbare Abwärme aus dem Energiewandlungsprozesses bereitstellen. Besonders bei dem Einsatz erneuerbarer Energieträger wie Biomasse sollten KWK-Anlagen in Kombination mit Wärmenetzen eingesetzt werden, um so den Brennstoffausnutzungsgrad aus den begrenzt zu Verfügung stehenden Rohstoffen zu maximieren. Zudem können Wärmenetze in der Zukunft auch einen Beitrag zur Stromnetzstabilisierung leisten. Durch die Integration von Wärmespeichern kann die thermische Speicherkapazität erhöht werden und somit der wärmegeführte Betrieb<sup>1</sup> der KWK-Anlagen temporär in einen stromgeführten Betrieb geändert werden, um so Fluktuationen im Stromnetz durch erneuerbare Energien wie Windenergie- und Photovoltaikanlagen auszugleichen.

Neben den genannten Vorteilen birgt die Umstrukturierung des Energiesystems infolge der Energiewende natürlich auch neue Herausforderungen für den wirtschaftlichen und energieeffizienten Betrieb von Wärmenetzen. Ein wesentliches Problem stellt die Sanierung der bestehenden Gebäude in Wärmenetzen dar. Im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) werden bei der Sanierung von Gebäuden Wärmedämmmaßnahmen umgesetzt, aus denen eine Reduzierung der Heizlast resultiert.

---

<sup>1</sup> Das Verhältnis zwischen erzeugtem Strom und Wärme einer KWK-Anlage ist nicht variabel. Die KWK-Anlage kann somit nur eine der beiden Energien bedarfsgerecht erzeugen.

Geringe Heizlasten in Wärmenetzen widersprechen jedoch dem Bestreben möglichst hohe Liniendichten<sup>2</sup> zu erzielen, um die Wärme- und Transportverluste möglichst gering zu halten. Um das beschriebene Potenzial der Wärmenetze zur Transformation des Wärmesektors in Zukunft nutzen zu können und den Ausbau neuer Netze zu fördern, gilt es Lösungsansätze zu entwickeln, die einen wirtschaftlichen Betrieb trotz sinkender Liniendichten ermöglichen.

Ein großes Optimierungspotenzial bei bestehenden Fernwärmesystemen liegt nach der Dissertation von Wirths [5] in der Modifizierung des Temperaturniveaus. Dabei ist stets die gesamte Prozesskette eines Fernwärmesystems von der Erzeugung, über die Verteilung, bis hin zu Übergabe an die Verbraucher zu betrachten. Ziel der Temperaturanpassung ist bei gleichbleibender Wärmebereitstellung den Anteil der Exergie im Netz zu reduzieren. Eine solche Betriebsweise wird in der entsprechenden Fachliteratur nach Robbi [6] und Bargel [7] als Low-Ex-Betriebsweise bezeichnet. Die Exergieeinsparung im Netz erfolgt vor allem durch das Absenken der Vor- und Rücklauftemperatur, sowie einer Minimierung der Temperaturspreizung. Bei der Wärmebereitstellung mit KWK-Anlagen kann nach dem Ansatz der Carnotisierung [8] durch die Abgabe der Wärme auf niedrigem Temperaturniveau theoretisch die Stromproduktion gesteigert werden. Ein niedriges Temperaturniveau begünstigt auch die Einbindung erneuerbarer Energiequellen wie Solarthermie und Geothermie. Nach der Arbeitsgemeinschaft für Fernwärme [9] stellt das hohe Temperaturniveau das größte Hemmnis bei dem Ausbau erneuerbarer Energien in den bestehenden Fernwärmesystemen dar. Außerdem sinken die Wärmeverluste in den Rohrleitungssystemen des Verteilungsnetzes. Dem gegenüber steht ein erhöhter Pumpenenergieaufwand bedingt für die Umwälzung eines höheren Massenstroms bei geringerer Temperaturspreizung. Desweiterer unterliegt die Absenken des Temperaturniveaus Grenzen bedingt durch die technischen Anschlussbedingungen der Verbraucher und Erzeuger. Eine wesentliche Restriktion stellt die hygienische Bereitstellung von Trinkwasser dar. Nach einer Studie von Beyssat [10] muss nach gesetzlichen Vorgaben in allen EU-Staaten zum thermischen Schutz vor Legionellen die Trinkwasserbereitstellung bei mindestens 60°C erfolgen, sobald das Wasservolumen des Trinkwassersystems größer als 3 Liter ist.

Eine weitere Möglichkeit den Wärmetransport im Verteilnetz effizienter zu gestalten ohne das Temperaturniveau anzupassen besteht in der Verwendung neuer Rohrleitungssysteme. Gerade neuentwickelte Kunststoffmantelrohre mit einer Doppelrohrisolierung ermöglichen eine deutliche Verringerung der Wärmeverluste und können durch die einfachere und schnellere Verlegung zu deutlich niedrigeren Investitionskosten verbaut werden [6]. Auch mit einer Nachverdichtung kann die Effizienz erhöht werden. In Netzteilen in denen viele sanierte Gebäude stehen ist das Rohrsystem meist historisch bedingt überdimensioniert. Durch die Einbindung neuer Verbraucher kann so der Wärmetransport wieder gesteigert und damit anteilig betrachtet der Wärmeverluste reduziert werden.

---

<sup>2</sup> Liniendichte bzw. Wärmeliniendichte gibt die durchschnittliche Leistung an, die pro Meter Rohrleitung im Fernwärmesystem angeschlossen ist. Die Liniendichte ist damit ein Maß für die Wärmedichte im System. [4]

## 1.1 Zielsetzung

Aus der Literaturrecherche der Einleitung wird deutlich, dass die Optimierung eines bestehenden Fernwärmesystems auf Grund der vielen Einflüsse und Restriktionen über die ganze Prozesskette des Fernwärmesystems ein komplexes Unterfangen ist und dem entsprechend mit hohem Planungsaufwand verbunden ist. Die Anpassung des Temperaturniveaus und die Absenkung der Wärmetransportverluste bestehender Fernwärmesysteme scheint jedoch mittelfristig gesehen unabdingbar, da zum Erreichen der Klimaschutzziele der Anteil erneuerbarer Wärmeenergie mit meist niedrigen Temperaturniveau weiter steigen muss [9] und Aufgrund der fortschreitenden Gebäudesanierung die Liniendichte weiter abnehmen wird.

In dieser Arbeit soll daher am Fallbeispiel des Nahwärmenetzes Freiburg Weingarten auf Basis der erhobenen Messdaten und unter Berücksichtigung der Netzstruktur verschiedene Optimierungsstrategien entwickelt werden, die den wirtschaftlichen Betrieb des Nahwärmenetzes auch zukünftig sicherstellen. Diese Optimierungsstrategien sollen anschließend in einem Simulationsmodell umgesetzt werden, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Durch eine Auswertung von Netzparametern wie Energieverbrauch, Exergieverbrauch, Temperaturniveau und Wärmeverlusten vor und nach der Umstellung des Systems, sollen die Vor- und Nachteile quantifiziert werden. In Abschluss sollen, auf Basis der Ergebnisse des Fallbeispiels, möglichst allgemein gültige Erkenntnisse zu der Umstellung bestehender Nahwärmesysteme abstrahiert werden.

## 1.2 Methodik

In dem zweiten Kapitel wird der grundlegende Aufbau von Fernwärmesystemen beschrieben und auf das physikalische Zusammenwirken des gesamten Prozesses vom Erzeuger bis zum Verbraucher erläutert. Auf dieses Wissen aufbauend werden die üblichen Regelstrategien beschrieben. Zudem ist die exergetische Bilanzierung von Fernwärmesystemen dargelegt, da vor allem die Wahl der richtigen Bezugstemperatur nicht trivial ist. Zuletzt wird in dem Kapitel noch auf das verwendete Simulationsprogramm Dymola/ Modelica [A] und die Methodik zur Bewertung der Modelvalidierung eingegangen.

Im dritten Kapitel wird das Nahwärmenetz des Fallbeispiels Freiburg Weingarten beschrieben. Dafür wird auf Daten zurückgegriffen die das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) im Rahmen des Forschungsprojekts „Weingarten 2020“ bereits gesammelt und zum Teil schon ausgewertet hat. Für den kompletten Verteilstrang Weingarten Süd liegen Langzeitmessdaten vor, die eine thermodynamische Bilanzierung aller Gebäude im Netzstrang ermöglichen. Ebenfalls liegen Langzeitmessdaten zum Heizkraftwerk vor. Im Kapitel wird die Aufbereitung der Messdaten für die spätere Simulation beschrieben. Die Messdaten werden zum einem als Inputdaten für die Simulation verwendet, um das realistische Verhalten der Verbraucher zu simulieren, zum anderen dienen die Messdaten zur Validierung des Netzmodells. Im Abschluss erfolgt eine Auswertung der Messdaten mit dem Ziel um Erkenntnisse zur Umstrukturierung des Netzes und Anpassung des Temperaturniveaus zu gewinnen.

Im vierten Kapitel werden dann der Aufbau und die Entwicklung des Simulationsmodells beschrieben. Ziel der Modellierung in Dymola/ Modelica ist ein Modell aus mehreren Teilmodellen zu entwickeln, das durch grafische Programmieren leicht angepasst werden kann, um eine einfache Implementierung der Optimierungsstrategien zu ermöglichen.

Im letzten Kapitel werden anhand der Messdatenauswertung und unter Berücksichtigung der Netzstruktur zwei Optimierungsstrategien ausgearbeitet. Um die Optimierungsstrategien zu simulieren wird das Netzmodell entsprechend angepasst. Danach können dann die Simulationsergebnisse ausgewertet und in einem Vergleich gegenübergestellt werden. Anhand des Vergleiches wird dann eine Empfehlung für die Optimierung des Nahwärmenetzes Freiburg Weingarten erstellt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Nahwärmesysteme

#### 2.1.1 Funktionsweise und Bauarten

Ein Nah- bzw. Fernwärmesystem dient der Versorgung mehrerer Verbraucher mit Wärmeenergie. Das Wärmesystem besteht dabei im Wesentlichen aus vier Anlagenteilen:

- Erzeugungsanlage
- Pumpenstation
- Verteilnetz
- Verbraucher

Das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem ist in Abbildung 2-1 verdeutlicht. In einer oder mehreren Erzeugungsanlagen wird dem Verteilnetz Wärme zugeführt und damit die Temperatur des Transportmediums –meist Wasser- erhöht. Das Medium wird anschließend im sogenannten Vorlauf des Verteilnetzes mit Hilfe von Pumpen zu den Verbrauchern gefördert. Die Temperatur im Vorlauf liegt üblicherweise zwischen 90°C - 130°C. Die Wärme wird dann in sogenannten Wärmeübergabestationen an die Verbraucher abgegeben. Nach der Wärmeübertragung wird das Medium durch den Rücklauf des Verteilnetzes wieder zu den Erzeugungsanlagen zurückgeführt. Aus der Wärmeabgabe resultiert eine Temperaturabsenkung. Die Rücklauftemperatur liegt üblicherweise zwischen 60°C – 90°C.

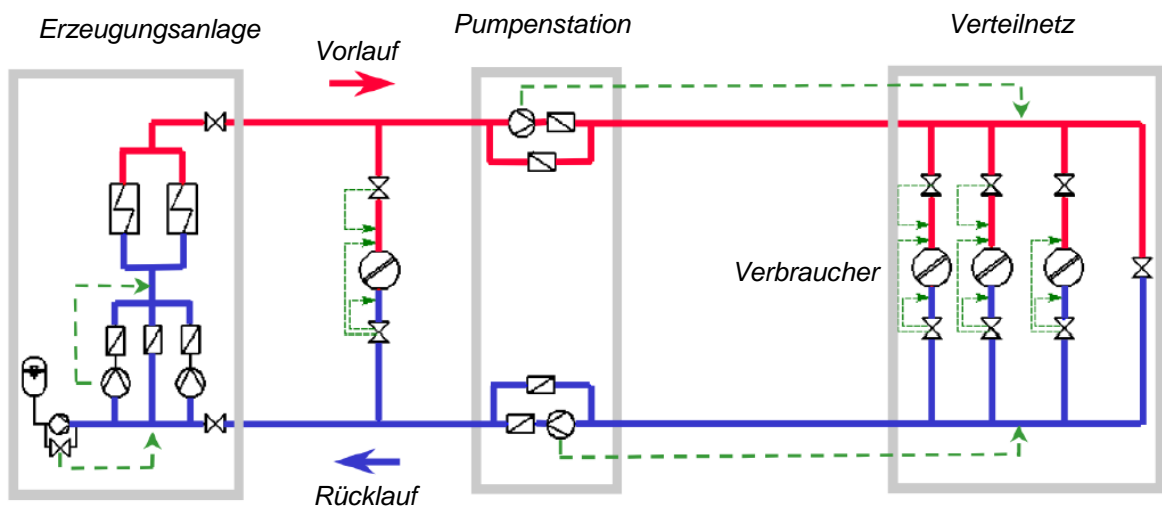


Abbildung 2-1: Vereinfachtes Fließschemata eines Nahwärmesystems [11]

Das beschriebene Funktionsprinzip gilt dabei sowohl für Nahwärmesysteme als auch für Fernwärmesysteme. Die Unterscheidung der beiden Begrifflichkeiten ist ausschließlich in der Größe und Reichweite des Wärmenetzes begründet. Ein Fernwärmesystem versorgt meist ganze

Städte oder große Ballungszentren mit Wärme. Nahwärmesysteme hingegen beschränken sich auf einzelne Stadtteile oder Siedlungen.

### 2.1.1.1 Verteilnetz

Die Verteilnetze von Fernwärmesystemen lassen sich nach ihrem Aufbau in drei verschiedene Typen unterteilen:

- Strahlnetz
- Ringnetz
- Maschennetz

Die Netztypen sind qualitativ in Abbildung 2-2 dargestellt. Das Strahlnetz ist die einfachste und damit auch die von den Baukosten günstige Form, um die Verbraucher mit den Erzeugungsanlagen zu verbinden. Die einzelnen Verbraucher werden nur durch eine von der Erzeugungsstelle abgehende Leitung versorgt. Das Ringnetz bietet die Möglichkeit Verbraucher aus mehreren Richtungen zu versorgen, mit Wärmeerzeugern, die an unterschiedlichen Standorten stehen. Dies ermöglicht eine größere Versorgungssicherheit. Das Maschennetz ist eine verbesserte Form des Ringnetzes. Dieser Netztyp ermöglicht das Anfahren der Verbraucher von mehreren untereinander verbundenen Leitungsabschnitten. Diese Bauform ist hydraulisch komplex und erfordert hohe Investitionskosten, weshalb sie nur in Gebieten mit hoher Wärmedichte und Versorgungssicherheit Anwendung findet [4].

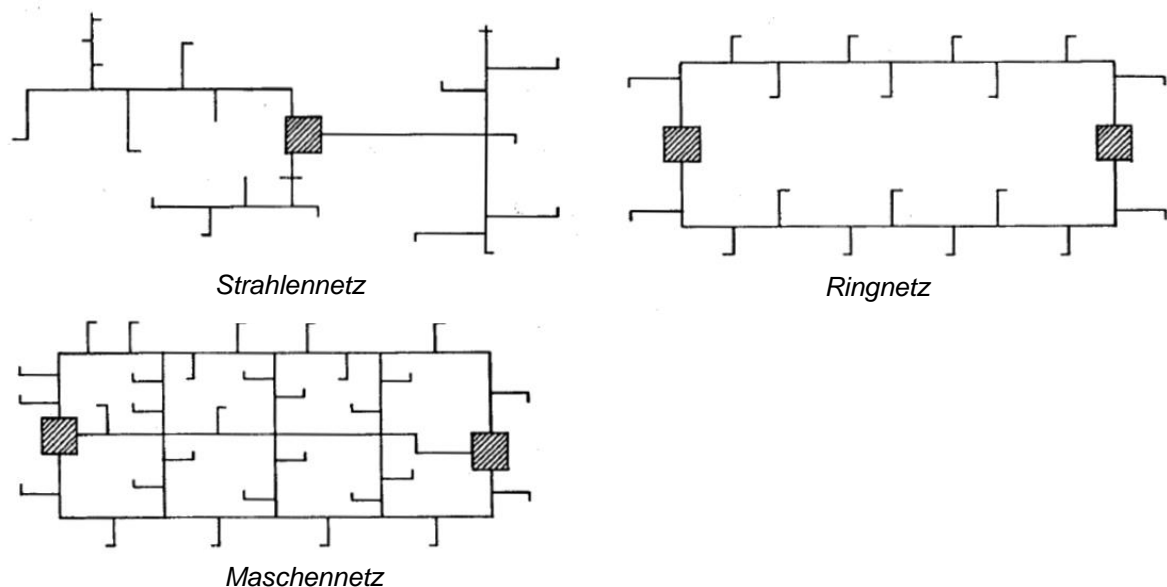


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Verteilnetztypen [4]. Die schraffierten Rechtecke stellen die Erzeugungsanlagen dar.

Die Anzahl der Rohrleitungen zwischen Erzeugungsanlagen und Verbrauchern kann je nach Anwendungsfall variieren. Wird an den Verbrauchern nur ein Temperaturniveau benötigt, ist ein sogenanntes Zweileitersystem ausreichend. Dieses besitzt einen Vorlauf und einen Rücklauf. Sind in einem Verteilnetz viele Verbraucher mit einer Trinkwassererwärmung (TWE) und einen



Niedertemperaturheizungssystem (z.B. Fußbodenheizung), kann ein Dreileitersystem verwendet werden, das die Wärmeströme in zwei getrennten Vorläufen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zur Verfügung stellt.

### **2.1.1.2 Verbraucher und Wärmeübergabestation**

Die Verbraucher in Fernwärmesystemen sind durch sogenannte Wärmeübergabestation (WÜST) angeschlossen. Ziel der WÜST ist den Verbraucher jeder Zeit mit ausreichend Wärme zu versorgen. Dazu wird mit einem Stellventil der Massenstrom aus dem Verteilnetz reguliert. Je nach Anwendung (Trinkwassererwärmung, Heizung, Fußbodenheizung, usw.) sind unterschiedliche hydraulische Schaltungen vorgesehen. Grundsätzlich wird zwischen indirekt angeschlossenen und direkt angeschlossenen WÜST unterschieden. In modernen Fernwärmesystemen werden meistens indirekte WÜST verwendet, da diese das Heizungssystem des Gebäudes von dem Verteilnetz hydraulisch trennen, indem ein Plattenwärmetauscher zur Wärmeübertragung verwendet werden. Dies verhindert die Ausbreitung von lokalen Fehlern, wie Beispielweise Leckagen oder Verunreinigungen im Wasser, auf das komplette Netz. Zudem können hydraulische Komponenten im Heizungssystem der Gebäude (Sekundärseitig) auf Grund geringerer Betriebsdrücke kleiner dimensioniert werden. Als Nachteile der indirekten Anschlussweise sind die höheren Anschaffungskosten und die steigenden Wärmeverluste durch die Grädigkeit der Plattenwärmeübertrager zu benennen.

### **2.1.2 Informationen zur Betriebsweise**

Die Aufgabe eines Fernwärmesystembetreibers ist, den Verbrauchern zu jeder Zeit eine ausreichende Wärmeleistung zu Verfügung zu stellen. Die Betriebsweise soll dabei so erfolgen, dass die Wärmeleistung möglichst energieeffizient bereitgestellt wird, um so die Ökonomie und Ökologie des Systems zu maximieren. Die Energieeffizienz von Fernwärmesystemen wird im Wesentlichen durch ihre Erzeugerstruktur und deren Einsatzweise bestimmt. Dabei spielen Netztemperaturen und Auslegungsdrücke des Wärmenetzes, die notwendigen Wärmeleistungen zur Deckung der Kundenanforderungen und der daraus resultierende Massenstrom eine wesentliche Rolle [5].

Betrachtet man den ersten Hauptsatz der Thermodynamik nach Gleichung (2.1) kann der Netzbetreiber auf zwei Parameter Einfluss nehmen, um eine vorgegebene Wärmeleistung  $\dot{Q}_{th}$  bereitzustellen.

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (2.1)$$

Zum einem kann über die Pumpenstationen die Druckdifferenz angepasst und damit der Massenstrom  $\dot{m}$  geändert werden, zum anderen kann anhand der Betriebsweise der Erzeugungsanlagen die Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  variiert werden. Die Rücklauftemperatur bestimmt dann die abgegebene Wärmeleistung. Sie wird maßgeblich von den WÜST und damit von den Kundenanlagen (KA) beeinflusst. Je nach Anforderungen der KA wird bei einer vorgegebenen Vorlauftemperatur des Betreibers ein bestimmter Massenstrom  $\dot{m}_{KA}$  entnommen, um den Wärmebedarf der KA zu decken.

Natürlich bestehen bei der Variierung des Massenstroms und der Vorlauftemperatur Grenzen, die sich aus den technischen Anforderungen der Kundenanlagen und den gesetzlichen Vorgaben ergeben. In der Regel wird die Vorlauftemperatur in Fernwärmesystemen in Abhängigkeit der Außentemperatur vorgegeben, damit eine ausreichende Heizungsversorgung der KA zu jeder Jahreszeit sichergestellt ist. Bei niedrigen Außentemperaturen steigen die Wärmeverluste der Gebäude an die Umgebung. Damit eine Raumtemperatur nicht absinkt, muss ein höherer Wärmestrom bereitgestellt werden. Dieser kann nach Gleichung (2.2) fast ausschließlich durch eine höhere thermodynamische Mitteltemperatur  $T_m$  der Wärmeübertrager (WÜ) erfolgen, da das Produkt aus Wärmeübertragerfläche  $A$  und Wärmeübergangskoeffizient  $k$  näherungsweise konstant ist.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (T_{m,WÜ} - T_R) \quad (2.2)$$

Bei TWE in KA ist zusätzlich auf Hygienevorschriften zu achten. In Trinkwarmwassersystemen mit einem Wasservolumen von mehr als 3 Litern ist eine Erwärmung auf 60°C zum Schutz vor Legionellen vorgeschrieben. Daher muss im Verteilnetz unter der Berücksichtigung der Grädigkeit der Wärmeübertrager eine Vorlauftemperatur von ca. 70°C eingehalten werden [6].

Das größte Potential bei der Effizienzsteigerung der Fernwärmesysteme liegt in der Regel in der Absenkung der Rücklauftemperatur, da im Allgemeinen gleich drei positive Effekte eintreten.

1. Bei gleichbleibender Vorlauftemperatur wird nach Gleichung (2.1) die Temperaturdifferenz vergrößert und somit kann mit geringerem Massenstrom die gleiche Wärmeleistung erbracht werden. Die Senkung des Massenstroms reduziert die Pumpenleistung.
2. Bei einer geringeren Rücklauftemperatur sinkt die Temperaturdifferenz zwischen den Rohrleitung und der Umgebung. Dadurch sinken nach Gleichung (2.2) die Wärmeverluste des Verteilnetzes.
3. Bei der Verwendung von KWK-Anlagen als Erzeuger, die mit einem Carnot ähnlichen Prozess laufen, wird durch die Senkung thermodynamischen Mitteltemperatur bei Wärmeabgabe an das Wärmenetz die Exergie und der Anteil der elektrischen Energie gesteigert.

Des Weiteren ermöglicht erst eine niedrige Rücklauftemperatur den wirtschaftlichen Einsatz von erneuerbaren Energie wie Solarthermie oder Geothermie. Aufgrund des geringem maximalen Temperaturniveaus von 60-70°C bei dem diese Energiequellen die Wärme bereitstellen kann, muss die Rücklauftemperatur gering sein, um ein wirtschaftliche Verhältnis zwischen Massenstrom und Temperaturdifferenz zum Übertragen der Wärme zu ermöglichen [6].

### 2.1.3 Exergetische Betrachtung von Wärmenetzen

Die Exergie ist eine Zustandsgröße, die sich aus einer Kombination des Ersten und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik herleiten lässt. Nach dem Buch von Jürgen Karl [8] lässt sich die Exergie in zwei Sätzen beschreiben:

*„Die maximale Arbeit, die im Kreisprozess verrichtet werden kann, ist gleichbedeutend mit der Arbeit, die durch einen Carnot-Prozess bei Wärmeabfuhr an die Umgebung verrichtet werden kann. Die Exergie ist eine Pseudo-Zustandsgröße, die die maximale Arbeitsfähigkeit eines Fluids beschreibt.“*

Die spezifische Exergie  $e_x$  lässt sich mathematisch demnach wie folgt definieren:

$$e_x = (h - h_u) - T_u \cdot (s - s_u) + e_0 \quad (2.3)$$

Bei der exergetischen Bilanzierung von Heißwasserfernwärmesystem kann die Gibbs'sche Enthalpie des Stoffstroms  $e_0$  vernachlässigt werden, da keine Aggregatzustandsänderung erfolgt. Die spezifische Enthalpie  $h$  und Entropie  $s$  sind bei idealisierter Betrachtung des Fluids als inkompressible Flüssigkeit ausschließlich Temperaturabhängig. Wichtig ist vor allem die sinnvolle Wahl der Umgebungstemperatur  $T_u$ . In Kraftwerksprozessen wird üblicher Weise die Außenlufttemperatur als Umgebungstemperatur gewählt, da die Kraftwerke die Wärme (Anergie und Exergieverluste) in der Regel über außenluftgekühlte Kühltürme abgeben. Durch die Bilanzierung einzelner Kraftwerksteile lässt dann von der Brennkammer bis zum Kühlturm die Exergiereduktion darstellen. Ziel im Kraftwerk ist den Exergieverbrauch an der Turbine zu maximieren und in allen anderen Komponenten zu minimieren.

Für Fernwärmesysteme ist die Außenlufttemperatur als Wahl der Umgebungstemperatur nicht Sinnvoll, da die Wärmeabgabe entweder mit Ziel der Wohnraumerwärmung und mit dem Ziel der TWE erfolgt. Zudem ist die Außentemperatur zeitliche schwankend, wodurch die Komplexität beim Berechnen der Exergie über lange Betrachtungsräume zunimmt [7]. Nach der Dissertation von Bargel [7] sind daher folgende Temperaturen differenziert nach Heizung und Trinkwasser als Sinnvoll erachtet:

- $T_u = 60^\circ\text{C}$  für die TWE. Dies entspricht nach den Hygienevorschriften der Trinkwasserverordnung [12] der minimalen zulässigen Temperatur für Trinkwassersysteme mit einem Volumen über 3l. mit von  $60^\circ\text{C}$  oder die nach der DIN EN 806-2 [13] empfohlene Zapftemperatur von  $43^\circ\text{C}$  verwendet werden.
- $T_u = 43^\circ\text{C}$  für die TWE. Diese Temperatur wird nach DIN EN 12831-1 als maximale Zapftemperatur empfohlen
- $T_u = 20^\circ\text{C}$  für das Heizungssystem. Entspricht der Empfohlenen Raumtemperatur nach DIN EN 12831-1 [14].

Bei der Messdatenerfassung im Nahwärmenetz Freiburg Weingarten wurden für einige Gebäude nur die Gesamtenergieverbräuche bilanziert, damit kann eine Differenzierung zwischen TWE und Heizungssystem nicht vollständig vorgenommen werden. Daher wird als unterstes Temperaturniveau das der Raumwärme mit 20°C gewählt. Nach der Definition der Exergie besteht ein Wärmestrom, der unter einer thermodynamischen Mitteltemperatur von 20°C abgegeben wird nur noch aus Anergie und kann demnach nicht mehr zur Verrichtung von Arbeit verwendet werden. Das Bestreben der Exergieoptimierung im Fernwärmesystemen mit KWK-Erzeugern ist den Exergieanteil im Verteilnetz und an den Verbrauchern zu minimieren und damit den Exergieanteil im HKW zu maximieren. Damit kann bei gleichem Gesamtwirkungsgrad der Anteil Stromproduktion erhöht werden [5]. Im Verteilnetz sinken zudem die Wärmeverluste.

## 2.2 Simulation von Wärmenetzen

Zur Simulation des Betriebsverhaltens des Nahwärmenetz Freiburg Weingarten wird ein thermohydraulisches Verteilnetzmodell im Simulationsprogramm Dymola/ Modelica [A] entwickelt. Während der Literaturrecherche konnten keine weiteren Arbeiten gefunden werden in den ganze Wärmenetze in Dymola/ Modelica abgebildet wurden. In den meisten Arbeiten [6], [5], [15] wurde das Programm TRNSYS (Transient System Simulation Tool) verwendet, das genau wie Dymola/ Modelica für die Simulation dynamische Systeme spezialisiert ist und bereits eine umfangreiche Bibliothek mit vorprogrammierten Teilmodellen zur thermodynamische und hydraulischen bietet. Die zeitliche Auflösung der Simulation wurde je nach Anwendungsfall unterschiedlich gewählt. Bei der Simulation von kurzzeitigen Effekten wie Beispielsweise der Betrachtung von Netzspeichereffekten scheint eine Auflösung von 5-15 min sinnvoll [15], [11]. Bei Simulationen in den die Struktur oder die Betriebsweise von Netzen geändert werden scheint eine stündliche Auflösung üblich [5], [6]. Da in dieser Arbeit ebenfalls Strukturoptimierungen simuliert werden sollen, ist ebenfalls eine stündliche Auflösung gewählt. Der Betrachtungszeitraum ist, wie in den Vergleichsarbeiten, ebenfalls auf ein Jahr angesetzt, um das unterschiedliche Netzverhalten in Abhängigkeit der Außentemperatur zu berücksichtigen. Ziel der Arbeit ist ein Modell zu entwickeln das flexibel Anpassbar ist, um die verschiedene Optimierungsstrategien mit wenig Zeitaufwand implementieren zu können. Dazu soll der modulare Aufbau von Dymola/ Modelica genutzt werden.

## 2.2.1 Simulationsprogramm Dymola/ Modelica

Modelica ist eine objektorientierte und gleichungsbasierende Programmiersprache. Sie wird hauptsächlich zur Simulation von dynamischen physikalischen Systemen verwendet [15]. Dymola ist eine grafische Entwicklungsumgebung für Modelica. Neben Dymola existieren auch noch weitere Entwicklungsumgebungen wie SimulationX und OpenModica.

Ein großer Vorteil von Dymola/ Modelica besteht in der Möglichkeit mit Hilfe des grafischen Programmierens schnell komplexe Modelle zu erschaffen. In der kostenlos verfügbaren Standardbibliothek von Modelica ist bereits eine Vielzahl von physikalischen Modellen vorhanden, die über Eingabefenster parametrisiert werden können. Zudem kann bei Bedarf der Quellcode der Modelle eingesehen und angepasst werden.

Tabelle 2-1: Dymola/ Modelica Bibliotheken

Bibliothekname	Versionsnummer	Beschreibung
Modelica Library	3.2.1, 2013-08-14	Standard Bibliothek von Modelica (Open Source). Enthält Modelle zur Modellierung von elektrischen, mechanischen, hydraulischen und thermischen Systemen. Zudem sind Blöcke zur Modellierung der MSR dieser Systeme vorhanden und Basisblöcke wie mathematische Operatoren, Quellen und Senken verfügbar.
Buildings Library	2.1.0, 2015-07-13	Open Source Bibliothek entwickelt vom Lawrence Berkeley National Laboratory. Beinhaltet vor allem thermohydraulische Modell der Gebäudetechnik. Zum Beispiel Wärmeübertrager, Pumpen, Solarkollektoren, Ventile, Wärmepumpen, u.v.m.
ISELib	4.0	Bibliothek des ISE. Beinhaltet Modelle die in Projekten von Mitarbeitern des Instituts entwickelt wurden. Die Bibliothek nicht veröffentlicht.

Durch Verknüpfung der einzelnen Modelle, kann so ein komplexes System dynamisch simuliert werden. Neben den Modellen sind auch eine Vielzahl an Naturkonstanten und Stoffeigenschaften wichtiger Fluide vorhanden. Neben der Standardbibliothek von Modelica, sind noch andere Bibliotheken verfügbar, die in Dymola eingelesen werden können. Für die Arbeit werden die Bibliotheken nach Tabelle 2-1 verwendet.

## 2.2.2 Validierungsbewertung

Um eine Aussage über die Qualität eines Simulationsmodells zu treffen, muss eine Validierung erfolgen. Bei der Validierung werden die Ergebnisse aus der Simulation (Rechenmodell) mit der Realität abgeglichen. Liegt die Abweichung innerhalb einer vorgegebenen Toleranz, kann das Modell für Berechnungen verwendet werden.

Das Simulationsmodell dieser Arbeit soll zur Validierung mit Messwerten abgeglichen werden. Die Abweichung zwischen den Messdaten und Simulationsergebnissen wird mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  berechnet (2.5). Zur Berechnung des Bestimmtheitsmaßes wird allgemein gesprochen die Varianz der zu erklärenden Variable (TSS) mit der Varianz der erklärten Variable (ESS) ins Verhältnis gesetzt. Der Zusammenhang der beiden Varianzen und der Bezug zu der Validierungsbewertung in dieser Arbeit soll mit Gleichung erklärt werden.

$$\underbrace{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}_{TSS} = \underbrace{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}_{ESS} + \underbrace{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}_{RSS} \quad (2.4)$$

Die zu erklärende Varianz des Messwertes (TSS) kann mit einem perfektem Rechenmodell allein mit der erklärenden Varianz (ESS) der physikalischen Zusammenhänge im Modell beschrieben werden. In der Regel kann ein Rechenmodell die Varianz der Messwerte jedoch nicht perfekt abbilden, weshalb eine Differenz, die sogenannte unerklärte Abweichung (ESS) entsteht. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gibt an wie groß der Anteil der unerklärten Abweichung ist.

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (2.5)$$

Aus Gleichung (2.5) ist ersichtlich, dass das Bestimmtheitsmaß im Wertebereich zwischen null und eins liegen muss. Je näher das Bestimmtheitsmaß an eins liegt, also je kleiner die unerklärte Abweichung  $RSS$  ist, desto so besser ist die Anpassungsgüte des Modells. Das Rechenmodell gilt demnach als validiert, wenn das Bestimmtheitsmaß dicht an eins liegt.

### 3 Nahwärmesystem Freiburg Weingarten

#### 3.1 Systembeschreibung

Gegenstand dieser Arbeit ist das zentrale Wärmesystem der Freiburger Stadtteile Weingarten und Rieselfeld. Auf Grund der Erstreckung des Wärmenetzes auf lediglich zwei Stadtteile wird das System bei den Nahwärmesystemen eingeordnet. In Abbildung 3-1 ist der Verlauf des Wärmenetzes sichtbar.

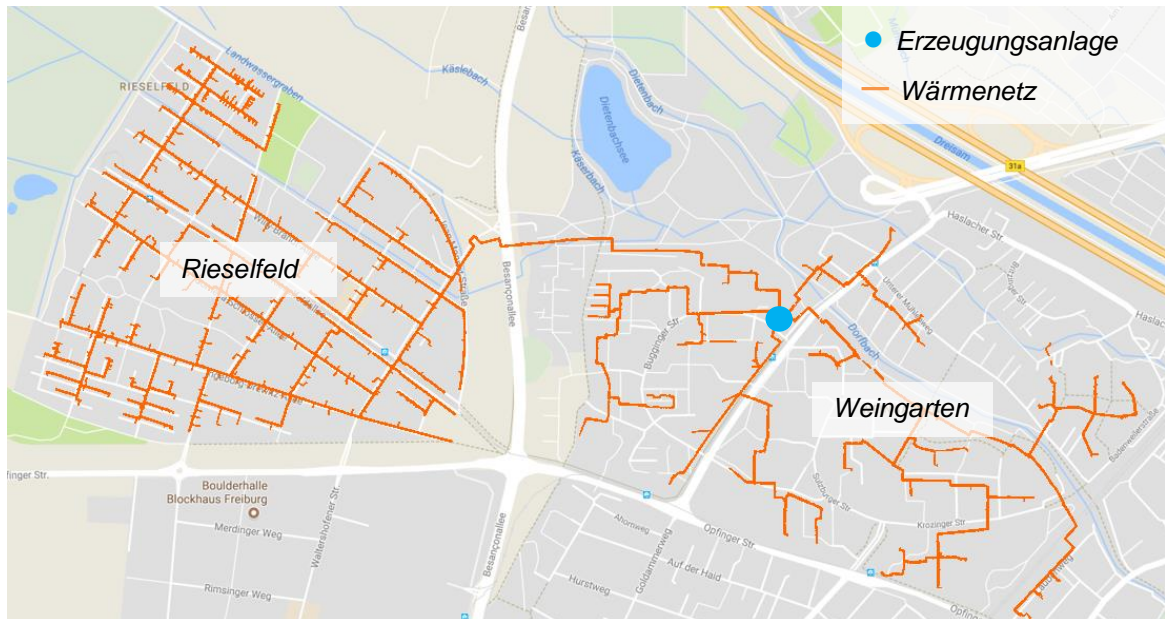


Abbildung 3-1: Nahwärmesystem des Stadtteils Freiburg Weingarten. Kartenmaterial Google Maps [16]

Die Wärme für das gesamte Netz wird in einer zentralen Erzeugungsanlage bereitgestellt, die in der Grafik durch den blauen Punkt markiert ist. Die Erzeugungsanlage zählt zu den Heizkraftwerken, da sie neben der thermischen auch elektrische Energie zur Verfügung stellt. Die wichtigsten technischen Daten zum Nahwärmesystem sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1 - Technische Daten des Nahwärmesystems Weingarten

Beschreibung	Wert	Einheit
Netzlänge Weingarten (Vor- und Rücklauf)	23	km
Netzlänge Rieselfeld (Vor- und Rücklauf)	33	km
Versorgte Haushalte	ca. 15000	-
Jahreswärmeerzeugung ab Erzeugungsanlage (Jahr: 2016)	71005	MWh/a
Maximal mögliche Wärmeleistung aller Wärmeerzeuger	26	MW



### 3.1.1 Heizkraftwerk

Das Heizkraftwerk Freiburg Weingarten befindet sich in einem Gebäude in der Bugginger Straße 85 in Freiburg und wird von dem regionalen Energieversorger „Badenova Wärme Plus GmbH“ betrieben. In Abbildung 3-2 ist das Gebäude mit den insgesamt zwölf Wärmeerzeugern dargestellt.

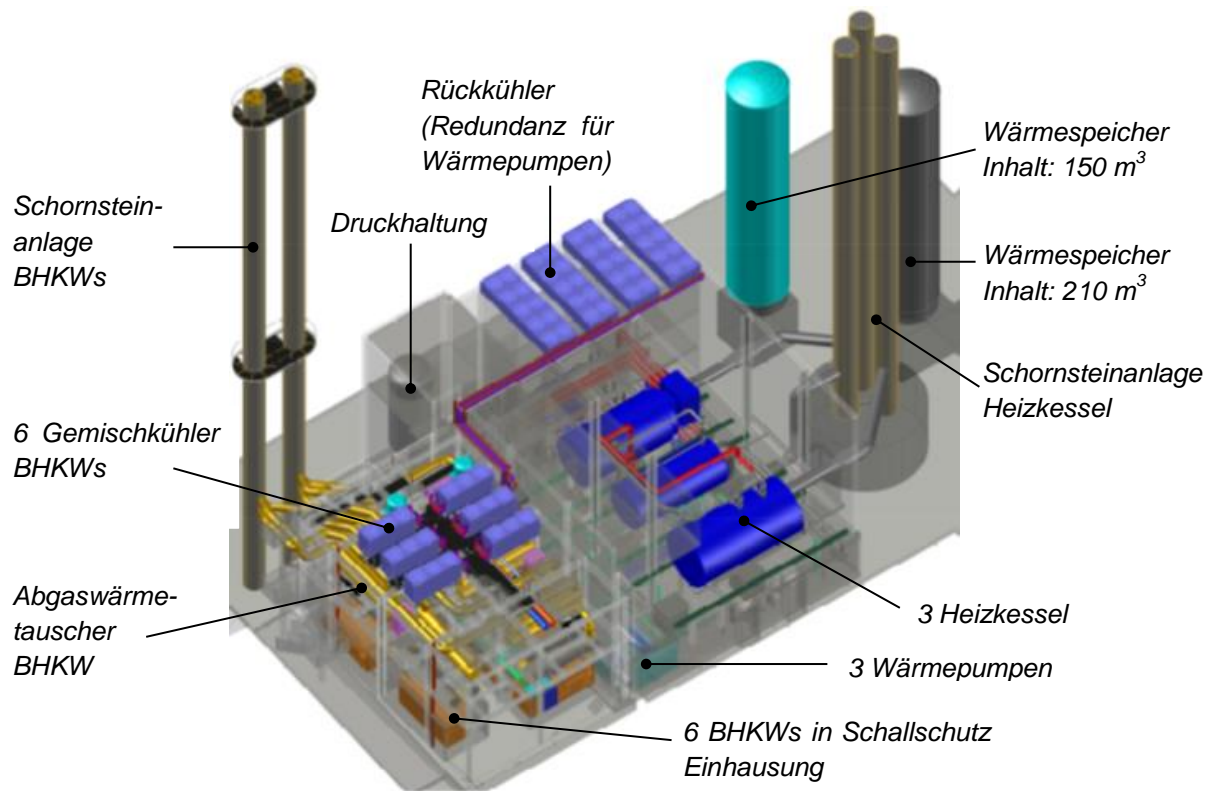


Abbildung 3-2: 3D-Ansicht des Heizkraftwerks Freiburg Weingarten vom Betreiber Badenova Wärme Plus [17].

Der Hauptteil der erzeugten Wärmeenergie bezogen auf ein Jahr (73 % im Jahr 2016) wird durch die sechs BHKWs bereitgestellt. Diese erzeugen mit Hilfe eines erdgasbetriebenen Verbrennungsmotors neben der Wärme auch Strom, der ins Stromnetz eingespeist und zum Betrieb der Anlage verwendet wird. Die drei Kessel der Anlage können mit Heizöl oder Erdgas betrieben werden und dienen zur Abdeckung von Wärmespitzenlasten bei niedrigen Außentemperaturen und als Reservewärmeerzeuger beim Ausfall eines BHKWs (Redundanz). Zusätzlich sind drei Wärmepumpen installiert. Diese dienen der Energieeffizienzsteigerung der Gesamtanlage. Sie beziehen Umgebungswärme aus der Strahlungsabwärme der BHKWs und führen diese dem Rücklauf des Netzstrangs Rieselfelds auf erhöhtem Temperaturniveau zu. Die technischen Daten der Wärmeerzeuger sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Die BHKWs sowie die Wärmepumpen sind im Zuge einer Modernisierungsmaßnahme des Heizkraftwerks im Jahr 2012 neu installiert worden. Sie ersetzen die zuvor eingesetzten BHKWs aus dem Jahr 1998 mit einem geringeren Jahresnutzungsgrad [17].

Tabelle 3-2 – Technische Daten der Wärmeerzeuger des Heizkraftwerks Freiburg WG [18]

Anlagentyp	BHKWs	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Wärmepumpen
Hersteller	MTU	Viessmann	Omnicol	Loos	Combitherm
Typ	AE12V4L63	Vitomax 200 M234	DWH 900	UT-H 16400	KWW 2/1000
Wärmeleistung [kW]	6 * 1600	9500	8000	8800	3 * 500
Kälteleistung [kW]	-	-	-	-	3 * 350
Elektrische Leistung [kW]	6 * 1200 (Erzeugung)	-	-	-	3 * 110 (Verbrauch)
Baujahr	2012	2006	1999	1997	2012

Die Energieflüsse des Heizkraftwerks für das Jahr 2016 sind grafisch im Sankey-Diagramm in Abbildung 3-3 dargestellt. Setzt man die über ein Jahr gesamt erzeugte Energie bestehend aus der Wärmeenergie  $Q_{H,ges} = 4633 \text{ MWh}$  und elektrischer Energie  $W_{el,Netz} = 37993 \text{ MWh}$  ins Verhältnis zur bezogenen Energie (Heizwert von Erdgas und Erdöl)  $Q_{B,ges} = 119661 \text{ MWh}$  ergibt sich nach Gleichung (3.1) der Jahresnutzungsgrad<sup>3</sup> für das Heizkraftwerk.

$$\eta_{a,HKW} = \frac{Q_{H,ges} + W_{el,Netz}}{Q_{B,ges}} = 0,911 \quad (3.1)$$

Anhand des Jahresnutzungsgrades lässt sich die Effizienz des Heizkraftwerks mit anderen Kraftwerksprozessen vergleichen. Aus Tabelle 3-3 wird ersichtlich, dass das Heizkraftwerk Freiburg Weingarten mit Jahresnutzungsgrad von 91,1 % im Vergleich zu anderen KWK-Technologien aber auch im Vergleich zu anderen BHKWs bereits sehr effizient ist.

---

<sup>3</sup>Der Jahresnutzungsgrad gibt genau wie der Wirkungsgrad die Effizienz eines Prozesses an. Der Unterschied liegt im Betrachtungszeitraum. Der Wirkungsgrad bezieht sich auf eine Momentaufnahme; der Jahresnutzungsgrad auf ein Jahr.

Tabelle 3-3 - Kennzahlen von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung [19]

KWK-Anlage	Stromkennzahl	Jahresnutzungsgrad
Blockheizkraftwerk		
Gasmotor	0,30 - 0,80	0,85 - 0,95
Dieselmotor	0,40 - 0,45	0,85 - 0,98
GuD-Kraftwerk		
Gegendruckturbine	0,70 - 0,85	0,80 - 0,90
Entnahme-Kondensationsturbine	1,50 - 2,70	0,55 - 0,75
Gasturbine mit Abhitzenutzung	0,35 - 0,40	0,70 - 0,85
Brennstoffzelle	1,50 - 6,00	0,75 - 0,83

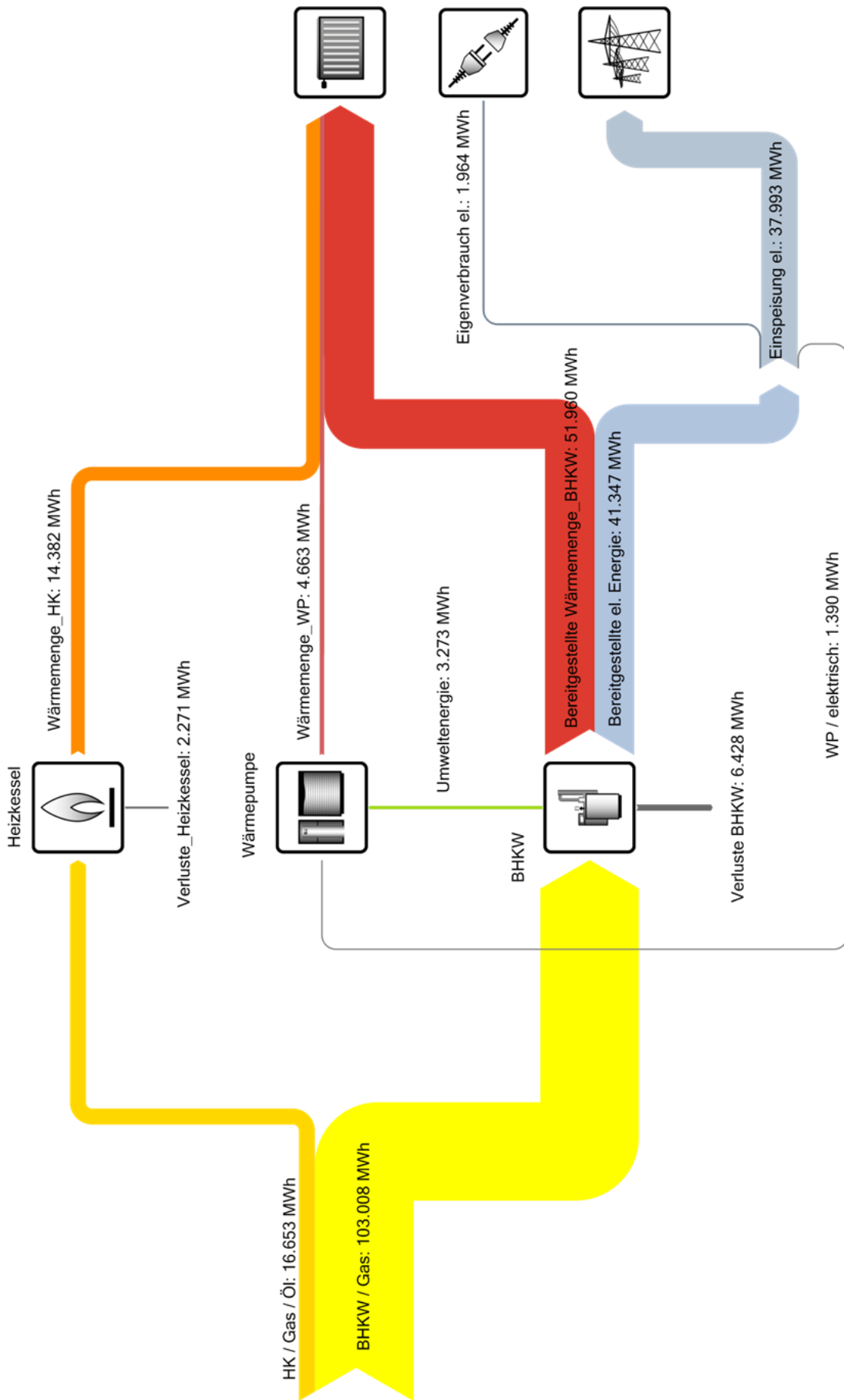


Abbildung 3-3: Sankey Diagramm des Heizkraftwerks (Jahrbilanz: 2016) [20]

### 3.1.2 Verteilnetz

Das Verteilnetz des Nahwärmesystems Freiburg Weingarten ist –wie in Abbildung 3-4 ersichtlich– ein Strahlennetz. Von dem Heizkraftwerk verlaufen vier Verteilstränge in die einzelnen Stadtteile. An den Verteilsträngen sind die einzelnen Gebäude oder Gebäudekomplexe parallel angeschlossen. Die vier Verteilstränge sind nach den Stadtteilen benannt, die sie versorgen:

- Strang Weingarten Ost
- Strang Weingarten Ost/ Süd
- Strang Weingarten Süd
- Strang Weingarten West
- Strang Rieselfeld

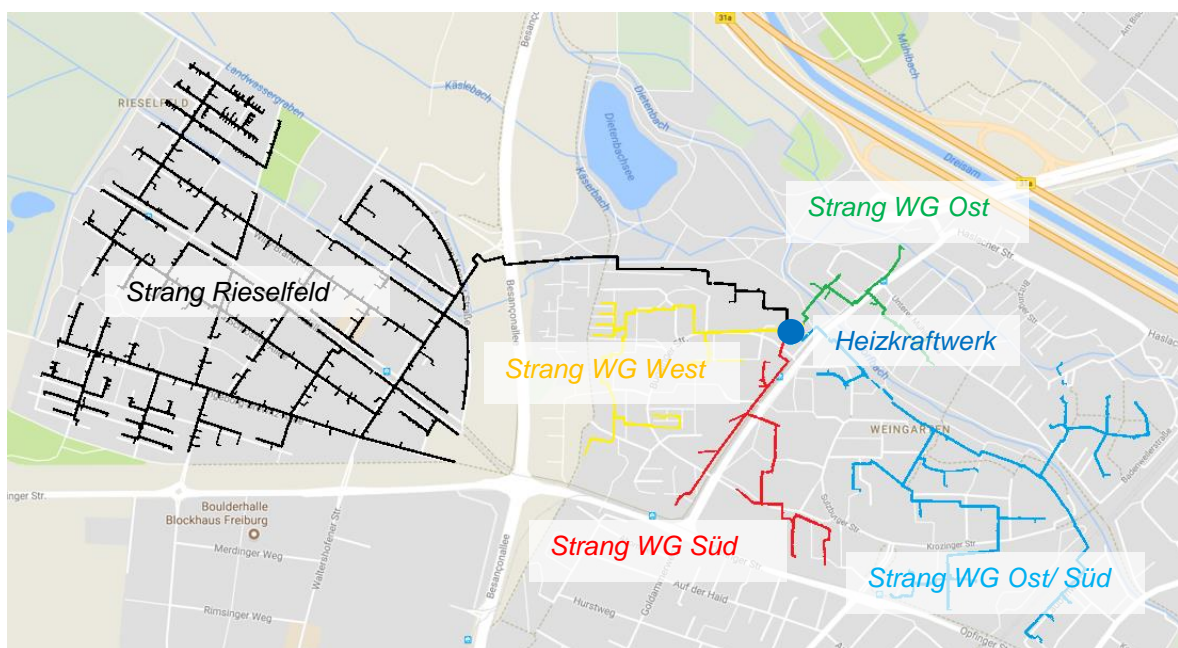


Abbildung 3-4: Aufteilung des Verteilnetzes nach den einzelnen Netzsträngen. Kartenmaterial: Google Maps [16].

Das Rohrleitungssystem im ganzen Verteilnetz ist als Zweileitersystem ausgeführt, mit dem sowohl für die Heizungssysteme als auch für die Trinkwassererwärmung Wärmeenergie bereitgestellt wird. Die Gebäude sind zum größten Teil durch indirekte Wärmeübergabestationen angeschlossen. Ein kleiner Teil der älteren Gebäude im Nahwärmesystem ist jedoch durch direkte Wärmeübergabestationen angeschlossen, weshalb im Netzvorlauf ein konstanter Druck von 7 bar eingehalten werden muss, um diese Verbraucher sicher zu versorgen. Größere Gebäude besitzen getrennte Wärmeübergabestationen für die Trinkwarmwassererwärmung und das Heizungssysteme. Bei kleineren Gebäuden erfolgt die Aufteilung zwischen Trinkwassererwärmung und Heizungskreislauf erst auf der Sekundärseite der Übergabestationen.

### 3.1.3 Verbraucher

Die Verbraucher bzw. Gebäude im Nahwärmesystem sind in den Bauweisen, den Dämmungskonzepten und den hydraulischen Heizungssystemen unterschiedlich. Dies ist für Nahwärmesysteme typisch, da im Laufe der Zeit Gebäude von den Eigentümern modernisiert werden und neue Gebäude dem Netz hinzugefügt werden. Um den Einfluss heterogener Gebäudestrukturen auf das Verteilnetz darzustellen, werden alle Gebäude im Netzstrang Weingarten Süd im Simulationsmodell anhand realer Messdaten abgebildet. In Abbildung 3-5 ist der Netzstrang WG Süd mit allen angeschlossenen Gebäuden abgebildet.

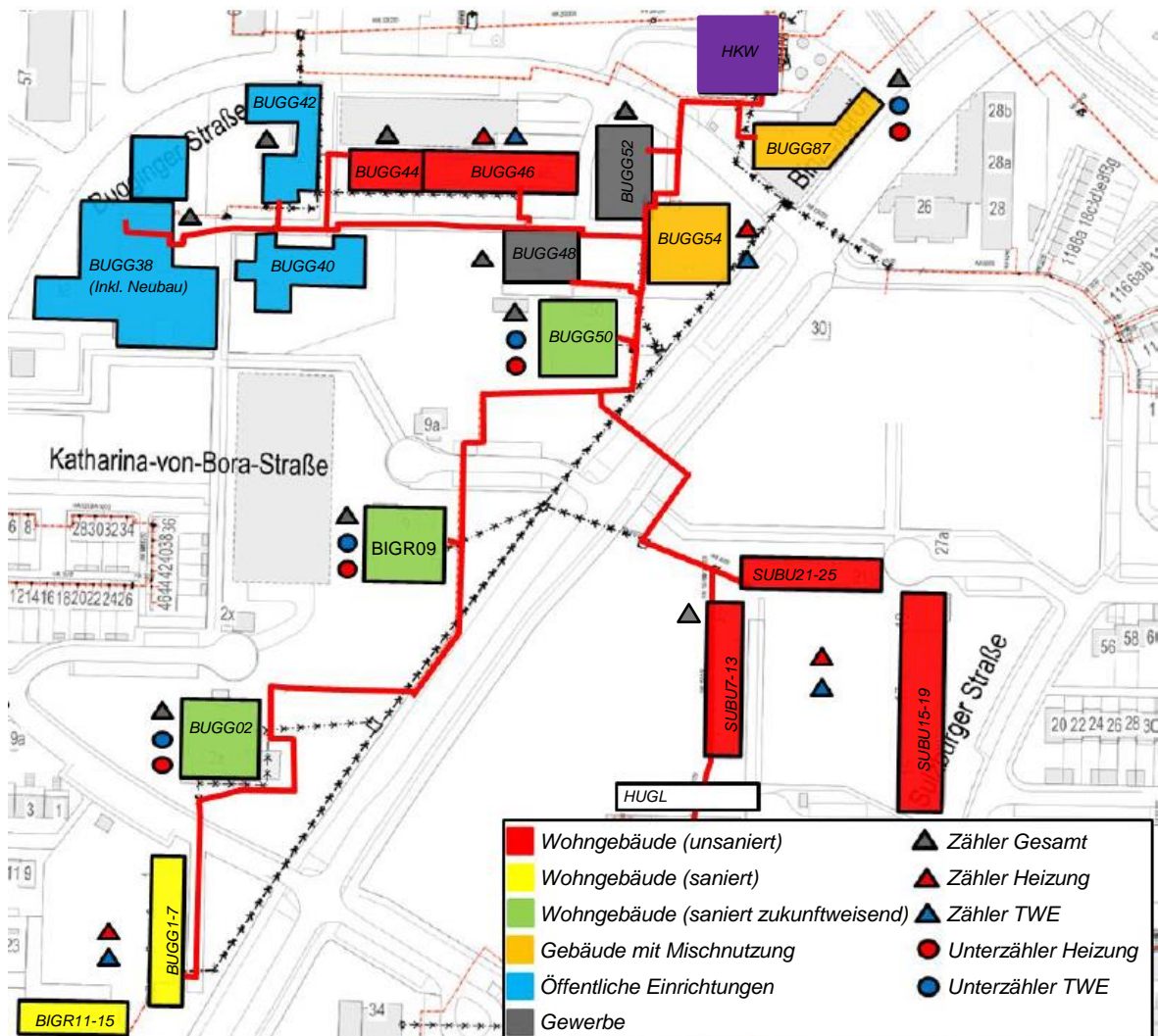


Abbildung 3-5: Netzstrang Weingarten Süd mit allen angeschlossenen Gebäuden und den zugeordneten Messpunkten. Die Gebäude sind nach Nutzung und Sanierungsstand (Dämmung) farblich gekennzeichnet. Die roten Linien Kennzeichnen den Rohrleitungsverlauf des Zweileitersystems. Die einzelnen Gebäudebezeichnungen setzen sich aus den Straßennamen und den Hausnummern zusammen. BUGG = Bugginger Str.; BIGR = Binsengrün; SUBU = Sulzburger Str; HUGL = Hügelsheimer Weg. Der Standort des Heizkraftwerks ist in gekennzeichnet [21].

Die Gebäude sind entsprechend ihres Energieeffizienzniveaus und ihrer Nutzung in der Bachelorthesis von Moritz Martin klassifiziert worden [21]. Die fünf unsanierten (rot) Wohngebäude

weisen Aufgrund ihres veralteten Wärmeisierungsstandards die geringste Energieeffizienz unter EnEV2009<sup>4</sup> auf. Die zwei sanierten (gelb) Gebäude entsprechen bezüglich der Energieeffizienz mindestens den EnEV2009 Standard und die drei grünen Wohngebäude sind zukunftsweisend mit den neusten Dämmmaterialien isoliert. Eine umfassende Analyse der Energieverbräuche der Gebäude kann der Bachelorthesis von Moritz Martin [21] entnommen werden.

### 3.1.4 Regelung

Übergeordnetes Ziel der Regelung des Nahwärmesystems ist nach der Regelbeschreibung des Nahwärmesystems [23] einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Gesamtwärmeerzeugung zu jeder Zeit sicher zu stellen. Dafür werden sowohl der Massenstrom, als auch die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt. Die Regelung anhand der Außentemperatur ist sinnvoll, da diese den größten Einfluss auf den Wärmeverbrauch der Gebäude hat.

Der Massenstrom im Verteilnetz wird reguliert, indem die Druckdifferenz am sogenannten Schlechtpunkt gemessen und an einen Sollwert angepasst wird. Der Schlechtpunkt eines Verteilnetzes befindet sich an dem Verbraucher, der aus hydraulischer Sicht am schlechtesten versorgt wird. Dies ist meist der Verbraucher, der am weitesten von der zentralen Pumpenstation entfernt liegt oder den größten geodätischen Höhenunterschied aufweist. Da der Massenstrom eine Funktion der Druckdifferenz ist, ändert sich mit der Anpassung der Druckdifferenz auch der Massenstrom. Es gilt je größer die Druckdifferenz desto größer der Massenstrom. In Abbildung 3-6 ist der lineare Zusammenhang zwischen Druckdifferenz am Schlechtpunkt und der Außentemperatur dargestellt

Die Vorlauftemperatur wird im Vorlauf der Heizzentrale gemessen bevor sich die Hauptleitung in die einzelnen Verteilstränge aufteilt. Der Vorlauftemperatursollwert wird ebenfalls linear in Abhängigkeit der Außentemperatur nach Abbildung 3-6 geändert. Je geringer die Außentemperatur desto höher wird die Vorlauftemperatur. Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur sorgt neben der Erhöhung des Wärmestroms ebenfalls zu einer größeren Temperaturdifferenz zwischen der thermodynamischen Mitteltemperatur des Wärmeübertragers und der Raumlufttemperatur. Dies ermöglicht die Übertragung höherer Wärmeströme bei gleichbleibender Wärmeübertragungsfläche.

---

<sup>4</sup> In der Energieeinsparverordnung (EnEV) werden auf rechtlicher Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes Bauherren bautechnische Standardanforderungen zum effizienten Betriebsenergiebedarf ihres Gebäudes vorgeschrieben. Die EnEV2009 entspricht den Ordnungsstand vom 29.04.2009 [22].

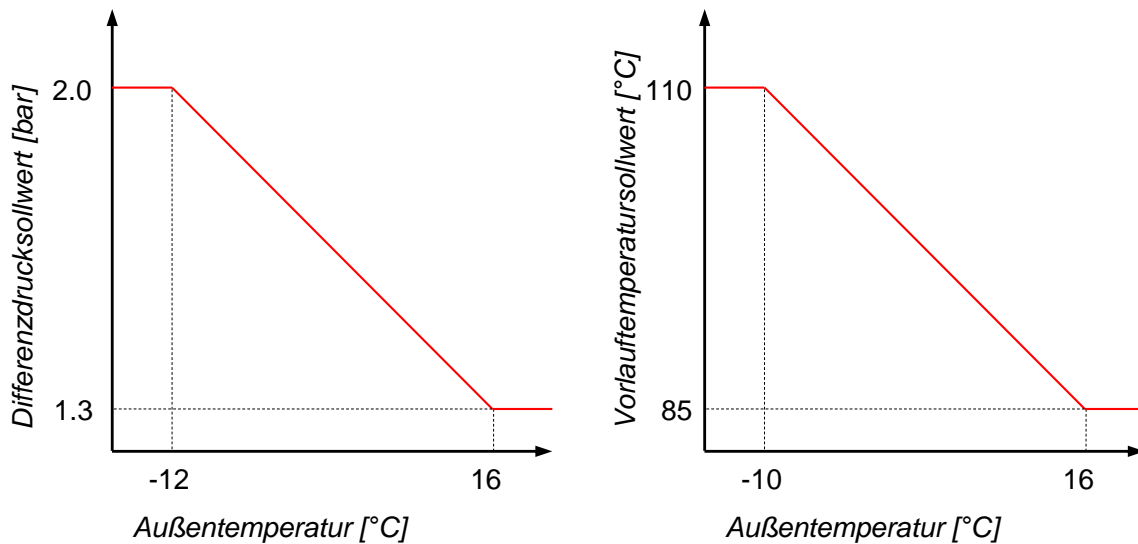


Abbildung 3-6 – Lineare Abhängigkeit zwischen Sollwerten und Außentemperatur

Aus der Summe der gemessenen Volumenströme in den Verteilsträngen, der gemessenen Rücklauftemperatur in der Hauptleitung und dem Vorlauftemperatursollwert errechnet sich nach Gleichung (3.2) der aktuelle Wärmeleistungssollwert, den die Wärmeerzeuger bereitstellen müssen [23].

$$\dot{Q}_{HKW,Soll} = \sum_{i=1}^{n=5} \dot{V}_i \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{VL,Soll} - T_{RL,Ist}) \quad (3.2)$$

Die Anwahl der einzelnen Wärmeerzeuger erfolgt jedoch nicht anhand des Wärmeleistungssollwerts sondern nach der Speicherkapazität. Die An- und Abwahl der BHKWs und des Heizkessels, entsprechend der prozentualen Speicherkapazität, ist in einer Tabelle der HKW-Regelung hinterlegt. Aus Datenschutzgründen dürfen die Zahlwerte der Tabelle nicht voröffentlich werden. Die Regelung wird daher nur qualitativ beschrieben. Eines der insgesamt sechs BHKWs befindet sich kontinuierlich im Betrieb, um die Grundlast des Wärmenetzes zu decken. Wenn die Speicherkapazität sinkt werden nacheinander bei verschiedenen Speicherkapazitäten weitere BHKWs zugeschaltet. Sinkt die Speicherkapazität trotz der Zuschaltung aller BHKWs unter einen Minimalwert werden nacheinander der Heizkessel angewählt. Steigt der Speicherbeladung werden die BHKWs wieder nach einander ausgeschaltet bis nur noch ein BHKW die Grundlast abdeckt. Um eine gleiche Betriebsstundenzahl der BHKWs zu gewährleisten, wird die BHKW-Schaltreihenfolge jede Woche geändert.

Die prozentuale Speicherkapazität  $C_{WSP}$  des Wärmespeichers berechnet sich aus dem Verhältnis der maximalen Wärmeenergie  $Q_{WSP,max}$  und der genutzten Wärmeenergie  $Q_{WSP,Ist}$  nach Gleichung (3.3) [18].

$$C_{WSP} = \frac{Q_{WSP,Ist}}{Q_{WSP,max}} \quad (3.3)$$



Um  $Q_{WSP, Ist}$  zu bestimmen, wird der Speicher in 29 Segmente unterteilt. In jedem einzelnen Segment wird dann die Temperatur  $T_i$  gemessen. Aus der Volumengröße  $V_i$  und der Rücklafterperatur  $T_{RL}$  kann dann die Wärmeenergie für jedes einzelnen Segment berechnet werden und zu einer Gesamtwärmeenergie aufsummiert werden.

$$Q_{WSP, Ist} = \sum_{i=1}^{29} Q_i = \sum_{i=1}^{29} (\rho(T) \cdot V_i) \cdot c_p(T) \cdot (T_i - T_{RL}) \quad (3.4)$$

Die maximale Wärmeenergie wird analog zu Gleichung (3.4) bestimmt, indem eine maximal zulässige Temperatur für jedes Segment definiert wird.

$$Q_{WSP, max} = \sum_{i=1}^{29} Q_{max, i} = \sum_{i=1}^{29} (\rho(T) \cdot V_i) \cdot c_p(T) \cdot (T_{max, i} - T_{RL}) \quad (3.5)$$

Die maximale Temperatur liegt für alle Segmente, außer Segment 29, bei 100°C. Für das Segment 29, das sich am Boden des Speichers befindet, ist die Temperatur auf 70 °C festgesetzt.

Um die Netzvorlauftemperatur  $T_{VL, Ist}$  möglichst genau an den vorgegebenen Sollwert  $T_{VL, Soll}$  anzupassen, wird der Speicher stetig mit Hilfe von zwei frequenzgesteuerten Pumpen be- und entladen. Der Speicher ist dafür parallel zu den Wärmeerzeugern geschaltet (Siehe Anhang A). Der Vorteil dieser Regelstrategie liegt in der Effizienzmaximierung des BHKW-Betriebs. Im Volllastbetrieb weisen die BHKWs den besten Wirkungsgrad über den kompletten Arbeitsbereich auf [24]. Durch das Zwischenspeichern im Wärmespeicher lässt sich mit dieser Strategie trotz diskreter Betriebsweise der BHKWs (Ausgeschaltet oder Volllastbetrieb etwa  $\dot{Q}_{th} = 1,6 \text{ MW}$ ) der stetige Wärmebedarf der Verbraucher ohne bleibende Regelabweichung decken.

## 3.2 Messdaten

Das Fraunhofer ISE hat im Rahmen des Forschungsprojekts Weingarten 2020 umfangreiche thermodynamische, hydraulische und elektrische Messdaten erhoben, um das komplette Nahwärmesystem Freiburg Weingarten detailliert bilanzieren zu können. Neben Messdaten vom Heizkraftwerk, den einzelnen Erzeugungsanlagen und Netzeinspeisepunkten, sind auch Messdaten von den einzelnen Verbrauchern (Gebäuden) im Netz erhoben worden. Die Gebäudemessdaten beschränken sich jedoch lediglich auf den Verteilstrang Weingarten Süd (siehe Abbildung 3-5), da eine messtechnische Erfassung und Auswertung aller Gebäude des Nahwärmesystems zu umfangreich gewesen wäre. Ziel dieses Abschnitts ist einen Überblick über die vorhandenen Messdaten zu verschaffen, die Aufbereitung der Messdaten für die Simulation zu beschreiben und die Optimierungspotenziale anhand der Messdatenauswertung zu erläutern. Zudem werden Referenzwerte des Ist-Zustands gebildet, die später mit der optimierten Betriebsweise aus dem Simulationsergebnis verglichen werden.

### 3.2.1 Übersicht der Messdaten

Die Messdaten lassen sich nach ihrer Herkunft in die zwei Kategorien „Gebäudemessdaten“ und „HKW-Messdaten“ unterteilen. Die HKW-Messdaten werden von dem HKW-Betreiber „Badenova Wärme Plus“ aufgezeichnet und monatlich an das ISE übermittelt. Die Gebäudemessdaten werden durch Wärmemengenzähler in den Gebäuden erfasst und einmal am Tag automatisiert über das mobile Funknetz LTE an das ISE übertragen. Die Rohdaten der einzelnen Messstellen werden dann als Backup gesichert und anschließend zeitsynchronisiert<sup>5</sup> in zwei HDF5<sup>6</sup>-Datenbanken abgespeichert. Die HDF5-Datenbank für die Gebäude [25] und die HDF5-Datenbank für das HKW [26] sind für Projektteilhaber des Projekts Weingarten 2020 lesbar und exportierbar, jedoch nicht editierbar. Die Messdaten aus den HDF5-Datenbanken sind auch die Grundlage für diese Arbeit. In Tabelle 3-4 sind die wichtigsten Informationen zu den Datenbanken gegenübergestellt.

---

<sup>5</sup> Da die Messdaten mit verschiedenen Messsystemen gemessen werden, sind Zeitschritte und Zeitpunkte zu denen Messwerte aufgezeichnet werden unterschiedlich. Damit die Messwerte später vergleichbar wird in der Datenbank ein homogenes Zeitsystem verwendet an das die Rohdaten angepasst werden.

<sup>6</sup> HDF5 ist ein Datenformat zum effizienten Speichern und Auslesen großer Datenmengen. Durch komplexe Algorithmen kann der Speicherplatzbedarf gegenüber herkömmlicher Formate wie CSV-Dateien deutlich reduziert werden.

Tabelle 3-4 - Information zu Gebäude- und HKW-Messdaten

HDF5-Datenbank	Gebäude Strang Süd	HKW
Messzeitraum	08.06.2016 - jetzt	04.01.2014 – jetzt
Messwerte Auflösung	5 – minütig Stündlich	30 – sekundlich 5 – minütig Stündlich
Messgrößen	Kumulierte Energie Kumuliertes Volumen <sup>7</sup> Leistung Volumenstrom Temperatur	Kumulierte Energie Kumuliertes Volumen Leistung Volumenstrom Temperatur Druck Regelsignale
Anzahl der Messpunkte	238	170

Die Orte und die Anzahl der Wärmemengenzähler für Gebäudemessungen sind durch die Dreiecke und Kreise in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Dreiecke kennzeichnen Primärwärmemengenzähler (Netzseite der WÜST) und die Kreise Sekundärwärmemengenzähler (Kundenseite der WÜST). Für die Messdatenauswertung und die Simulation werden lediglich die Primärzähler betrachtet, da diese thermo-hydraulisch ins Verteilnetz eingebunden sind und somit Daten zum Netzverhalten, wie Massenstromverteilung und Temperaturniveau, liefern. Die Sekundärzähler sind durch indirekte WÜST hydraulisch entkoppelt und geben somit keinen Aufschluss über Netzparameter. Bei acht Messstellen erfolgt die Aufteilung zwischen TWE und Heizung erst Sekundärseitig, daher wird Primärseitig lediglich der Gesamtbedarf erfasst (Graue Dreiecke). Für vier Messstellen ist die Heizung und TWE schon Primärseitig aufgeteilt und wird daher getrennt gemessen (rote und blaue Dreiecke). In Tabelle 3-5 sind den Messstellenbezeichnungen aus der HDF5-Datenbank die einzelnen Gebäude zugeordnet.

---

<sup>7</sup> Das kumulierte Volumen  $V_K$  gibt das Volumen an, das von einem Startzeitpunkt  $t_1$  bis zu einem Endzeitpunkt  $t_2$  durch einen Durchflussmessgerät geströmt ist.  $V_K = \int_{t_1}^{t_2} \dot{V}(t) dt$

Tabelle 3-5: Zuordnung der Gebäude zu den Wärmemengenzählern (Messstellen)

Messstellenbezeichnung	Primärzählerart	Angeschlossene Gebäude
BIGR09	Gesamt	Wohngebäude Binzengrün 9
BUGG02	Gesamt	Wohngebäude Bugginger Str. 2
BUGG07.H	Heizung	Wohngebäude Bugginger Str. 1-7
BUGG07.W	TWE	Wohngebäude Binzengrün 11-15
BUGG38	Gesamt	Evangelische Fachhochschule (Inklusive Neubau) Bugginger Str. 38
BUGG42	Gesamt	Gemeindezentrum Bugginger Str. 42
BUGG44	Gesamt	Wohngebäude & Sozialstation Bugginger Str. 44
BUGG46.H	Heizung	Wohngebäude Bugginger Str. 46
BUGG46.W	TWE	
BUGG48	Gesamt	Artzpraxis Bugginger Str. 48
BUGG50	Gesamt	Wohngebäude Bugginger Str. 50
BUGG52	Gesamt	Supermarkt Bugginger Str. 52
BUGG54.H	Heizung	Wohngebäude & Gewerbe Bugginger Str. 54
BUGG54.W	TWE	
BUGG87	Gesamt	Wohngebäude & Büro Bugginger Straße 87
HUGL = (Reststrang)	Gesamt	Wohngebäude Hügelheimer Weg 2-6 Wohngebäude Hügelheimer Weg 3-5 Wohngebäude Hügelheimer Weg 8-14 Kindertagesstätte Binzengrün 9
SUBU.H	Heizung	Wohngebäude Sulzburger Str. 7-13
SUBU.W	TWE	Wohngebäude Sulzburger Str. 15-19 Wohngebäude Sulzburger Str. 21-25

### 3.2.2 Aufbereitung der Messdaten für die Simulation

Eine Auswertung aller Messstellen über den kompletten Aufzeichnungszeitraum würde eine zu große Datenmenge erzeugen, aus der lange Rechenzeiten resultieren. Die Simulation beschränkt sich daher auf die Messdaten in stündlicher Auflösung für den Zeitraum von 01.07.2016 00:00:00 – 01.07.2017 00:00:00 (ein Jahr). Um die Gebäude thermodynamisch zu bilanzieren, sind folgende Werte notwendig:

- Wärmeleistung  $\dot{Q}(t)$
- Massenstrom  $\dot{m}(t)$
- Vorlauftemperatur  $T_{VL}(t)$
- Rücklauftemperatur  $T_{RL}(t)$

Aus den vier Werten, den 8760 Std eines Jahres und 18 Messstellen aus Tabelle 3-5 ergibt sich eine Matrix mit 630.720 Werten.

Zur Errechnung der Werte werden aus der HDF5-Gebäudedatenbank die Messwerte nach Tabelle 3-6 entnommen.

Tabelle 3-6 - Verwendet Messgrößen zur Gebäudebilanzierung

Messgröße	Einheit	Messpunktbezeichnung in HDF5-Datenbank
Kumulierte Energie	[kWh]	XXXXXX <sup>8</sup> _WBD_ESUP.H__MTR.H_HW__MEA_E.H
Kumuliertes Volumen	[m <sup>3</sup> ]	XXXXXX_WBD_ESUP.H__MTR.H_HW__MEA_VOL
Vorlauftemperatur	[°C]	XXXXXX_WBD_ESUP.H__MTR.H_HW__SUP_MEA_T
Rücklauftemperatur	[°C]	XXXXXX_WBD_ESUP.H__MTR.H_HW__RET_MEA_T

Die Wärmeleistung  $\dot{Q}(t)$  und der Volumenstrom  $\dot{V}(t)$  werden nicht direkt als Messwert aus der Datenbank entnommen, sondern aus der kumulierten Energie bzw. kumulierten Volumen errechnet. Der Grund für diese Vorgehensweise ist in Abbildung 3-7 ersichtlich.

---

<sup>8</sup> Das X werden die Messstellenbezeichnung aus Tabelle 3-5 eingefügt

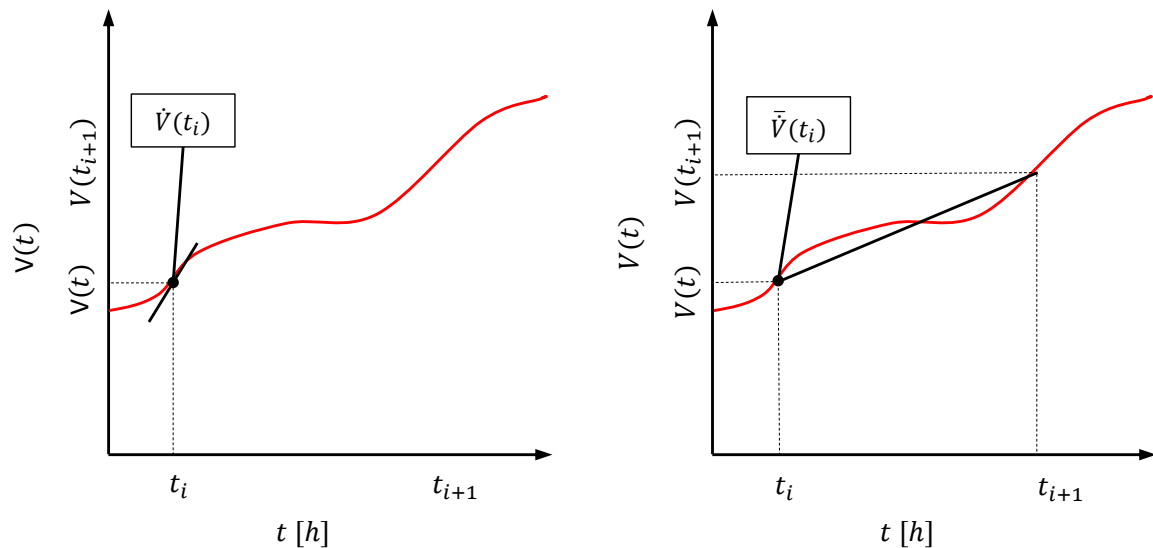


Abbildung 3-7: Unterschied zwischen dem momentanen Wert des gemessenen Volumenstroms (links) und des errechneten Volumenstroms aus den kumulierten Volumen (rechts).

Der Volumenstrom ist die Regelgröße der WÜST und ist auf Grund variierender Leistungsanforderung der KA stetigen Schwankungen innerhalb des betrachteten Zeitraums von einer Stunde unterlegen. Wird nun als stündlich konstanter Inputwert für die Simulation jeweils der momentane Volumenstrom zu Beginn einer Stunde verwendet, tritt bei zeitlicher Schwankung des realen Volumenstroms im betrachteten Zeitraum eine große Diskrepanz zwischen Realität und Simulation auf. Um dies zu verhindern, wird anhand des kumulierten Volumens ein mittlerer stündlich konstanter Volumenstrom errechnet. Dazu wird der Volumenstrom  $\dot{V}$ , der nach Gleichung (3.6) der partiellen Ableitung des Volumens nach der Zeit entspricht, stündlich diskretisiert.

$$\dot{V}(t) = \frac{\partial V(t)}{\partial t} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Nach der Diskretisierung wird der mittlere Volumenstrom  $\bar{V}(t_i)$  zum Zeitpunkt  $t_i$  berechnet.

$$\bar{V}(t_i) = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V(t_{i+1}) - V(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.7)$$

Analog dazu wird die Leistung  $\dot{Q}(t_i)$  aus der kumulierten Energie nach Gleichung (3.8) berechnet. Eine Berechnung des Wärmestroms anhand des mittleren Volumenstroms  $\bar{Q}(t_i)$ , der stündlichen Vorlauftemperatur  $T_{VL}(t_i)$  und der stündlichen Rücklauftemperatur  $T_{RL}(t_i)$  nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik würde ebenfalls zu Abweichungen führen, da auch die Temperaturen innerhalb einer Stunde schwanken.

$$\bar{Q}(t_i) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q(t_{i+1}) - Q(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.8)$$

Auf Grund der Temperaturschwankung innerhalb des stündlichen Zeitraums werden auch die Temperaturwerte  $T(t_i)$  für die Simulation gemittelt. Die Mittelung erfolgt anhand der 5-minütigen Messwerten aus der Datenbank nach Gleichung (3.9) durch den arithmetischen Mittelwert.

$$T(t_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n T_j(t) \quad (3.9)$$

Bei der Auswertung der Gebäudedatenbank wurden temporäre Datenlücken einzelner Messstellen im Betrachtungszeitraum festgestellt. Um eine Übersicht zu erhalten, ist die Vollständigkeit der Daten mit Hilfe eines MATLAB-Skripts (Anhang D) grafisch dargestellt worden. In Abbildung 3-8 sind die Datenlücken für die Vorlauftemperaturen aller Messstellen dargestellt. Die kleinsten roten Striche markieren eine Datenlücke von 24 Stunden. An der linken Ordinate sind die einzelnen Messstellenbezeichnung nach Tabelle 3-5 aufgeführt. An der rechten Ordinate ist die prozentuale Vollständigkeit der Daten für die einzelnen Messstellen aufgeführt. Auf der Abszisse ist der Messzeitraum vom 01.07.2016 – 01.07.2017 aufgetragen. Die gleichen Diagramme sind auch für die Rücklauftemperatur (Anhang B), den Volumenstrom (Abbildung 3-9) und den Wärmestrom (Anhang C) erstellt worden.

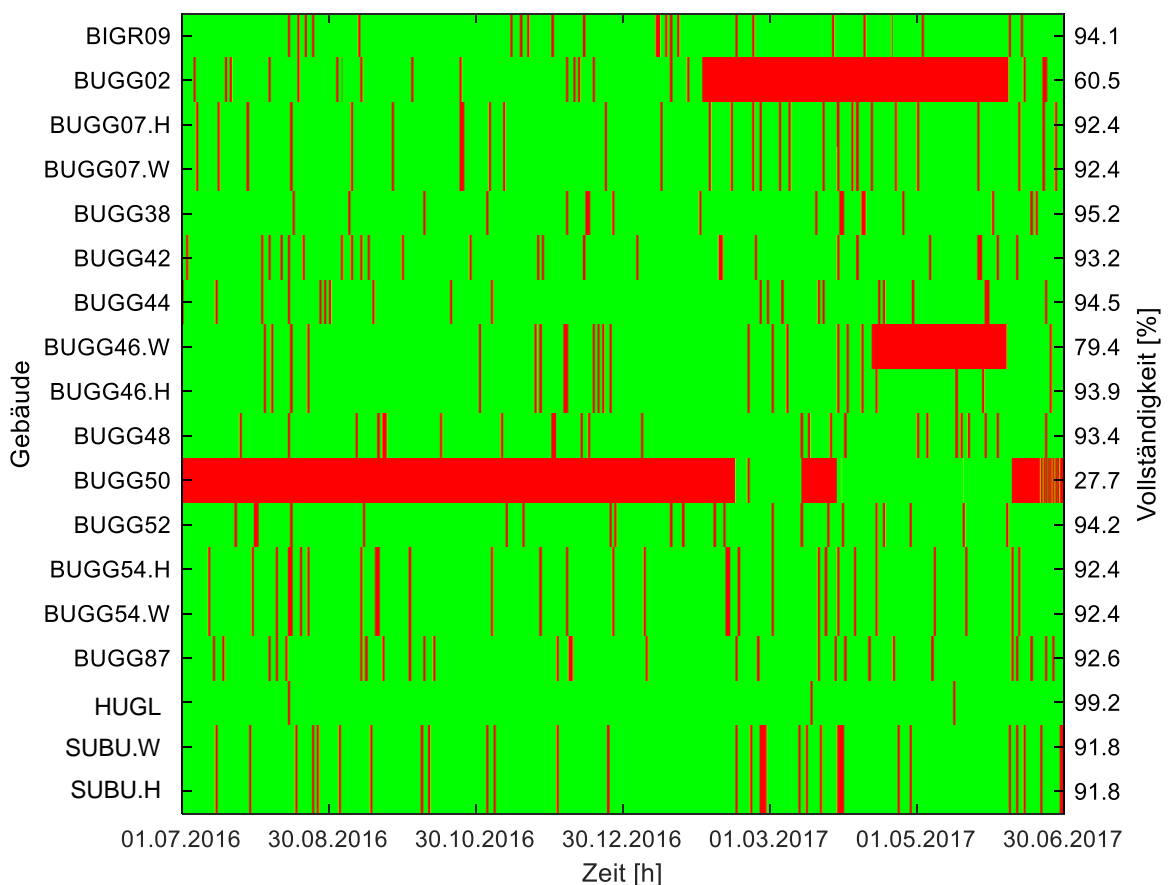


Abbildung 3-8 - Optische Qualitätskontrolle der Gebäudemessdaten. Messwerte der stündlich gemittelten Vorlauftemperatur der Gebäude im Verteilnetzstrang WG Süd vom 01.07.2016 – 1.7.2017 (1 Jahr)/ Messwert vorhanden = grün/ Messwert nicht vorhanden = rot

Für die meisten Gebäude aus Abbildung 3-8 liegt die Datenvollständigkeit über 90 %. Lediglich die Gebäude BUGG02, BUGG46.W, BUGG50 weisen große Datenlücken auf. Die große Datenlücke der Messstelle BUGG50 vom 01.07.2016 – 15.02.2017 entstand durch eine Änderung des Messsystems. Die Daten standen daher auch nicht in der Datenbank zur Verfügung, sondern mussten mit Hilfe eines MATLAB-Skripts (Anhang E) aus den Rohdaten ausgewertet werden. Die großen Datenlücken der Messstellen BUGG46.W (13.04.2017 - 08.06.2017) und BUGG02 (02.02.2017 – 09.06.2017) sind durch einen Fehler im Datenübertragungssystem zu erklären. Nach einer Konfiguration des Messsystems konnten die Daten wieder übertragen werden, mussten jedoch ebenfalls aus den Rohdaten mit Hilfe eines MATLAB-Skripts (Anhang F) aufbereitet werden.

Beim Vergleich der Abbildung 3-8 mit Abbildung 3-9 wird deutlich, dass die Datenlücken der Volumenstrommessung und der Vorlauftemperaturmessung zum selben Zeitpunkt auftreten. Gleiches lässt sich auch bei der Rücklauftemperaturmessung und Wärmeleistungsmessung feststellen. Daraus lässt sich schließen, dass die Datenlücken aus einer fehlerhaften Datenübertragung resultieren und sich nicht auf den Ausfall einzelner Messmittel des Messsystems zurückführen lassen. Lediglich die Messstelle *HUGL* bildet eine Ausnahme. Der Volumenstrom war über den kompletten Betrachtungszeitraum null, obwohl eine Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf vorlag. Die Temperaturdifferenz lässt darauf schließen, dass ein Wärmestrom übertragen wurde und somit auch ein Massenstrom vorhanden war. Dies lässt den Schluss zu, dass das Durchflussmessgerät defekt ist und einen fehlerhaften Volumenstrom ausgibt. Da der Volumenstrom am Netzeinspeisepunkt Weingarten Süd bekannt ist, ergibt sich der Volumenstrom an der Messstelle *HUGL* aus dem Gesetz der Massenkonservierung nach Gleichung (3.10).

$$\dot{m}_{WG,SÜD} = \sum_{i=1}^{n=18} \dot{m}_{Messstelle,i} \quad (3.10)$$

Mit: 
$$\dot{m}_i = \rho_i(T) \cdot \dot{V}_i \quad (3.11)$$

Mit dem berechneten Volumenstrom und der gemessenen Temperaturdifferenz lässt sich dann der ebenfalls fehlende Wärmestrom bestimmen.

Damit lassen sich die nicht vorhandenen Messwerte für die Messstelle *HUGL* rechnerisch bestimmen. Eine Plausibilisierung der Messdaten anhand der Massenkonservierung nach Gleichung (3.10) ist nicht mehr möglich.



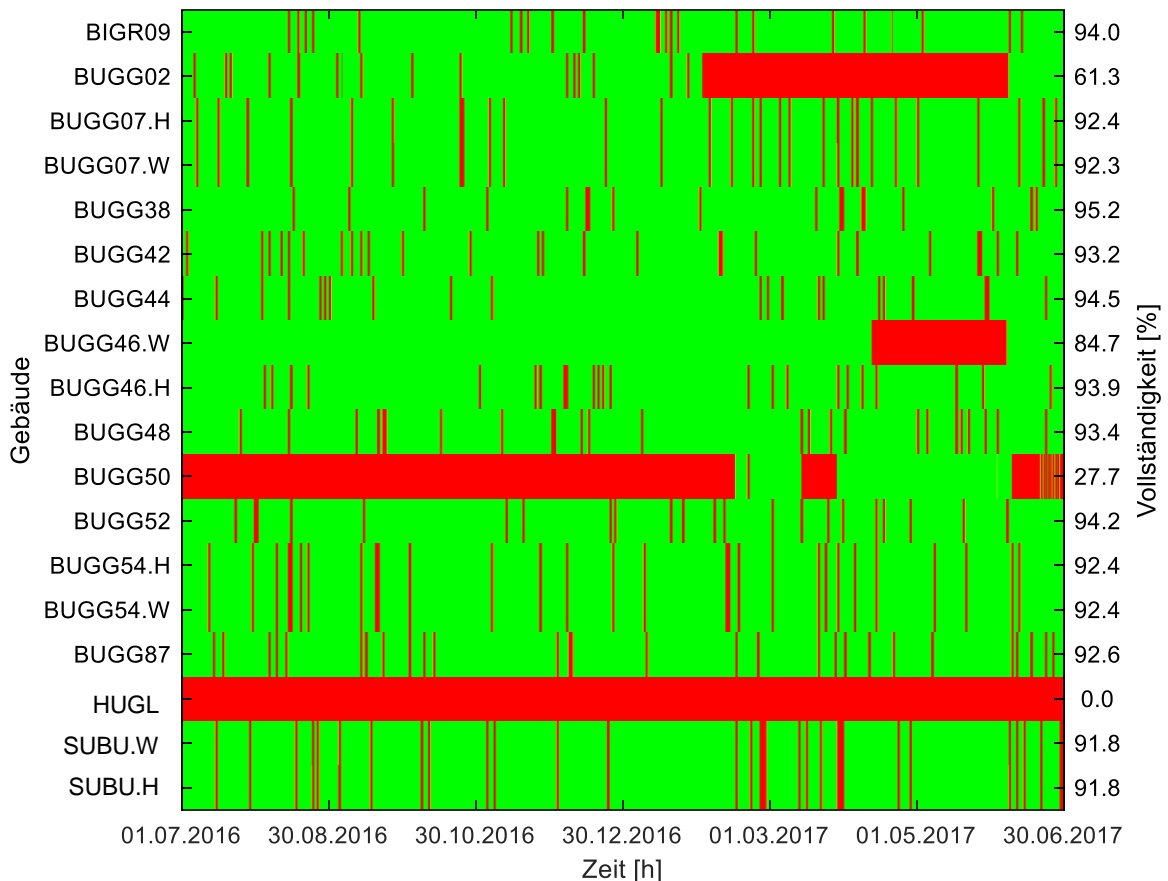


Abbildung 3-9 Optische Qualitätskontrolle der Gebäudemessdaten. Messwerte der stündlich gemittelten Volumenströme der Gebäude im Verteilnetzstrang WG Süd vom 01.07.2016 – 1.7.2017 (1 Jahr)/ Messwert vorhanden = grün/ Messwert nicht vorhanden = rot

Damit die Messdaten für die Simulation als Inputdaten verwertbar sind, müssen die Datenreihen vollständig sein. Fehlende Messwerte in den Datenreihen werden durch vorhandene Messwerte derselben Datenreihe ersetzt. Die Auswahl welche Daten zur Vervollständigung der Datenlücken verwendet werden, wird anhand verschiedener Kriterien festgelegt.

### 3.2.2.1 Bereinigung der Gebäude-Messdaten

Die Kriterien zur Vervollständigung der Wärmestromdatenreihen sind in Anlehnung an die Dissertation von Volker Recknagel [15] gewählt. In der Dissertation wurde zur Verbesserung der Leistungsprognosedaten für Wärmenetze die Haupteinflussfaktoren der Leistung durch die Messdatenauswertung von 14 Netzsträngen des Berliner Fernwärmesystems über ein Betrachtungszeitraum von 5 Jahren statistisch ermittelt. Demnach haben die mittlere Tagestemperatur, die Tageszeit und der Tagestyp einen signifikanten Einfluss auf die Leistung.

- Die **mittlere Tagestemperatur** berechnet sich aus dem arithmetischen Mittelwert der Außentemperatur  $T_{AUL}$  im Betrachtungszeitraum von einem Tag (0.00-24.00h). Die mittlere Tagestemperatur hat vor allem einen großen Einfluss auf den Leistungsbedarf der Heizungssysteme der KA. Bei geringen mittleren Tagestemperaturen steigt die Leistung

erheblich an. Ab einer Außentemperatur unter 15 °C wird im Durchschnitt Wärme für Heizungssysteme benötigt.

- Die **Tageszeit** wurde in der Dissertation wie in dieser Arbeit in stündlicher Auflösung untersucht. Ähnlich wie beim Stromlastgang entstehen auch beim Wärmelastgang zwei Tagesspitzen am Morgen von 7-8 Uhr und am späten Nachmittag bedingt durch das Nutzerverhalten. Dafür verantwortlich ist vor allem die zyklische TWE, aber auch die Heizungssysteme weisen morgens einen hohen Leistungsbedarf auf, da viele Heizungen eine Nachtabsenkung besitzen.
- Die **Tagestypen** beschreiben die unterschiedlichen stündlichen Lastgänge an verschiedenen Wochentagen. An Arbeitstagen von Montag bis Freitag sind die Lastgänge fast identisch. An Samstag und Sonntag sind die Lastgänge verschoben.

Zur Ermittlung der Leistungsdatenlücken wurde das MATLAB-Skript (Anhang G) verwendet. Mit dem Skript werden die Daten zu erst in 365 Tages-Blöcke eingeteilt. Für jeden Block wird dann die Tagesmitteltemperatur  $\bar{T}_{AUL}$  nach Gleichung (3.12) berechnet.

$$\bar{T}_{AUL} = \sum_{i=1}^{n=24} T_{AUL,i} \quad (3.12)$$

Die stündlichen Außentemperaturen  $T_{AUL,i}$  zur Berechnung der Tagesmitteltemperatur sind als Messwerte aus der HKW-Datenbank<sup>9</sup> bekannt. Für einen Block mit Datenlücken wird dann ein vollständiger Block gesucht, dessen Tagesmitteltemperatur die geringste Abweichung aufweist. Nicht vorhandene Werte werden kopiert. Die Abhängigkeit zwischen Leistung und Tageszeit wird dabei berücksichtigt, indem nur Werte derselben Uhrzeit kopiert werden. Eine Differenzierung der Tagestypen zwischen Wochentagen und Wochenende wird nicht vorgenommen, da für Wochenendtage nur noch 104 der 365 Datenblöcke zum Ersetzen von Datenlücken zur Verfügung stehen und die Abweichung der Tagesmitteltemperaturen damit steigen würden. Nach der Dissertation von Volker Recknagel [15] ist der Einfluss des Tagestyps geringer als der Einfluss der Tageszeit oder der mittlerer Tagestemperatur.

Der fortlaufende Zählerstand der Wärmemengenzähler erlaubt es, die kumulierte Energie über den Zeitraum der Datenlücken festzustellen. Dazu wird die Differenz  $\Delta Q_{n-0}$  aus dem ersten Wert nach  $Q_k(t_n)$  und den letzten Wert vor der Datenlücke  $Q_k(t_0)$  gebildet.

$$\Delta Q_{n-0} = Q_k(t_n) - Q_k(t_0) \quad (3.13)$$

Werden die ersetzten Werte aus der Datenlücke summiert und vergleicht diese mit dem Differenzwert aus dem Wärmemengenzählerstand ergibt sich eine Abweichung. Damit die

---

<sup>9</sup> Die Temperatur wird auf dem Gelände des HKWs gemessen. Die Datenvollständigkeit der Messreihe liegt über den Betrachtungszeit bei 98,1 % (siehe Anhang H). Nicht vorhandenen Daten wurden durch Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) [21] ersetzt. Die Messstation des DWD befindet sich in Entfernung von 460m zum HKW (Anhang I).

tatsächlich abgegebene Energie innerhalb der Datenlücke sich nicht ändert, werden die Werte in der Datenlücke normiert, um die zeitliche Verteilung der Energie  $\Delta Q(t_i)$  über die Zeitlücke zu erfassen. Anschließend werden die normierten Werte mit der tatsächlich ermittelten Energie  $\Delta Q_{n-0}$  aus der Zählerstanddifferenz addiert.

$$\Delta Q(t_i) = \left( \frac{\Delta Q(t_i)}{\sum_{i=1}^n \Delta Q(t_i)} \right)_{nom} \cdot \Delta Q_{n-0} \quad (3.14)$$

Somit wird durch die kopierten Werte nur eine Annahme über den Lastgang (zeitliche Verteilung) der Wärme getroffen. Die insgesamt abgegebene Wärme über die Datenlücke entspricht einem realen Messwert.

Die Aufbereitung der Volumenstrommessreihen erfolgt analog zu dem Rechenverfahren der Wärmemessreihen. Dies ist möglich, da die Wärmemengenzähler neben der kumulierten Wärme auch das kumulierte Volumen- resultierend aus dem Durchfluss- als Messwert zur Verfügung stellen (siehe Tabelle 3-4). Auch die Abhängigkeit von Tageszeit und der mittleren Tagestemperatur ist bei dem Volumenstrom indirekt durch die Regelung der WÜST gegeben (siehe Kapitel 2.1.2). Die WÜST regelt mit einem primärseitigen Stellventil den Durchfluss, um die geforderte Leistung der KA bereitzustellen. Damit ist der Volumenstrom in erster Näherung allein eine Funktion des Wärmestroms, da die Vorlauftemperatur vom Netz vorgegeben wird und die Rücklauftemperatur nach den technischen Anschlussbedingungen des Wärmenetzbetreibers ebenfalls vorgeben ist.

Die Vorlauftemperatur am Netzeinspeisepunkt ist nach der Regelbeschreibung des HKWs [23] im automatischen Betrieb ausschließlich von der Außentemperatur abhängig. Der mathematische Zusammenhang zwischen beiden Parametern ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Da alle Gebäude im Netz parallel an die Hauptleitung angeschlossen sind, sind folglich auch die Vorlauftemperaturen an den Gebäuden von dieser Regelung abhängig. Weiteren Einfluss auf die Gebäudevorlauftemperaturen haben die Wärmeverluste in den Rohrleitungen, die von der Bodentemperatur abhängig sind. Da die Bodentemperatur und die Lufttemperatur jedoch auch voneinander abhängen, ist bei der Bereinigung der Datenlücken lediglich die Außenlufttemperatur berücksichtigt. Anders als bei der Energie-Datenbereinigung wird bei der Vorlauftemperatur-Datenbereinigung nicht die Tagesmitteltemperatur, sondern die stündliche Mitteltemperatur verwendet, da der Vorlauftemperatursollwert im HKW alle 15 min angepasst wird [23]. Mit Hilfe des MATLAB-Skripts zur Datenbereinigung der Vorlauftemperatur (Anhang J) wird dazu die stündliche Vorlauftemperatur mit der stündlichen Außentemperatur verknüpft. In eine Datenlücke wird dann der vorhandene Messwert kopiert, der die geringste Abweichung beim Vergleich der Außentemperatur aufweist.

Nachdem die Datenlücken in den Messreihen der Leistung, des Volumenstroms und der Vorlauftemperatur bereinigt sind, können die Datenlücken in den Messreihen der Rücklauftemperatur mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik nach Gleichung (3.15), berechnet werden.

$$T_{RL} = T_{VL} - \frac{\dot{Q}}{\dot{V} \cdot \rho(T_{RL}) \cdot c_p(T_m)} \quad (3.15)$$

Mit:

$$T_m = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} \quad (3.16)$$

Das Trägermedium Wasser liegt im ganzen Nahwärmesystem im flüssigen Aggregatzustand vor und kann bei Berechnungen somit näherungsweise als inkompressibles Fluid betrachtet werden. Damit sind die Dichte  $\rho$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  nur von der Temperatur abhängig. Der Einfluss des Druckes entfällt. Die Dichte wird in Abhängigkeit der Rücklaufauftemperatur  $T_{RL}$  berechnet, da die Volumenströme mit Durchflussmessgeräten gemessen werden, die gemäß der Montageanweisung im Rücklauf der WÜST montiert sind [27]. Die spezifische Wärmekapazität wird in Abhängigkeit der vereinfachten thermodynamischen Mitteltemperatur nach Gleichung (3.16) bestimmt. Die Berechnung erfolgt nach dem MATLAB-Skript im Anhang K. Die Stoffwerte werden mit dem Open-Source MATLAB-Skript XSteam [C] berechnet.

### 3.2.2.2 Bereinigung der HKW- und DWD-Messreihen

Die Vollständigkeit der HKW-Messreihen und der DWD-Messreihen (Abbildung 3-10) ist im Vergleich mit den Gebäude-Messreihen (Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9) deutlich höher. Die Positionen der einzelnen Messstellen sind in dem Verfahrensfliessbild (Anhang A) durch orange Pfeile gekennzeichnet.

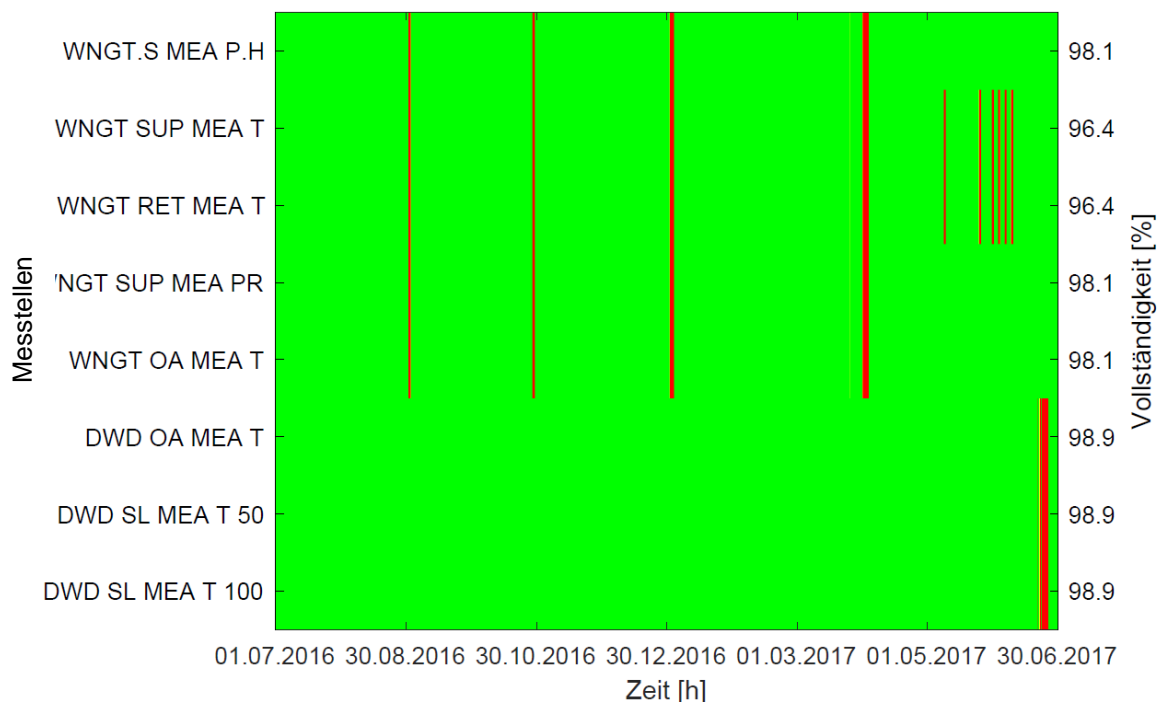


Abbildung 3-10: Optische Qualitätskontrolle der HKW und DWD-Messdaten. Aufschlüsselung der Messstellenbezeichnungen (Linken Ordinate): WNGT = Daten vom HKW Freiburg Weingarten; DWD = Daten des Deutschen Wetterdienst; MEA = Messwerte; SUP = Vorlauf; RET = Rücklauf; SL = Erdboden; P.H = Thermische Leistung; T = Temperatur; PR = Druck; 50 = Erdreichtiefe 50 cm; 100 = Erdreichtiefe 100 cm

Zur thermodynamischen Bilanzierung des Netzeinspeisepunktes Weingarten Süd werden folgende Werte benötigt:

- Wärmestrom  $\dot{Q}$
- Volumenstrom  $\dot{V}$
- Vorlauftemperatur  $T_{VL}$
- Rücklauftemperatur  $T_{RL}$

Der Wärmestrom liegt direkt als Messwert der Messstelle *WNGT.S\_MEA\_P.H* in stündlicher gemittelter Auslösung vor und kann direkt aus der HKW-Datenbank übernommen werden. Die Datenlücken in der Messreihe werden nach demselben Schema wie die Leistungsmessreihen der Gebäude aufbereitet.

Der Volumenstrom, die Vorlauf- und die Rücklauftemperatur, aus denen sich der Wärmestrom für den Netzeinspeisepunkt ergibt, sind nicht als Messwerte verfügbar. Als Vorlauftemperatur für den Einspeisepunkt WG Süd wird daher der Messwert der Gesamtvorlauftemperatur vor der Aufteilung der einzelnen Stränge verwendet. Aufgrund der geringen Rohrlängen und Wärmeisolierung der Rohrleitung in dem HKW kann die Temperaturänderung zwischen der Gesamtvorlauftemperatur und der Vorlauftemperatur WG Süd vernachlässigt werden. Die Datenlücken in der Messreihe werden demselben Algorithmus, der auch bei der Vorlauftemperatur der Gebäude verwendet wird, bereinigt.

Beim Rücklauf lässt sich nicht von der Gesamtrücklauftemperatur auf die Temperatur des Verteilstangs WG Süd schließen, da sich die Gesamtrücklauftemperatur als Mischtemperatur aus allen Verteilstrangtemperaturen ergibt. Je nach den angeschlossenen KA können die Rücklauftemperaturen der einzelnen Stränge variieren. Da der Volumenstrom der Messstelle HUGL nicht zur Verfügung steht, lässt sich der Strangvolumenstrom auch nicht aus der Summe der Gebäudevolumenströme berechnen. Die Berechnung der Rücklauftemperatur  $T_{WG.S,RL}$  und des Volumens  $\dot{V}_{WG.S}$  am Netzeinspeisepunkt WG Süd erfolgt daher iterativ.

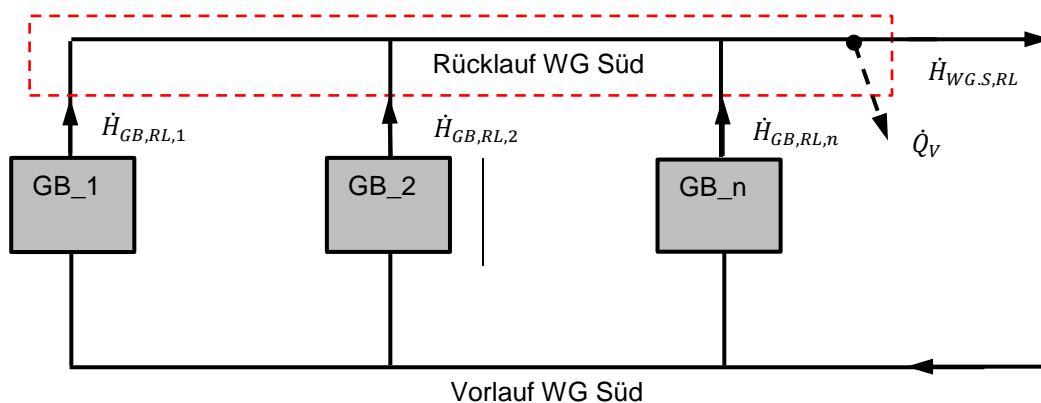


Abbildung 3-11: Thermodynamische Bilanzierung des Rücklaufs von Verteilstrang Weingarten Süd

Dazu wird der Rücklauf des Strangs WG Süd nach Abbildung 3-11 bilanziert. Die grauen Rechtecke stellen die parallel angeschlossenen Gebäude dar. Die rote Linie kennzeichnet die Bilanzgrenze um den Rücklauf des Verteilstrangs WG Süd. Als Eingangsgrößen ergeben sich die Enthalpieströme  $\dot{H}_{GB,RL,1} - \dot{H}_{GB,RL,n}$  der einzelnen Gebäude, die an unterschiedlichen Stellen in der Hauptleitung enden. Die Austrittsgrößen sind der Enthalpiestrom des Verteilstrangs WG Süd  $\dot{H}_{WG,S,RL}$  kurz vor dem Eintritt in den Hauptstrang und der Wärmeverlust  $\dot{Q}_{V,RL}$  der Rohrleitung an die Umgebung.

$$0 = \sum_{i=1}^{n=18} \dot{H}_{GB,RL,i} - \dot{H}_{WG,S,RL} - \dot{Q}_{RL,V} \quad (3.17)$$

Mit: 
$$\dot{H} = \dot{m} \cdot (h - h_0) = \dot{m} \cdot c_p(T_m) \cdot (T - T_0) \quad (3.18)$$

Werden die Wärmeverluste an die Umgebung vernachlässigt<sup>10</sup> und die spezifische Wärmekapazität auf Grund der geringen Temperaturunterschiede als konstant betrachtet, ergibt sich die Strangrücklauftemperatur  $T_{WG,S,RL}$  nach der Mischregel [30].

$$T_{WG,S,RL} = \frac{\sum_{i=1}^{n=18} (\dot{m}_i \cdot T_{RL,i})_{GB}}{\dot{m}_{WG,S}} \quad (3.19)$$

Mit: 
$$\dot{m}_{WG,S,1} = \sum_{i=1}^{n=18} \dot{m}_{GB,i} \quad (3.20)$$

Da der Massenstrom der Messstelle *HUGL* nicht bekannt ist, erfolgt die Berechnung nach einem iterativen Ansatz, der in Abbildung 3-12 dargestellt ist. Dazu wird der Massenstrom im ersten Schritt nach der Kontinuitätsgleichung (3.20) berechnet. Im zweiten Schritt wird der Massenstrom aus dem gemessenen Wärmestrom  $\dot{Q}_{WG,S}$ , der gemessenen Vorlauftemperatur  $T_{WG,VL}$  und der berechneten Mischtemperatur  $T_{WG,S,RL}$  bestimmt.

$$\dot{m}_{WG,S,2} = \frac{\dot{Q}_{WG,S}}{c_p(T_m) \cdot T_{WG,VL} - T_{WG,S,RL}} \quad (3.21)$$

Die beiden Massenströme werden dann miteinander verglichen. Liegt die Abweichung unter einem Prozent wird die Iterationsschleife abgebrochen.

---

<sup>10</sup> Der Wärmeverlust beträgt in modernen Heißwasserwärmenetzen ca. 10 - 14% des Gesamtwärmestroms [6], [28], [29]. Dabei ist der Anteil der Wärmeverluste im Vorlauf auf Grund des Temperaturniveaus höher, als im Rücklauf. Da die Berechnung der Wärmeverluste komplex ist und der Einfluss auf die berechnete Mischtemperatur gering ist, wird der Wärmeverlust  $\dot{Q}_{V,RL}$  vernachlässigt.

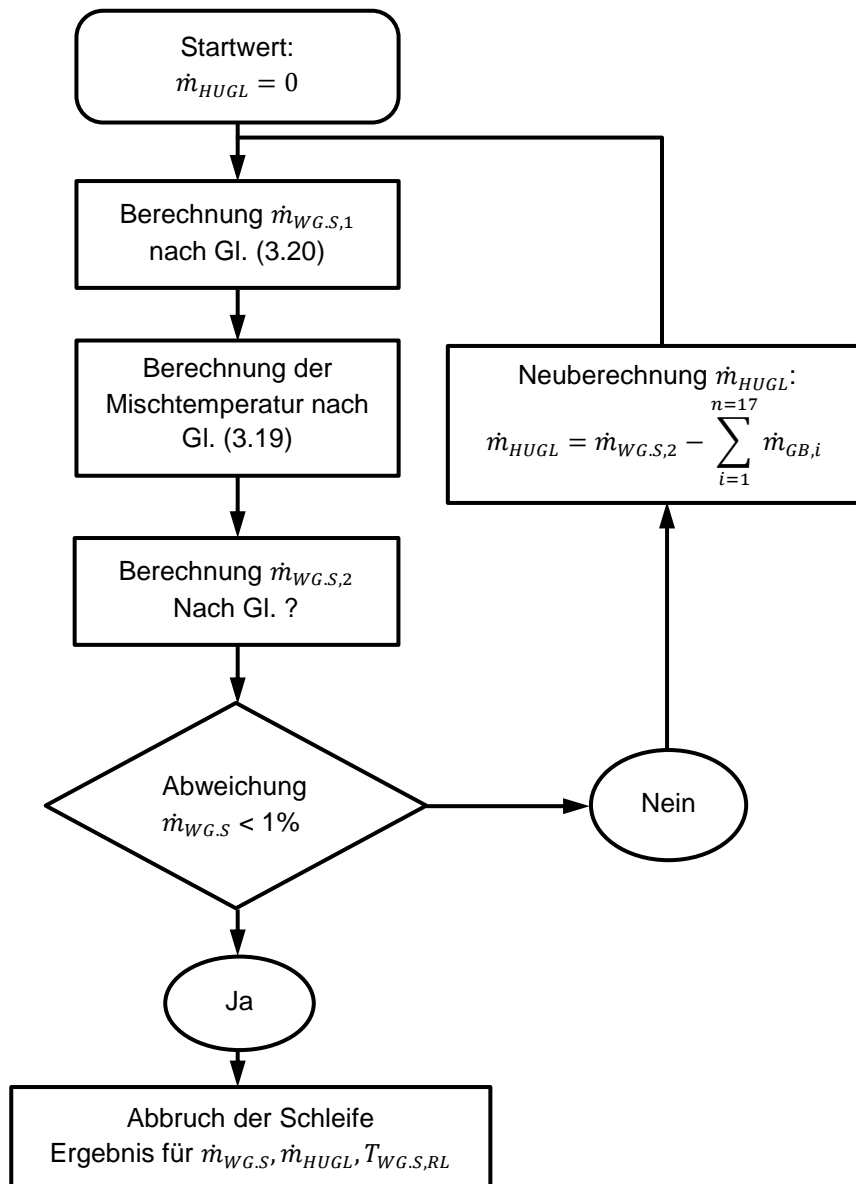


Abbildung 3-12: Iterationsverfahren zur Berechnung der WG Süd Rücklauf­temperatur und Massenstrom, sowie des Massenstroms Mess­stelle HUGL

Nach der Iteration sind Ergebnisse für den Strangmassenstrom  $\dot{m}_{WG,S}$ , die Strangrücklauf­temperatur  $T_{RL}$  und den Massenstrom der Mess­stelle HUGL  $\dot{m}_{HUGL}$  vorhanden. Damit sind die Mess­reihen vollständig und können als Input­daten für die Simulation verwendet werden.

### 3.2.3 Auswertung der Messdaten

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die erhobenen Messdaten schaffen und die Abhängigkeit zwischen verschiedenen Gebäudeklassen (Verbrauchern) und den thermodynamischen Netzparametern aufzeigen. Im ersten Schritte wird die Abhängigkeit zwischen Netztemperaturniveau und Außentemperatur aufgezeigt. In Abbildung 3-13 sind dazu die Vor- und Rücklauf temperaturmesswerte des Netzeinspeisepunkts WG Süd über ein Jahr, sortiert nach der Außentemperatur dargestellt. Die schwarze Kennlinie stellt den Vorlauf temperatursollwert in Abhängigkeit der Außentemperatur dar. Bei Außentemperaturen zwischen  $-5^{\circ}\text{C}$  und  $15^{\circ}\text{C}$  sind die Abweichungen zwischen Sollwert und Medianwert der Vorlauf temperatur gering. Bei Außentemperaturen über  $15^{\circ}\text{C}$  wurde die Vorlauf temperatur öfter auf ca.  $75^{\circ}\text{C}$  herabgesetzt. Vermutliche wurde der Temperatursollwert im HKW manuell geändert.

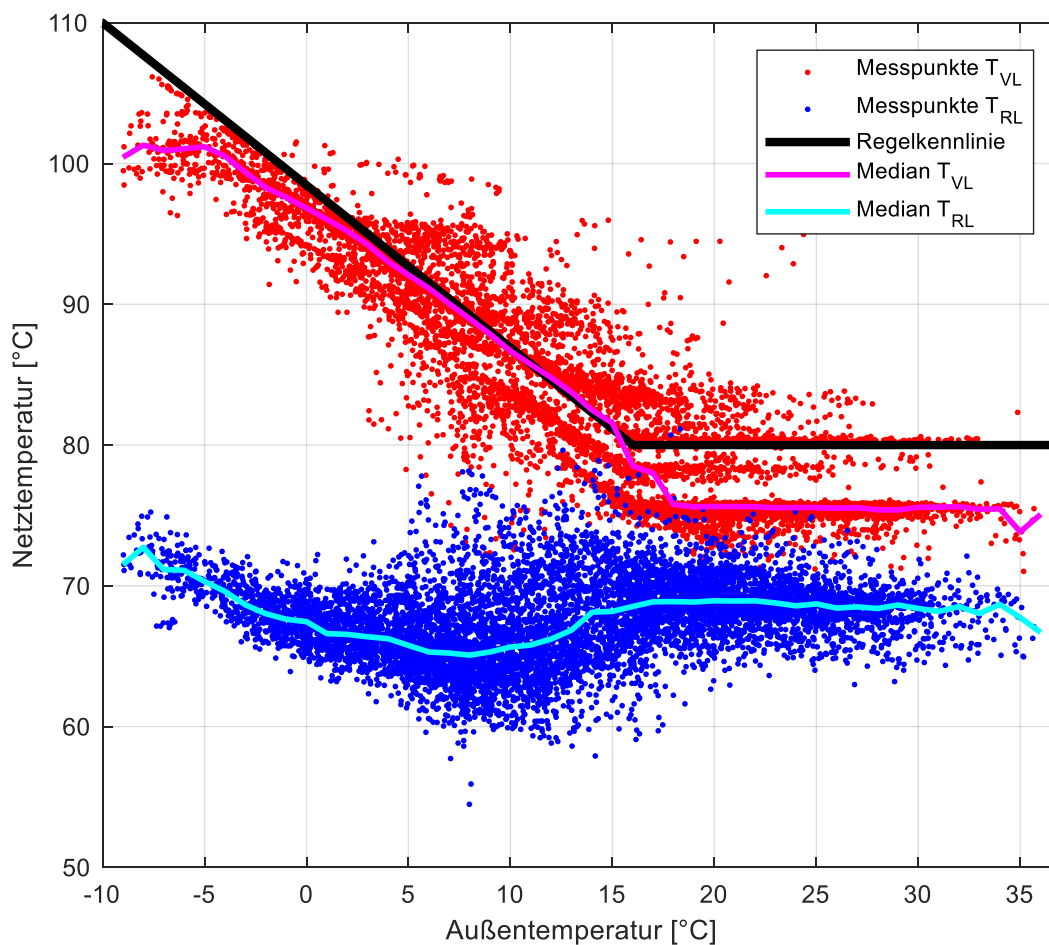


Abbildung 3-13: Netztemperatur-Außentemperatur-Diagramm. Das Diagramm stellt die Vor- und Rücklauf temperaturen am Netzeinspeisepunkt WG Süd für den Betrachtungszeitraum vom 01.07.2016 - 01.07.2017 sortiert nach der Außentemperatur dar. Die sogenannte Regelkennlinie beschreibt die Sollwertanpassung in Abhängigkeit der Außentemperatur im HKW.

Unter ca.  $14^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur nimmt der Medianwert der Rücklauf temperatur sichtbar ab. Das kennzeichnet den Beginn der Heizperiode. In dieser Phase haben die Heizungsanlagen der Verbraucher einen signifikanten Anteil am Gesamtwärmebedarf. Da die Heizungsanlagen gerade



zu Beginn der Heizperiode die Rücklauftemperatur noch stark absinken sinkt auch die Netzzücklauftemperatur ab. Unter 1°C Außentemperatur erhöht sich die Rücklauftemperatur dann wieder. Der Grund dafür liegt in der begrenzten Fläche der Heizkörper. Bei niedriger Außentemperatur muss die thermodynamische Mitteltemperatur an den Heizkörpern erhöht werden, um eine höhere Wärmeabgabe zu ermöglichen (siehe Gleichung (2.2)). Steigt die Außentemperatur über 14°C wird die Wärme an den Verbrauchern hauptsächlich genutzt um Trinkwasser zu erwärmen. Bedingt durch die Hygienevorschrift das Trinkwasser in den Trinkwasserspeichern der Verbraucher bei mindestens 60 °C vorzuhalten, ergibt sich unter Berücksichtigung der Grädigkeit der Wärmeübergabestationen eine konstante Rücklauftemperatur von ca. 68°C am Netzeinspeisepunkt.

In Abbildung 3-14 ist die prozentuale Aufteilung des Gesamtenergieverbrauchs für den ausgewerteten Betrachtungszeitraum dargestellt. Die einzelnen Gebäude sind nach ihrer Klassifizierung aus Abbildung 3-5 farblich markiert.

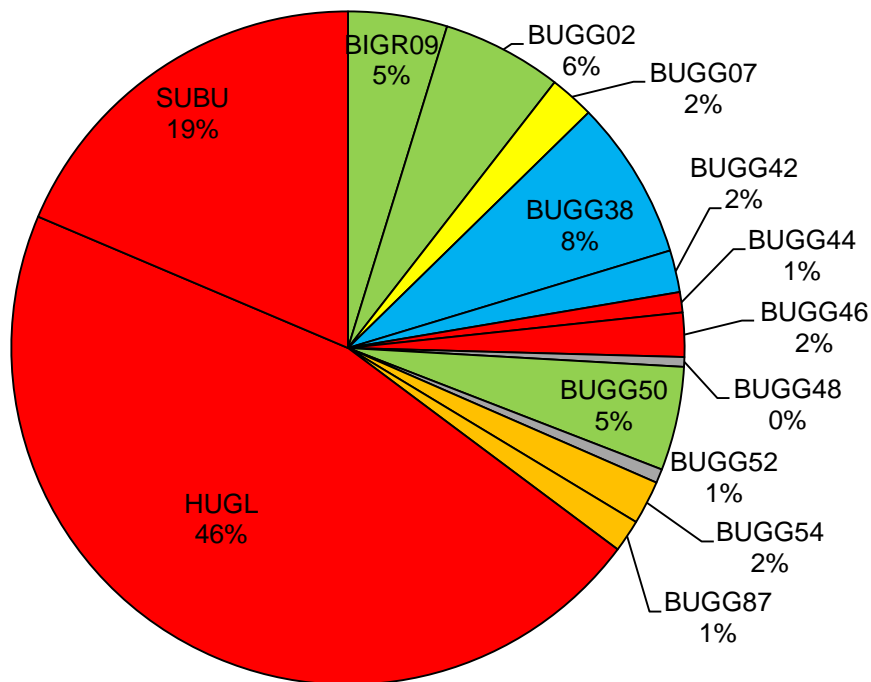


Abbildung 3-14: Tortendiagramm zum Energieverbrauch pro Jahr der Messstellen in Verteilstrang WG Süd. Die Gesamtenergie beträgt 8008,2 MWh. Die farbliche Aufteilung ist Gemäß der Gebäudeklassifizierung.

Die unsanierten Gebäude (rot) haben mit einem Anteil von 68 % den größten Energieverbrauch pro Jahr. Gefolgt von den sanierten Wohngebäuden (grün und gelb) mit einem Anteil von 18 %. Die restlichen 16 % der Energie werden von den Nichtwohngebäuden verbraucht.

In Abbildung 3-15 sind die mittleren Temperaturdifferenzen und die kumulierten Massen pro Jahr der Verbraucher dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Temperaturdifferenzen zu ermöglichen sind alle Vorlauftemperaturen in der Grafik gleichgesetzt. Die gestrichelten Linien stellen die mittleren Vor- und Rücklauftemperatur am Netzeinspeisepunkt WG Süd dar. Die

Verbraucher im Hügelsheimer Weg (*HUGL*) beeinflussen auf Grund des hohen Massenanteils die Mischtemperatur im Strangrücklauf maßgeblich. Die Rücklauftemperatur des Strangs und der Messstelle *HUGL* sind fast identisch. Beim Vergleich der Temperaturdifferenzen fällt auf, dass die sanierten Wohngebäude im Schnitt niedrigere Rücklauftemperaturen aufweisen, als die unsanierten Wohngebäude. Betrachtet man jedoch *BUGG46* und *BUGG07* ist das Ergebnis umgekehrt. Die niedrigsten Rücklauftemperaturen werden auch nicht wie vermutet von den „zukunftsweisend“ sanierten Wohngebäuden (grün), sondern von den „normal sanierten“ Gewerbegebäuden (grau) erzielt.

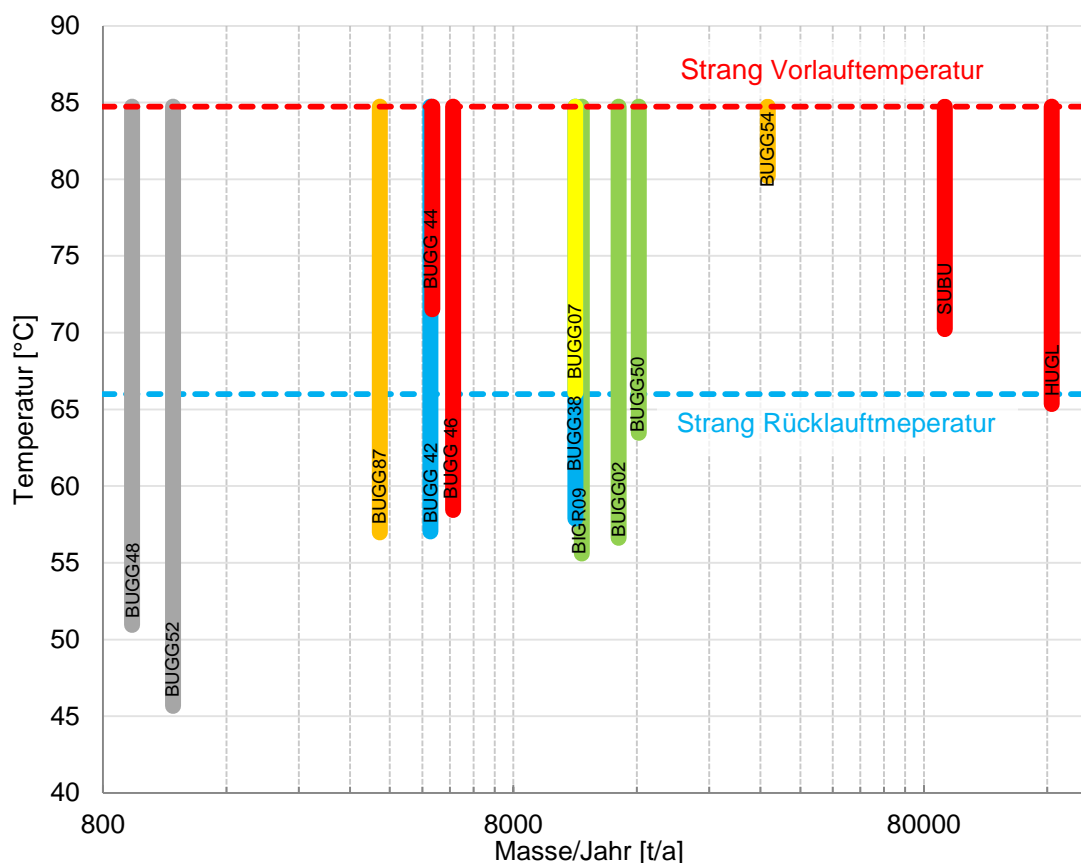


Abbildung 3-15: Temperatur-Masse-Diagramm. In rot ist die mittlere Vorlauftemperatur des Strang WG Süd aufgetragen. In blau die mittlere Rücklauftemperatur. Die Balken stellen die mittlere Temperaturdifferenz an den Verbrauchern dar. Auf der Ordinate ist die Masse aufgetragen die pro Jahr die Verbraucher durchfließt. Die Achse ist zur besseren Darstellung logarithmisch eingeteilt.

Einen Aufschluss zu den unerwarteten Gebäudeverhalten liefert die Auswertung der Messstellen *BUGG07*, *BUGG46* und *SUBU* differenziert nach TWE und Heizung. In Abbildung 3-16 sind dazu die Temperaturdifferenzen getrennt nach TWE (blaue Punkte) und Heizung (dunkelrote Punkte) dargestellt. Die Abszisse kennzeichnet den Anteil der TWE-Energie  $Q_{TWE}$  und der Heizungsenergie  $Q_{HZ}$  bezogen auf die Gesamtenergie  $Q_{Ges}$ . Bei allen Gebäuden ist der Anteil der Heizungsenergie größer als der Anteil TWE-Energie. Auch die Temperaturdifferenzen sind bei allen Heizungssystemen größer als bei den TWE-Systemen. Jedoch liegen die Energieanteile beim Gebäude *BUGG07* deutlich dichter beieinander und die Rücklauftemperatur der Heizung ist

wesentlich geringer im Vergleich zu den anderen Heizungssystemen. Der Unterschied resultiert aus der Güte der Wärmedämmung. Das sanierte Gebäude *BUGG07* hat eine hochwertigere Wärmeisolation zur Umgebung, weshalb sich der Heizenergiebedarf reduziert. Der Trinkwarmwasserverbrauch und der daraus resultierende Energiebedarf sind jedoch näherungsweise unabhängig von den Sanierungsmaßnahmen. Damit steigt bei zunehmender Wärmeisolation der relative Anteil der Energie zur TWE. Dieser Effekt konnte auch für die Gebäude *BUGG02* und *BIGR09* in der Bachelorthesis von Moritz Martin [21] durch Auswertung der Sekundärzähler bestätigt werden. Der höhere relative Energieanteil der TWE mit geringer Temperaturdifferenz hat damit einen größeren Anteil an der Mischtemperatur des Gesamtrücklaufs. Die niedrige Rücklauftemperatur moderner Heizungsanlagen in sanierten Gebäuden wird somit ein Stück weit wieder kompensiert. Bei der Auswertung der Lastprofile für die beiden Gewerbegebäude, konnte bei Außentemperaturen über 15°C bei *BUGG52* kein Bedarf bzw. bei *BUGG48* nur ein sehr geringer Wärmebedarf festgestellt werden. Der Trinkwarmwasserbedarf scheint dementsprechend sehr niedrig zu sein. Damit lassen sich die niedrigen mittleren Rücklauftemperaturen erklären.

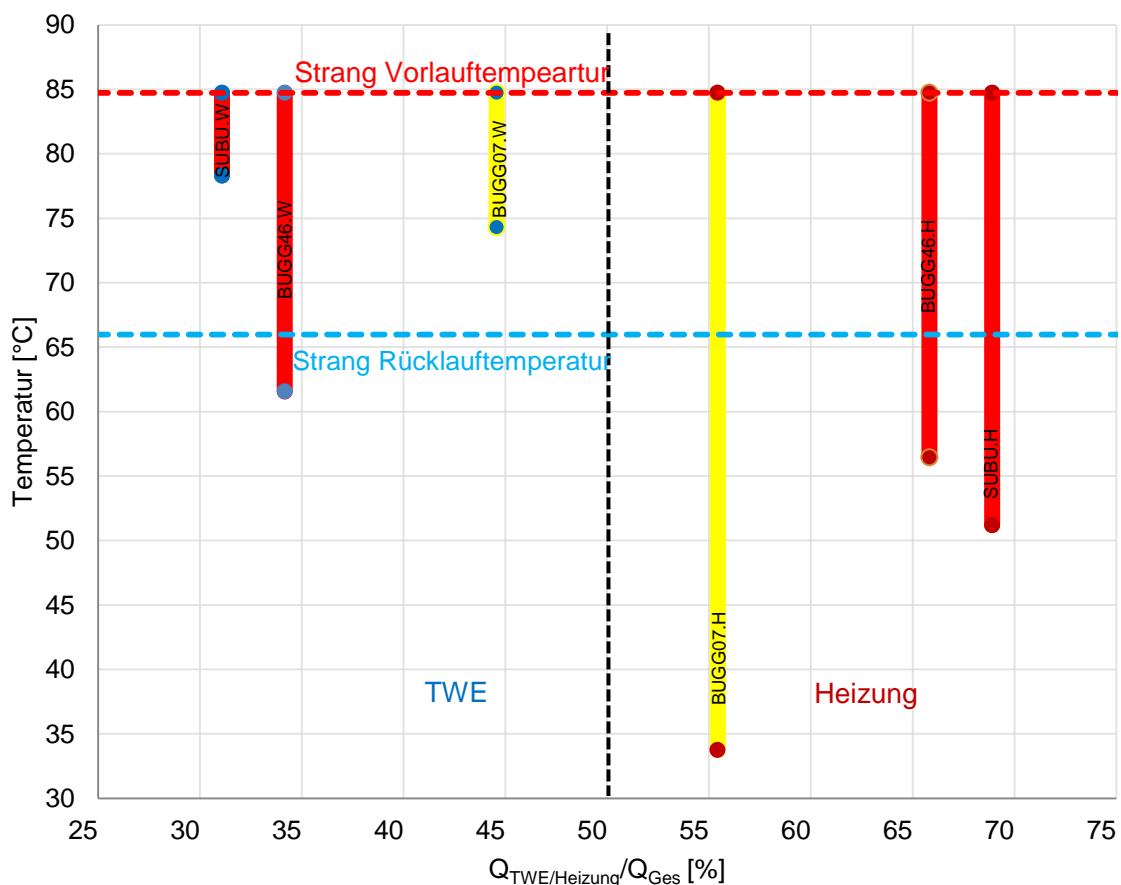


Abbildung 3-16: Temperatur-Wärmeanteil-Diagramm. Im Diagramm sind die Temperaturdifferenzen der Verbraucher getrennt nach TWE und Heizung aufgetragen. Auf der Abszisse ist der Anteil der Heizungsenergie und TWE-Energie bezogen auf die Gesamtenergie dargestellt. Blaue Punkte = TWE; Dunkelrote Punkte = Heizung

Zum Abschluss wird noch der prozentuale Anteil der Exergie an der Energie betrachtet, der zur Übertragung des Wärmestroms an den Verbraucher dem Fluid primärseitig entzogen wird. Die Bilanzierung der Exergieströme an der Wärmeübergabestation erfolgt nach Abbildung 3-17 in Gleichung (3.22).

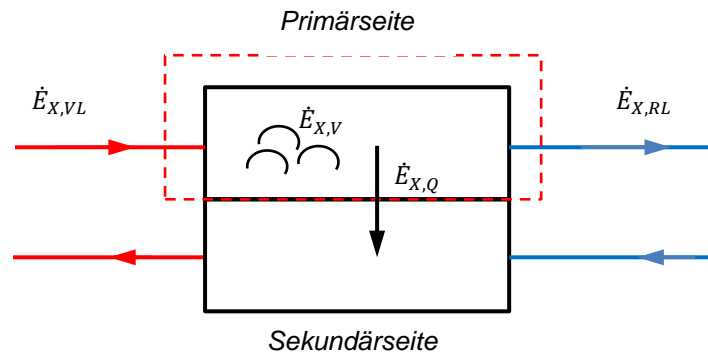


Abbildung 3-17: Exergiebilanz der Wärmeübergabestation

$$\dot{E}_{X,V} = \dot{E}_{X,VL} - \dot{E}_{X,RL} - \dot{E}_{X,Q} \quad (3.22)$$

Nach Umstellen der Gleichung ergibt sich der abgegebene Exergiestrom  $\dot{E}_{X,Ab}$  aus der Exergiestromdifferenz zwischen Ein- und Austritt.

$$\underbrace{\dot{E}_{X,Q} + \dot{E}_{X,V}}_{\dot{E}_{X,Ab}} = \dot{E}_{X,VL} - \dot{E}_{X,RL} = \dot{m} \cdot (e_{X,VL} - e_{X,RL}) \quad (3.23)$$

Durch das Einsetzen von Gleichung (2.5) für die spezifische Exergie  $e_x$  kann der abgegebene Exergiestrom mit Hilfe der spezifischen Enthalpiedifferenz und spezifischen Entropiedifferenz bestimmt werden.

$$\dot{E}_{X,Q} + \dot{E}_{X,V} = \dot{m} \cdot \left[ \underbrace{h_{VL} - h_{RL}}_{\text{spez. Energie}} - T_U \cdot \underbrace{(s_{VL} - s_{RL})}_{\text{spez. Anergie}} \right] \quad (3.24)$$

Die Werte der spez. Enthalpien und spez. Entropien werden in Abhängigkeit der Temperatur mit dem MATLAB-Skript X-Steam ermittelt. Die Wahl der Umgebungstemperatur  $T_U$  ist in Kapitel 2.1.3 diskutiert worden. Sie ist für die Betrachtung des gesamten Nahwärmesystems auf den konstanten Wert  $T_U = T_R = 20^\circ\text{C}$  gewählt worden.

Da die Massenströme bzw. die kumulierten Massen pro Jahr der Gebäude sehr unterschiedlich sind, wird nicht die absolute Exergie sondern der prozentuale Anteil der Exergie an der Energie  $\eta_{ex}$  in Abbildung 3-18 dargestellt. Der Wert wird nach Gleichung (3.25) bestimmt.

$$\eta_{ex} = \frac{\int \dot{E}_{X,Ab}(t) dt}{\int \dot{Q}_{Ab}(t) dt} = \frac{E_{X,AB}}{Q_{Ab}} \quad (3.25)$$

Für die sanierten Wohngebäude ist der Anteil der Exergie auf Grund der niedrigeren Rücklauftemperaturen etwas geringer. Allerdings ist die Differenz mit ca. 1,5 % zwischen unsanierten und sanierten Wohngebäuden nur gering. Betrachtet man die Näherungsgleichung für ideale Flüssigkeiten zur Berechnung der spez. Enthalpie

$$h_{VL} - h_{RL} = c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (3.26)$$

und der Berechnung der spez. Entropie

$$s_{VL} - s_{RL} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_{VL}}{T_{RL}}\right) \quad (3.27)$$

werden die unterschiedlichen mathematischen Zusammenhänge ersichtlich. Die Enthalpiedifferenz steigt linear in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz, während die Entropiedifferenz logarithmisch steigt. Bei Betrachtung von Gleichung (3.24) wird deutlich, dass zur Reduzierung der Exergie die Temperaturdifferenz gesenkt werden muss, damit der Anteil der Anergie an der Energie wächst.

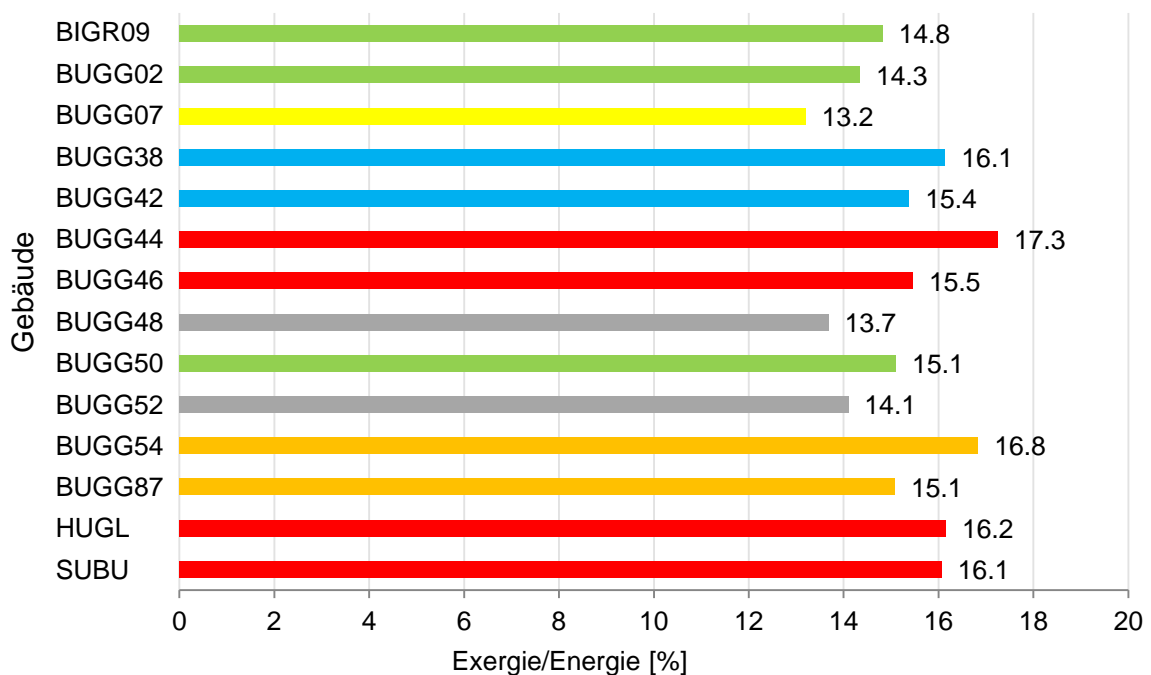


Abbildung 3-18: Prozentualer Anteil der Exergie an der Energie, die pro Jahr an den Verbrauchern bereitgestellt wird.

## 4 Simulationsmodell des Verteilnetzes

Ziel des Simulationsmodells ist das thermodynamische Verhalten des Verteilnetzstrangs Weingarten Süd abzubilden und damit einen Überblick über die Energieflüsse und Exergieflüsse im Verteilnetz zu erhalten. Die Energie- und Exergieströme sollen in einem eindimensionalen physikalischen Modell abgebildet werden, das Temperaturverläufe, Massenstromverteilungen und Wärmeübertragung durch Wärmeleitung (Masselos) und Konvektion (Massegebunden) berücksichtigt. Die Hydraulik des Modells wird zwar vollständig modelliert, jedoch wird nur die Massenstromverteilung validiert, da zur Modellierung und Validierung der Druckverteilung keine ausreichenden Daten existieren. Eine komplette Vernachlässigung der Druckmodellierung ist jedoch nicht möglich, da Dymola/ Modelica die physikalische Strömungsrichtung auf Grund von Druckdifferenzen berücksichtigt. Die Druckverluste in den Bauteilen sowie die quantitativen Inputdaten sind nach von Literaturwerten gewählt. Da das Fluid im Modell als ideale Flüssigkeit betrachtet wird, sind die Stoffgrößen unabhängig vom Druckniveau. Die Topologie und die Verschaltung der Rohrleitungen im Modell sollen flexibel anpassbar sein, um Optimierungspotenziale durch Strukturänderungen simulieren zu können.

### 4.1 Systemgrenzen des Modells

Das Modell berücksichtigt reale Messdaten, um das Verhalten der Verbraucher und der Erzeuger zu simulieren. Die Systemgrenze für die Modellierung sind daher entsprechend der Position der Messpunkte nach Abbildung 4-1 gewählt.

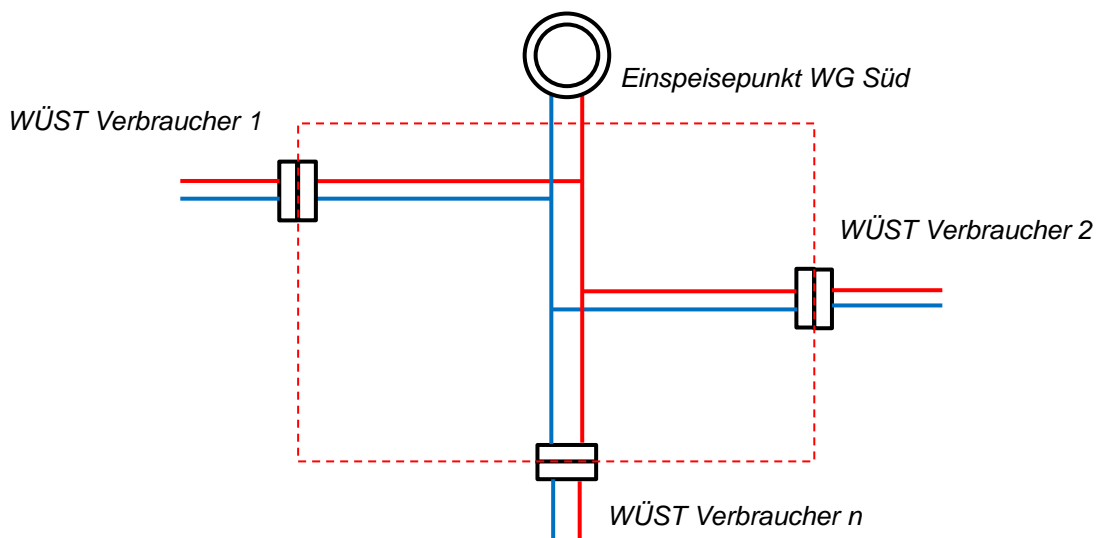


Abbildung 4-1: Bilanzgrenze des Verteilnetzsimulationsmodell. Rot Linie = Systemgrenze

An den Verbrauchern wird die Primärseite der WÜST als Systemgrenze gewählt. Somit wird der Wärmestrom über die Systemgrenze übertragen. Auf der Erzeugerseite ist die Systemgrenze kurz hinter dem Einspeisepunkt WG Süd gewählt, damit die Messdaten aus dem HKW für den

Netzeinspeisepunkt WG Süd als Inputdaten für die Vorlauftemperatur und der Massenstrom verwendet werden können.

## 4.2 Modellierung

Die Programmierung des Gesamtmodells erfolgt überwiegend grafisch mit den vorhandenen Modellen aus den verwendeten Bibliotheken:

- Modelica Library
- Buildings Library
- ISE Lib

Weitere Informationen zu den Bibliotheken sind in Kapitel 2.2.1 genannt. Einige Modelle sind in ihrer Funktionsweise im Quellcode leicht angepasst worden.

### 4.2.1 Rohrleitungssystem

Mit Hilfe des Rohrleitungsmodells sollen die Wärmeverluste und Temperaturverteilungen im Netz simuliert werden.

Im ganzen Strang WG Süd sind Doppelrohrleitungen des Herstellers Isoplus verlegt. Bei Doppelrohrleitung sind die Vor- und Rücklaufleitung, wie in Abbildung 4-2 ersichtlich, von einer gemeinsamen Isolierung ummantelt. Im Vergleich zu einzelisolierten Rohrleitungen können mit dieser Bauart nach Herstellerangabe [31] bei einem DN 125 Rohr die Wärmeverluste um 41 % reduziert werden.



Abbildung 4-2: Doppelrohrleitung für Fernwärmesysteme [31]

Die technischen Spezifikationen des Systems sind dem Datenblatt des Herstellers [31] entnommen. Die Leitungslängen sowie die Rohrdimensionen und die verwendeten Isolierungsstärken wurden von der Badenove Wärme Plus als Geoinformationssystemdaten (GIS-Daten) zur Verfügung gestellt.

Eine detaillierte Übersicht der verlegten Rohrleitungen befindet sich im Anhang L. Die wichtigsten Parameter sind hier zusammengefasst:

- Rohrdimensionen: DN 40 – DN 125
- Isolierungsmaterial: Polyurethan-Weichschaumstoff (PUR-Schaum)
- Wärmeleitfähigkeit der Isolierung:  $\lambda_{iso} = 0,027 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bei einer Bezugstemperatur von  $50^\circ\text{C}$
- Verlegungsart: Erdreichverlegung in einem Sandbett mit einer Überdeckung von  $0,8 \text{ m}$
- Montagejahr: 2010

Zur Berechnung der Temperaturänderung im Rohrleitungssystem werden die Leitungen in eine hinreichende Anzahl an finiter Elementen  $E$  eingeteilt.

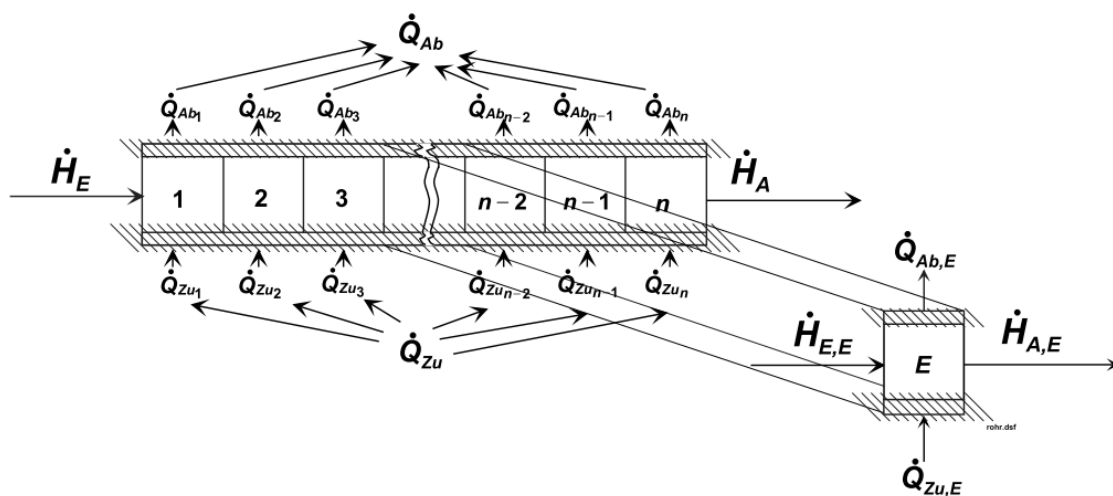


Abbildung 4-3: Energiebilanz eines Rohrleitungselements [30]

Für jedes Element lässt sich dann eine allgemeine Energiebilanz erstellen.

$$\frac{\partial U_E}{\partial t} = \dot{H}_{E,E} - \dot{H}_{A,E} + \dot{Q}_{Zu,E} - \dot{Q}_{Ab,E} \quad (4.1)$$

Die zeitlich änderbare innere Energie  $\frac{\partial U_E}{\partial t}$  wird vernachlässigt, da der Anteil an der Gesamtenergiebilanz klein ist und die instationäre Berechnung im Solver von Dymola/ Modelica sehr zeitaufwendig wäre. Der zugeführte Wärmestrom  $\dot{Q}_{Zu,E}$  kann ebenfalls vernachlässigt werden, da keine Rohrleitung im System über eine Rohrheizung oder eine andere Einrichtung verfügt, die Wärme zuführt. Damit ergibt sich die vereinfachte Energiebilanz nach Gleichung (4.2).

$$0 = \dot{H}_{E,E} - \dot{H}_{A,E} - \dot{Q}_{Ab,E} \quad (4.2)$$



Die abgeführte Wärme  $\dot{Q}_{Ab,E}$  ergibt sich aus dem Wärmeverlust an die Umgebung. Der Wärmeverlust durch Wärmeleitung lässt sich nach Gleichung (4.3) bestimmen.

$$\dot{Q}_{Ab,E} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{A \cdot \lambda_i}} \cdot (T_{m,R} - T_U) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_{L,i}} \cdot (T_{m,R} - T_U) \quad (4.3)$$

Die Summe des Wärmeleitwiderstands  $W_L$  errechnet sich aus dem Wärmeleitwiderstand der Isolierung

$$W_{L, Iso} = \frac{2\pi \cdot \lambda_{Iso} \cdot l_E}{\ln\left(\frac{d_{Iso}}{d_{Rohr}}\right)} \quad (4.4)$$

und dem Wärmeleitwiderstand des Erdbodens nach Recknagel [4].

$$W_{L, Erd} = \frac{2\pi \cdot \lambda_{Erd} \cdot l}{\ln\left(\frac{4 \cdot t_{Erd}}{d_{Iso}}\right)} \quad (4.5)$$

Da die Vor- und Rücklaufleitung in einer Isolierung verlegt sind, wird sowohl ein Wärmestrom an das Erdreich als auch zwischen den Rohrleitungen übertragen. Um diesen Effekt zu berücksichtigen ist die gesamt abgeführte Wärme  $\dot{Q}_{Ab,E}$  mit einem Faktor  $F$  in zwei Wärmeströme unterteilt.

$$\dot{Q}_{Ab,E} = \left( \frac{1}{W_{L, Iso} + W_{L, Erd}} (T_{m,R,1} - T_{Erd}) \right)_{Erd} \cdot F + \left( \frac{1}{W_{L, Iso}} (T_{m,R,1} - T_{m,R,2}) \right)_{Rohr} \cdot (F - 1) \quad (4.6)$$

Durch das Vorzeichen der Temperaturdifferenz ändert sich die Richtung des Wärmestroms bei der Betrachtung des Vor- und Rücklaufs. Für das Vorlaufrohr gilt die Temperaturdifferenz nach Gleichung (4.7).

$$T_{m,R,1} - T_{m,R,2} = T_{m,VL} - T_{m,RL} \quad (4.7)$$

Für das Rücklaufrohr gilt analog dazu Gleichung (4.8).

$$T_{m,R,1} - T_{m,R,2} = T_{m,RL} - T_{m,VL} \quad (4.8)$$

Damit wird im Normalbetrieb des Nahwärmesystems ein Anteil der Wärme von beiden Rohrleitungen an das Erdreich übertragen und der zweite Teil der Wärme von dem Vorlauf an den Rücklauf übertragen. Die Idee zur Aufteilung der Wärme mit dem Faktor  $F$  ist aus einem Rohrmodell der ISELib übernommen. Der Autor des Modells ist ISE Mitarbeiter Mehmet Elci. Den Faktor hat er in seinen Simulationsprogrammen mit  $F = 0,85$  gewählt.

Zur Berechnung des Rohrmodells muss der Enthalpiestrom  $\dot{H}_{E,E}$  an einem Elementeintritt bekannt sein. Mit Hilfe des iterativen Ansatzes aus Abbildung 4-4 wird dann die Wärmeabgabe  $\dot{Q}_{Ab,E}$  und die Austrittsenthalpie  $\dot{H}_{A,E}$  des Elements bestimmt. Im ersten Iterationsschritt wird dazu ein

Startwert für die Austrittstemperatur des Elements geschätzt. Damit lassen sich die thermodynamische Mitteltemperatur und die Wärmeabgabe berechnen. Durch die Umstellung der Energiebilanz aus Gleichung (4.1) lässt sich der Enthalpiestrom am Austritt berechnen. Die Temperatur aus dem Enthalpiestrom  $T_{A,E}(\dot{H}_{A,E})$  und die Temperatur zur Wärmeleitungsberechnung  $T_{A,E}(\dot{Q}_{AB})$  werden verglichen. Ist die Abweichung der Werte kleiner als die festgelegte zulässigen Toleranz wird die Iteration abgebrochen. Der Austrittsenthalpiestrom wird dann an als Eintrittsenthalpiestrom für das folgende Element verwendet.

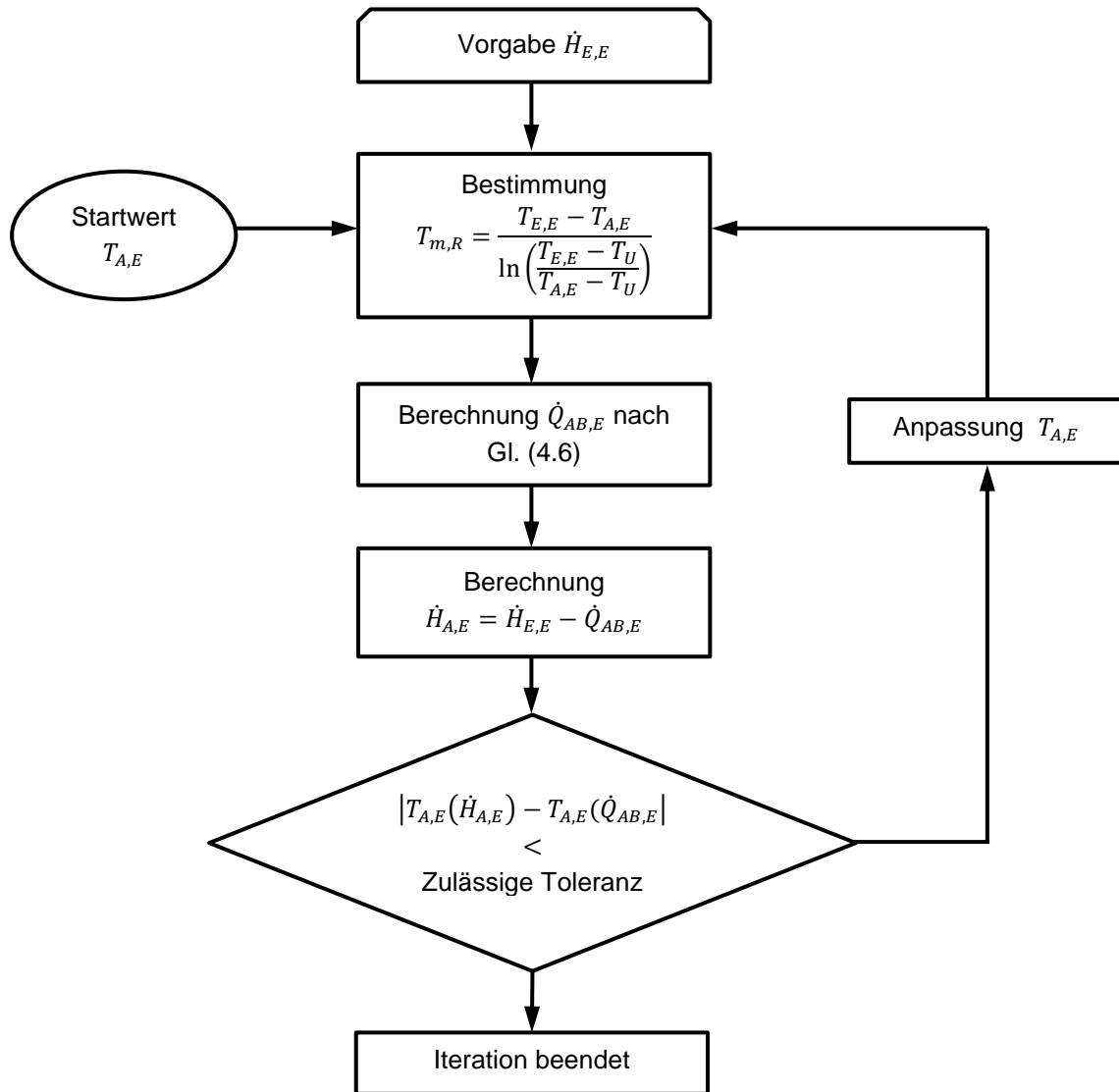


Abbildung 4-4: Iterationsverfahren zur Bestimmung der Temperatur am Elementaustritt

Die Verbraucher im Netz sind, wie in Abbildung 4-5 schematisch dargestellt, alle parallel an den Hauptstrang angeschlossen.

Im Vorlauf haben die Massenströme nach der Aufteilung alle dieselbe Temperatur. Im Rücklauf errechnet sich die Temperatur nach dem Mischregelansatz.

$$T_3 = \frac{(\dot{m}_1 \cdot T_1) + (\dot{m}_2 \cdot T_2)}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (4.9)$$

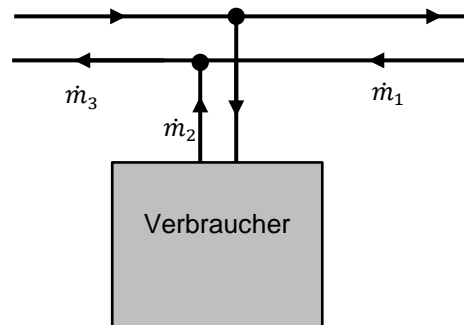


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung eines Netzknotenpunktes mit der Aufteilung der Massenströme

#### 4.2.2 Verbraucher

Die Wärmeenergie im Verteilnetzstrang Weingarten Süd wird ausschließlich zur TWE und zur Beheizung der Gebäude verwendet. Die Verbraucher entnehmen dafür über indirekte WÜST dem Netz einen Wärmestrom. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik wird dieser Wärmestrom durch den Massenstrom und durch die Vor- und Rücklauftemperatur bestimmt. Die Vorlauftemperatur wird primärseitig von dem Netzbetreiber vorgegeben. Der Massenstrom und die Rücklauftemperatur auf der Primärseite werden durch das Verbraucherverhalten beeinflusst. Die Verbrauchersysteme haben sowohl für die TWE als auch für das Heizungssystem einen separaten Rücklauftemperatursollwert. Um diese beiden Sollwerte einzuhalten wird auf der Primärseite der WÜST der Massenstrom mit einem Stellventil geregelt. Je nach Lastverhältnis zwischen Heizungssystem und TWE ergeben sich aus den Teilmassenströmen und den Rücklauftemperaturen eine Mischtemperatur und ein Gesamtmassenstrom auf der Sekundärseite des Wärmeübertragers der WÜST. Nach Abzug der Grädigkeit ergibt sich damit die Rücklauftemperatur an der Primärseite.

Um das beschriebene Verhalten der Verbraucher im Simulationsmodell abzubilden, ist ein Teilmodell (Submodell) für die Verbraucher programmiert worden, das die Messwerte der Wärmemengenzähler als Inputdaten verwendet. Das Modell ist in Abbildung 4-6 abgebildet.

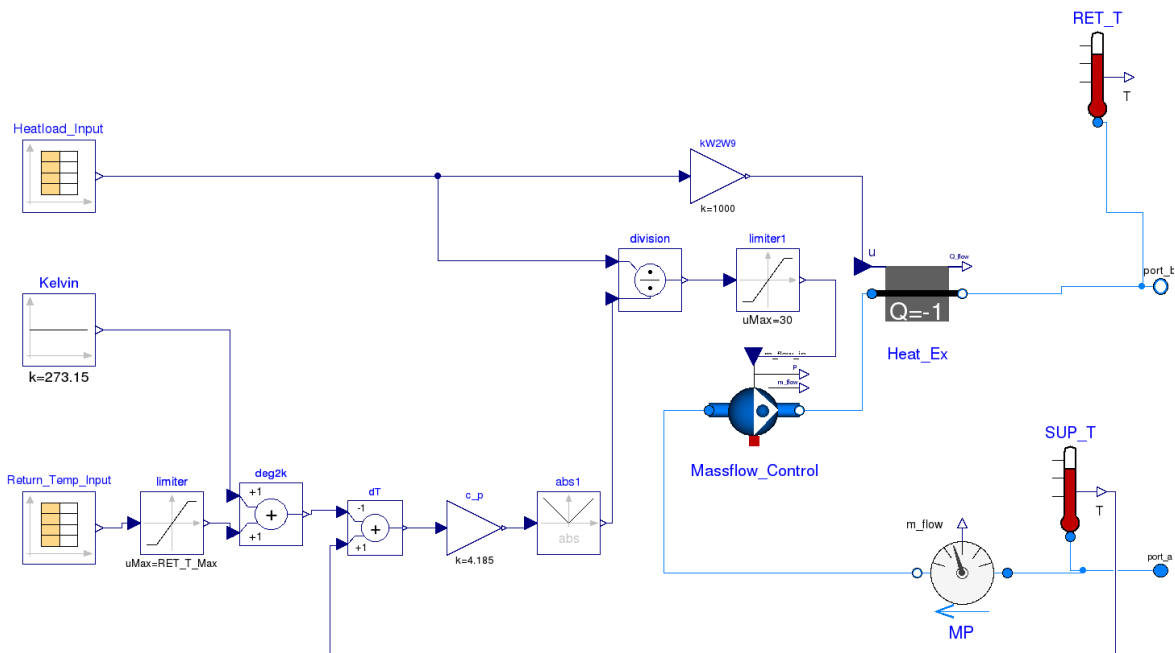


Abbildung 4-6: Teilmodell der WÜST zur Simulation der Netzverbraucher. Über die Blöcke Heatload\_Input und Return\_Temp\_Input werden die stündlichen Messwerte eingelesen. Der Block Heat\_Ex simuliert einen idealen WÜ über den die Wärme abgeführt wird. Massflow\_Control kennzeichnet eine ideale Pumpe, die den errechneten Inputmassenstrom ohne Verluste umsetzt.

Als Inputdaten werden der primärseitige Wärmestrom  $\dot{Q}_{KA}$  und die primärseitige Rücklauftemperatur  $T_{KA,RL}$  in stündlicher Auflösung vorgegeben. Mit der eingehenden Vorlauftemperatur  $T_{KA,VL}$ , berechnet aus dem Rohrmodell, lässt sich dann der Massenstrom  $\dot{m}_{KA}$  nach Gleichung bestimmen.

$$\dot{m}_{KA} = \frac{\dot{Q}_{KA}}{c_p \cdot (T_{KA,RL} - T_{KA,VL})} \quad (4.10)$$

Dieser Massenstrom wird dann an das Netzmodell übergeben. Für jede Simulationsstunde wird der Massenstrom in Abhängigkeit der dynamischen Messwerte angepasst.

### 4.2.3 Erzeuger

Als Erzeuger wird nicht das HKW, sondern vereinfacht der Netzeinspeisepunkt WG Süd betrachtet. Da das Ziel die Optimierung der Netzstruktur ist, ist die eigentliche Erzeugung der Wärme im HKW nicht relevant für die Simulation. Um den realen Betrieb des HKW abzubilden, wird der Messwert der Vorlauftemperatur als Inputwert vorgegeben. Der Massenstrom am Netzeinspeisepunkt muss nicht mehr vorgegeben werden, da bereits an allen Verbrauchern ein Massenstrom vorgegeben wird. Der Massenstrom am Netzeinspeisepunkt errechnet sich demnach aus der Summe der Teilmassenströme

$$\dot{m}_{WG,Süd} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{KA,i} \quad (4.11)$$

In Dymola/ Modelica wird der Netzeinspeisepunkt mit einer Quelle und einer Senke modelliert (siehe Abbildung 4-7).

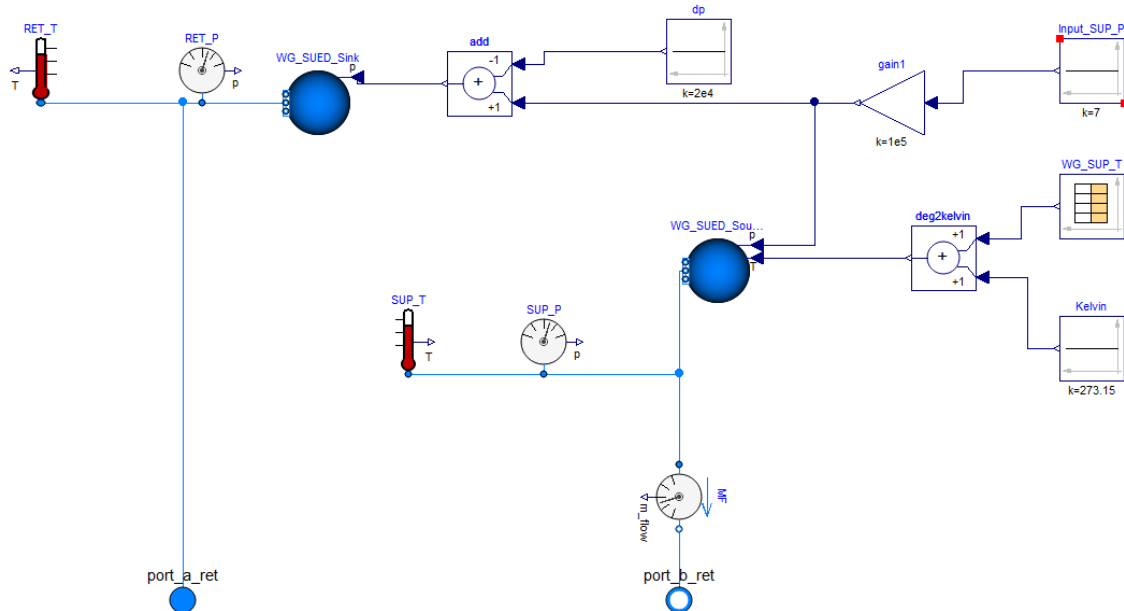


Abbildung 4-7: Teilmodell des Netzeinspeisepunkts Weingarten Süd. Über den Block WG\_SUP\_T wird die Vorlauftemperatur als Messwert eingelesen. WG\_Sued\_Source stellt die ideale Quelle dar. WG\_Sued\_Sink eine ideale Senke.

Die Quelle sorgt dafür, dass der geforderte Massenstrom an den Verbrauchern zur Verfügung gestellt wird und die Senke nimmt den kompletten Massenstrom wieder auf. An der Quelle startet die Berechnung für die Rohrelemente, da in diesem sowohl Massenstrom und Temperatur bekannt sind. Die Rücklauftemperatur an der Senke wird in Abhängigkeit der Mischtemperaturen im Strang und den Wärmeverlusten in den Rohrleitungen bestimmt.

### 4.3 Validierung

Mit der Validierung soll die Gültigkeit des Simulationsmodells überprüft werden. Das Verbraucher- und Erzeugermodell muss nicht validiert werden, da die Modelle bereits auf Messdaten basieren und keine Annahmen oder Vereinfachungen getroffen worden.

Das Rohrnetzmodell hingegen beruht hingegen auf einigen Vereinfachungen:

- Vereinfachte Betrachtung der Wärmeleitung an das Erdreich
- Vernachlässigung der Wärmestrahlung
- Vernachlässigung der Speichereffekte in den Rohrleitung (Innere Energie)
- Vereinfachte Berechnung der Wärmeverteilung zwischen den Rohrleitung und den Erdreich mit dem Faktor  $F$

Zudem ist der Wärmeleitkoeffizient  $\lambda_{Erd}$  des Erdreiches nicht bekannt. Dieser kann in einer Sandschicht in Abhängigkeit des Wassersättigungsgrad zwischen  $\lambda_{Erd} = 1 \dots 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  variieren [32]. Der Wärmeleitkoeffizient  $\lambda_{ISO}$  ist ebenfalls nicht genau bekannt. Zwar liegt der Wert des Herstellers mit  $\lambda_{ISO} = 0,027$  vor, jedoch konnte in Versuchen eine altersbedingte Veränderung der Wärmeleitfähigkeit bei PUR-Schaum ermittelt werden. In Abbildung 4-8 ist der Zusammenhang zwischen Nutzungsdauer und Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaums für verschiedene Rohrdimensionen dargestellt.

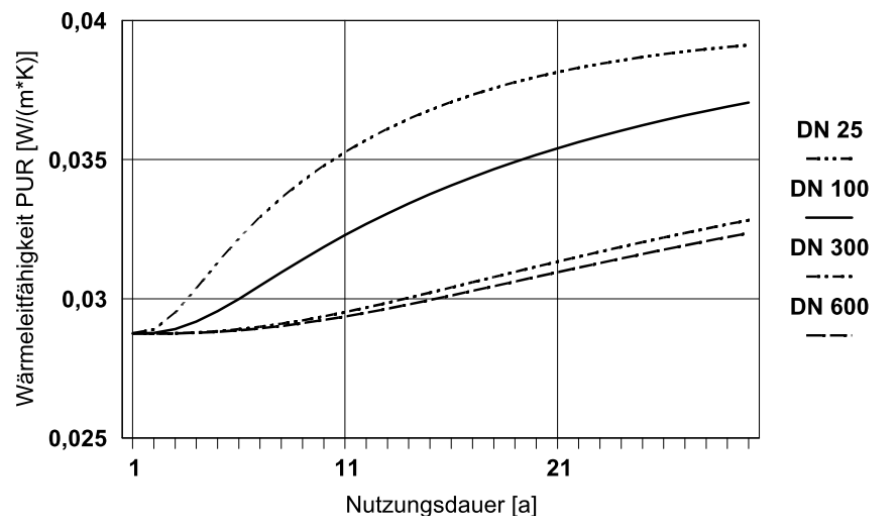


Abbildung 4-8: Wärmeleitfähigkeit-Nutzungsdauer-Diagramm für das Rohrdämmungsmaterial PUR-Schaum bei unterschiedlichen Rohrdimensionen [33]

Die Validierung des Rohrmodells erfolgt schrittweise. Im ersten Schritt wird das Berechnungsmodell zur Wärmeleitung validiert, indem das Rohrmodell bei konstanten Randbedingungen mit den Wärmeverlustangaben des Hersteller Isoplus verglichen wird. Im zweiten Schritt wird dann das Modell des Verteilstrangs WG Süd bestehend aus vielen verknüpften Einzelrohrmodellen mit den Messwerten validiert. Dazu werden Messwerte und die

Simulationenwerte der Temperatur an zwei Netzpunkten verglichen. Hierbei wird auch die Dynamik berücksichtigt, da die Inputdaten sich stündlich ändern.

### 4.3.1 Validierung des Rohrmodells mit den Herstellerangaben

Der Hersteller Isoplus gibt im Datenblatt [31] für das verwendete Rohrsystem spezifische Wärmeverluste bei festgelegten Randbedingungen an. Damit lässt sich die Wärmeverlustberechnung des Rohrmodells validieren. Die Validierung erfolgt nur exemplarisch für die Rohrdimension DN 125, da diese im ganzen Hauptstrang verlegt ist und damit den größten Einfluss auf die Temperaturverteilung im Netz hat. In Tabelle 4-1 sind die Randbedingungen aufgeführt, die nach Herstellerangaben bei der Ermittlung des spezifischen Wärmeverlusts vorlagen. Diese Angaben sind für das Rohrmodell zur Validierung übernommen worden.

**Tabelle 4-1: Herstellerangaben zur Validierung des Rohrmodells**

Bezeichnung	Wert
Rohrtyp	Doppelrohr
Dimension	DN 125
Spezifischer Wärmeverlust	$17,413 \text{ W}/(m * K)$
Rohrinnendurchmesser	$132,5 \text{ mm}$
Isolierungsdurchmesser	$450 \text{ mm}$
Wärmeleitkoeffizient Isolierung	$0,027 \text{ W}/(m * K)$
Vorlauftemperatur/ Rücklauftemperatur	$100^{\circ}\text{C} / 60^{\circ}\text{C}$
Erdreichtemperatur	$10^{\circ}\text{C}$
Wärmeleitkoeffizient Erdreich	$1,0 \text{ W}/(m * K)$
Erdreichüberdeckung	$0,8 \text{ m}$

In Abbildung 4-9 ist das Simulationsmodell zur Validierung des Rohrleitungsmodells dargestellt. Über die Eintrittsquelle wird ein Massenstrom von  $8,5 \text{ Kg/s}$  mit einer Temperatur von  $100^{\circ}\text{C}$  vorgegeben. Nachdem der Vorlauf durchflossen ist, wird das Fluid auf  $60^{\circ}\text{C}$  Rücklauftemperatur abgekühlt und durchfließt den Rücklauf. Die Rohrleitungslänge beträgt jeweils  $1 \text{ m}$ , um direkt den spezifischen Wärmeverlust zu erfassen.

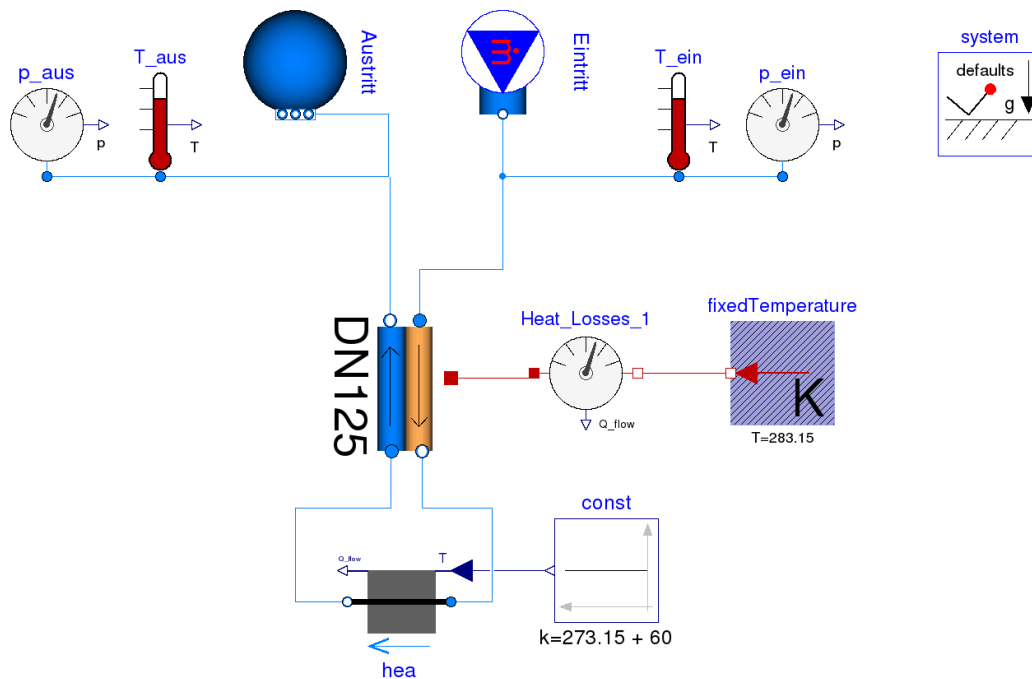


Abbildung 4-9: Dymola /Modelica Modell zur Validierung der Rohrleitungsmodells

Die Simulationszeit wurde auf 2 Std gesetzt, damit ein stationärer Zustand im Modell vorliegt. Zur Berechnung des Gleichungssystem wurde der DASSL-Solver mit einer Konvergenztoleranz von 0,0001 festgelegt. In Tabelle 4-2 sind die spezifischen Wärmeverluste von Hersteller und Simulationsmodell verglichen. Die Abweichung der Werte beträgt lediglich 0,53 %. Damit werden die Wärmeverluste vom Rohrleitungsmodell bereits gut abgebildet und eine Anpassung ist nicht erforderlich.

Tabelle 4-2: Vergleich der spezifische Wärmeverluste

Bezeichnung	Wert
Spezifischer Wärmeverlust Hersteller	17,413 $W/(m \cdot K)$
Spezifischer Wärmeverlust Modell	17,504 $W/(m \cdot K)$
Prozentuale Abweichung	0,53 %



### 4.3.2 Validierung des Rohrmodells mit den Messwerten

Zur Validierung des Rohrmodells wäre der Vergleich der Rücklauftemperaturen am Netzeinspeisepunkt am sinnvollsten, da die Berechnung des Rohrmodells am Vorlauf des Netzeinspeisepunktes startet und somit bis zum Netzurücklauf die größtmögliche Abweichung im Rechenmodell entstehen kann. Leider wurde der Messwert am Netzurücklauf nicht direkt erfasst und daher - wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben - durch eine Energiebilanz und einen Mischregelansatz iterativ berechnet. Damit ist dieser Wert für eine Validierung nicht geeignet.

Stattdessen werden die Messwerte der Vorlauftemperatur an zwei Verbrauchern zur Validierung verwendet. An den Verbrauchern muss sichergestellt sein, dass über den kompletten Betrachtungszeitraum von einem Jahr ein Massenstrom abgenommen wird, damit stets die Netztemperatur am Temperatursensor anliegt. Unterbricht der Massenstrom am Verbraucher wird die Temperatur im Rohr auf Umgebungsniveau abgesenkt. Zudem sollten die Messpunkte möglichst weit entfernt vom Netzeinspeisepunkt liegen, damit das komplette Rohrmodell für die Validierung betrachtet wird. Nach diesen beiden Kriterien wurden die Messstellen *SUBU.W* und *BUGG07.W* für die Validierung gewählt. Die Messstellen liegen an den beiden Netzen und stellen einen stetigen Wärmestrom bzw. Massenstrom zur TWE mehrerer Gebäude bereit. Zur Validierung werden die stündlichen Messwerte eines Jahres (01.07.2016 – 01.07.2017) mit den stündlichen Simulationswerten verglichen. Die Abweichung wird mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  bewertet. Der Aufbau des Simulationsmodells ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Am Netzeinspeisepunkt wird der Messwert der Vorlauftemperatur als Inputwert vorgegeben. An den Verbrauchern ergibt sich dann die berechnete Vorlauftemperatur.

Für die Lösung des Gleichungssystems wurde der DASSL-Solver mit einer Konvergenztoleranz von 0,0001 gewählt. Die Inputdaten wurden in stündlicher Auflösung verarbeitet. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in stündlicher Auflösung aufgezeichnet.

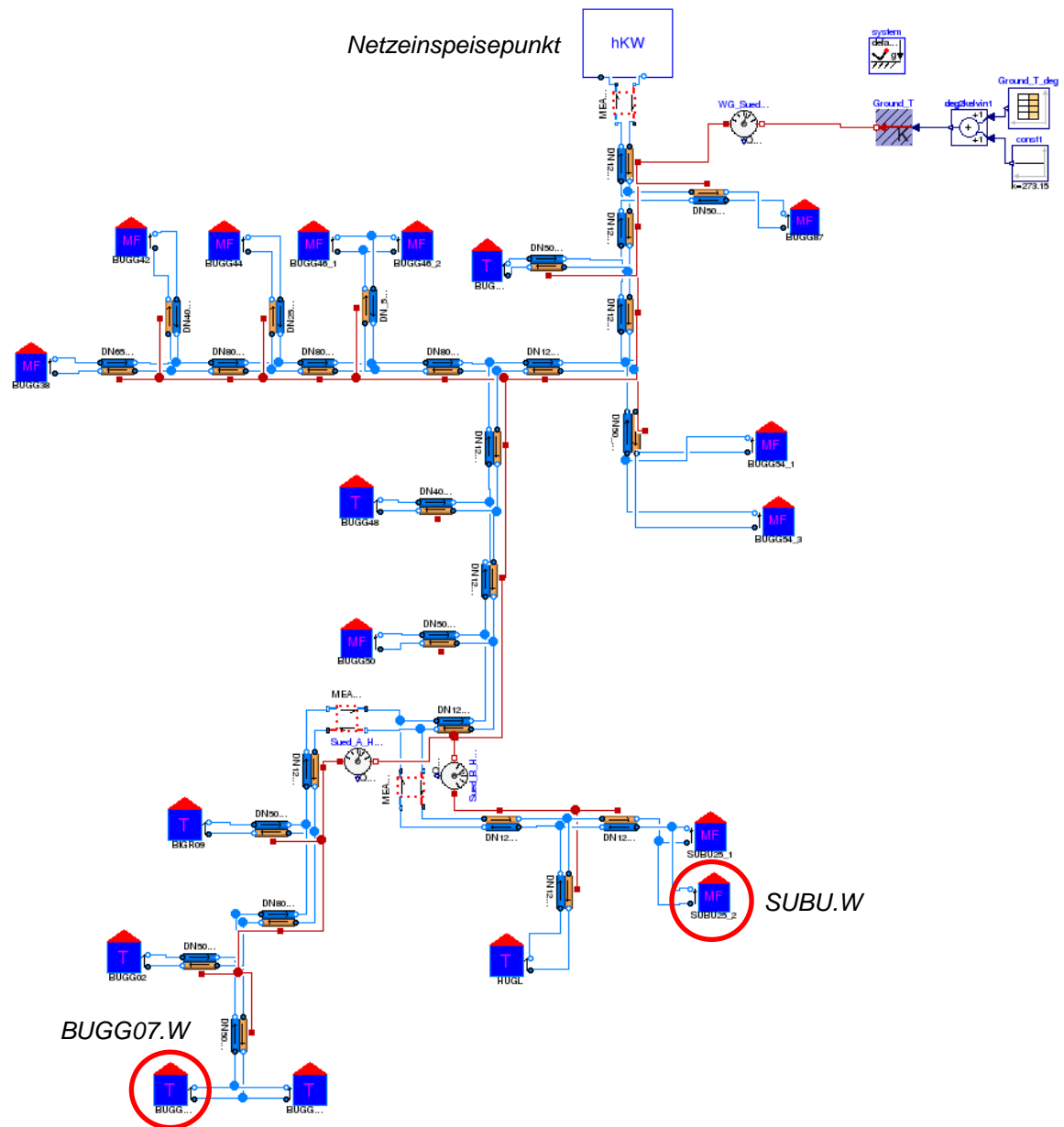


Abbildung 4-10: Dymola/ Modelica Modell zur Validierung des Rohrmodells mit den Messwerten

Für den ersten Validierungsversuch (Validierung 1) werden die Parameter aus der Validierung mit den Herstellerdaten übernommen (siehe Tabelle 4-1). Im Vergleich der Ergebnisse in Abbildung 4-11 liegen die Simulationsergebnisse deutlich über den Messwerten. Dementsprechend ist das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  auch bei beiden Validierungspunkten weit vom idealen Wert 1 entfernt:

- BUGG07.W  $R^2 = 0,70$
- SUBU.W  $R^2 = 0,85$

Um die Modellwerte den Messwerten anzupassen sind für die Validierung 2 die Wärmeleitkoeffizienten des Erdreichs und der Isolierung sukzessive erhöht worden.

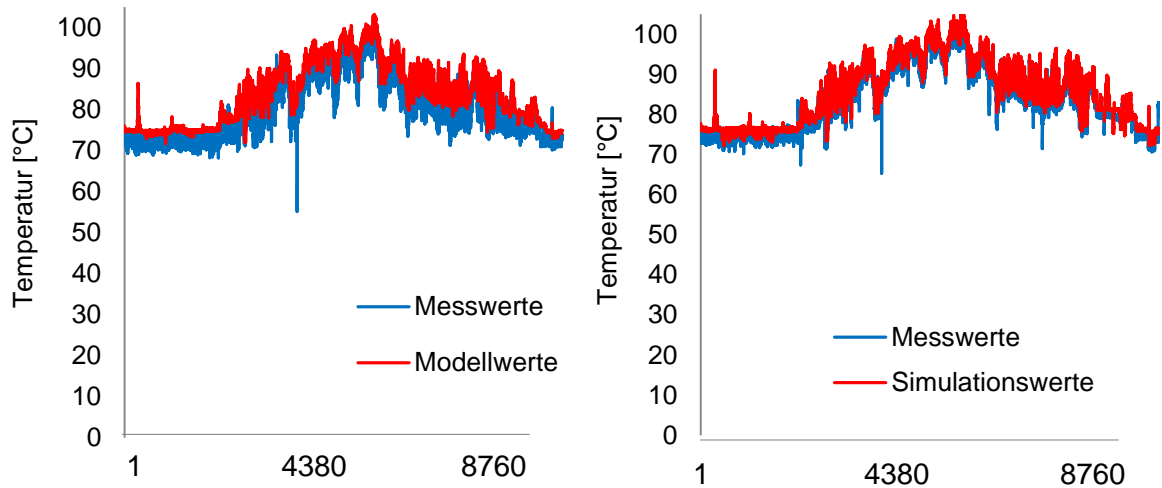


Abbildung 4-11: Vergleich der Vorlauftemperaturen Validierung 1. Linkes Bild: BUGG07.W / Rechtes Bild: SUBU.W

Bei einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{Erd} = 5,0 W/(m \cdot K)$  und  $\lambda_{Iso} = 0,075 W/(m \cdot K)$  wird die geringste Abweichung für  $R^2$  erzielt werden:

- BUGG07.W  $R^2 = 0,95$
- SUBU.W  $R^2 = 0,96$

Die Wärmeleitkoeffizienten aus Validierung 2 werden daher für die nachfolgende Optimierungssimulation ins Rohrleitungsmodell implementiert. In Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 sind die Abweichungen zwischen Simulationswert und Messwert für die beiden Validierungen gegenübergestellt. Die schwarze Gerade kennzeichnet die Regressionsgerade mit dem Wert  $R^2 = 1$ . In beiden Diagrammen ist erkennbar, dass die Werte der zweiten Validierung deutliche weniger streuen und dichter an der Geraden liegen.

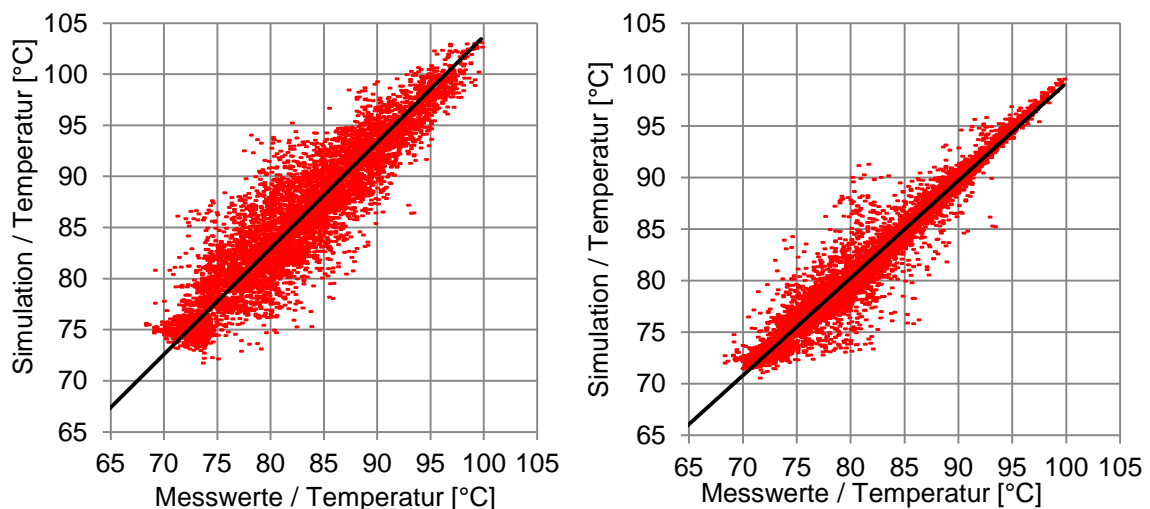


Abbildung 4-12: Bestimmtheitsmaßdiagramm für die Validierung von BUGG07.W. Linkes Bild: Validierung 1 mit  $R^2 = 0,70$ . Rechtes Bild: Validierung 2 mit  $R^2 = 0,95$ .

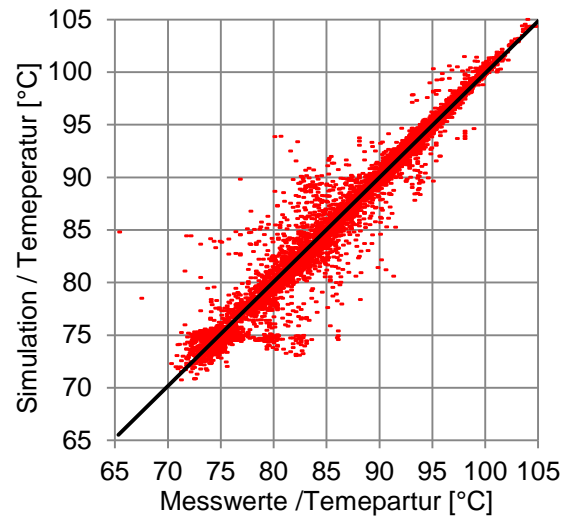
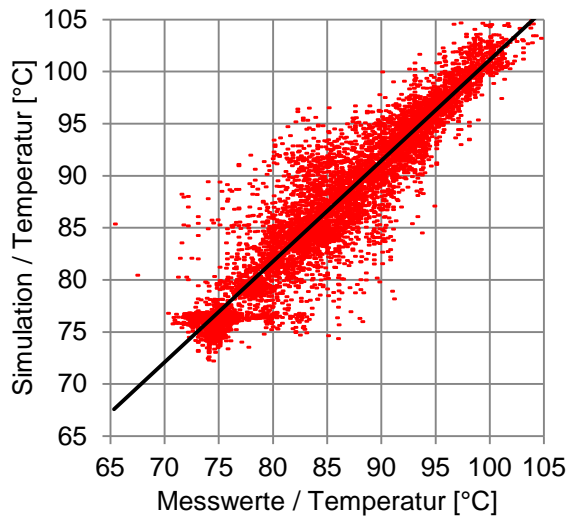


Abbildung 4-13: Bestimmungseinheitsmaßdiagramm für Validierung von SUBU.W. Linkes Bild: Validierung 1 mit  $R^2 = 0,85$ . Rechtes Bild: Validierung 2 mit  $R^2 = 0,96$ .

## 5 Optimierung des Verteilnetzstranges Weingarten Süd

Nachdem das Modell validiert ist, können Optimierungsstrategien entwickelt und ins Modell übersetzt werden. Unter Berücksichtigung der ausgewerteten Messwerte aus Kapitel 3.2.3 und der Literaturrecherche zum Beginn der Arbeit, ergeben sich zwei mögliche Optimierungsstrategien für den Netzstrang WG Süd, die unter Berücksichtigung der fortschreitenden Sanierung des Gebäudebestands den wirtschaftlichen Betrieb des Netzes verbessern können.

1. **Optimierungsstrategie: Rücklaufeinbindung.** Die sanierten Gebäude im Netz besitzen moderne Heizungs- und Trinkwassersysteme, die mit niedrigen Vorlauftemperaturen betrieben werden können. Im Netzstrang sind jedoch auch unsanierte Gebäude vorhanden, die bei niedrigen Außentemperaturen eine hohe Vorlauftemperatur zur Bereitstellung einer ausreichenden Heizwärme benötigen. Diese verhindern ein Absenken der Netztemperaturen. Eine Möglichkeit die Netzverluste in Teilen des Netzes mit sanierten Gebäuden trotzdem zu reduzieren, besteht in der Einbindung einzelner Gebäude oder ganzer Netzstränge in den Netzurücklauf. Damit werden die Netzverluste in Teilsträngen reduziert und die gesamte Netzurücklauftemperatur weiter abgesenkt. Diese Strategie wurde bereits im Fernwärmenetz Ulm im Rahmen eines Forschungsprojekts [34] umgesetzt.
2. **Optimierungsstrategie: Anpassung der Netztopologie.** Aufgrund der fortschreitenden Gebäudesanierung sind in Teilen des Netzes die Fernwärmeleitungen deutlich überdimensioniert. Durch die Verkleinerung der Rohrdimensionen wird die Manteloberfläche der Rohre und damit auch die Wärmeübertragungsfläche verkleinert. Diese führt zu einer Reduzierung der Wärmeverluste.

Um beide Optimierungsstrategien vergleichen zu können, ist jeweils der gleiche Teil im Netz optimiert worden. In Abbildung 5-1 ist der Teilstrang der optimiert wird, als sanierter Strang bezeichnet. In diesem Strang befinden sich ausschließlich sanierte Wohngebäude. Für den Vergleich der Optimierungsergebnisse werden nicht nur die Optimierungsstrategien im sanierten Strang verglichen, sondern auch ein Vergleich zu dem unsanierten Strang gezogen. In dem unsanierten Strang befinden sich ausschließlich unsanierte Wohngebäude.

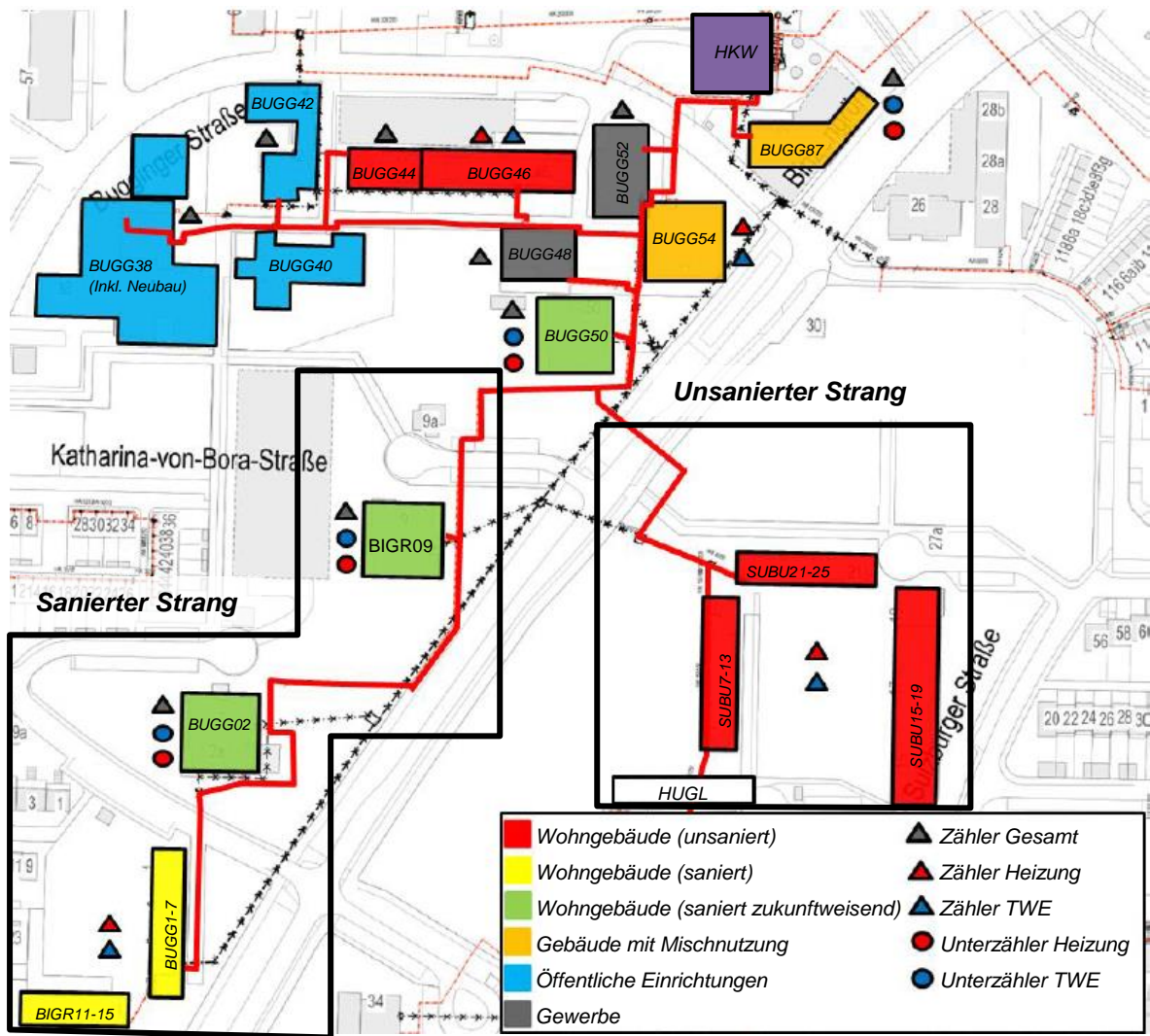


Abbildung 5-1: Einteilung des Netzstrangs WG Süd in zwei Unterstränge nach dem Sanierungstand der Gebäude.

## 5.1 Optimierungsstrategie Rücklaufeinbindung

Für die Optimierungsstrategie „Rücklaufeinbindung“ soll der komplette sanierte Strang in den Rücklauf des Hauptstrangs WG Süd eingebunden werden. Da vorher die Einbindung eines Teilstrangs in den Rücklauf erfolgt, sollten generell folgende technische Voraussetzungen geprüft werden:

- Das Verhältnis Massenstrom im Hauptrücklauf muss zu jeder Zeit größer sein als der Massenstrom im Teilstrang, um eine Versorgung zu gewährleisten.
- Das Rohrnetz im Teilstrang muss ausreichend dimensioniert sein, da mit der Einbindung im Rücklauf die Temperaturspreizung gesenkt wird und dementsprechend der Massenstrom steigen muss.
- Wird im Teilstrang Wärme zur TWE genutzt muss die Vorlauftemperatur jeder Zeit ausreichen, um das Trinkwasser beim Verbraucher auf 60°C zu erwärmen (Hygienevorschrift).
- Die Hydraulik im eingebundenen Teilstrang muss angepasst werden. Im Netzurücklauf ist das Druckniveau bereits durch die normal eingebundenen Verbraucher reduziert. Dies kann dazu führen, dass die im Rücklauf eingebundenen Verbraucher nicht mehr ausreichend durchströmt werden. In den Forschungsberichten [34] und [35] wird empfohlen den Differenzdruck im Teilnetzstrang mit einer zusätzlichen Pumpe aufzubringen.

Aus der kumulierten Massenbetrachtung aus Abbildung 3-15 wird deutlich, dass die Massenströme im unsanierten Strang deutlich höher sind als im sanierten. Das Rohrnetz im sanierten Strang ist deutlich überdimensioniert, da die Sanierung der Gebäude erst in den letzten Jahren erfolgt ist und die Rohre noch für den vorherigen Wärmebedarf ausgelegt wurden. Die Einbindung erfolgt nach dem Schema in Abbildung 5-2. Die Hauptleitung des Netzvorlaufs durchströmt die Verbraucher im unsanierten Strang. Dabei wird das Wasser auf ca. 67°C abgekühlt. In den Rücklauf des unsanierten Strangs wird der Vorlauf des sanierten Strangs eingebunden. Die Verbraucher im Strang kühlen das Wasser weiter aus und der Rücklauf des sanierten Strangs wird dann wieder mit dem Hauptrücklauf des Netzes verbunden. Um für die Trinkwassererwärmung stets eine ausreichende Vorlauftemperatur zu gewährleisten kann dem Vorlauf über ein Mischventil Wasser aus dem Hauptvorlauf beigemischt werden. Die Vorlauftemperatur für den Einspeisepunkt des sanierten Strangs wird auf 70°C festgelegt, damit nach dem Temperaturverlust im Rohrnetz und nach Abzug der Wärmeübertragergrädigkeit von ca. 5 K [34], auf der Sekundärseite eine Temperatur über 60°C zur TWE sichergestellt ist.

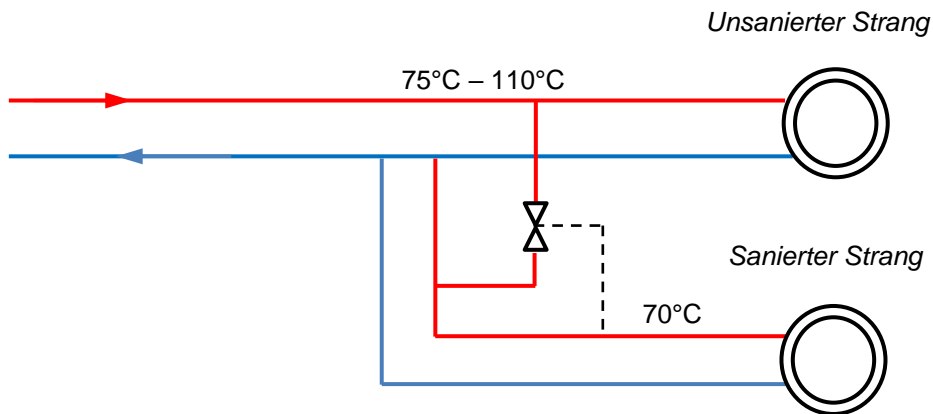


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung der Einbindung des sanierten Strangs in den Rücklauf des unsanierten Strangs.

Die Umsetzung der Rücklaufeinbindung im Modell ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Mit dem rot umkreisten Block wird das Mischventil simuliert, welches das Wasser aus dem Hauptvorlauf beimischt, um die Vorlauftemperatur auf konstant 70°C zu regeln. Liegt die Rücklauftemperatur aus dem unsanierten Strang über 70°C wird kein Wasser beigemischt. Die erhöhte Temperatur wird in diesem Fall ohne Absenkung an den Vorlauf des sanierten Strangs weitergegeben.

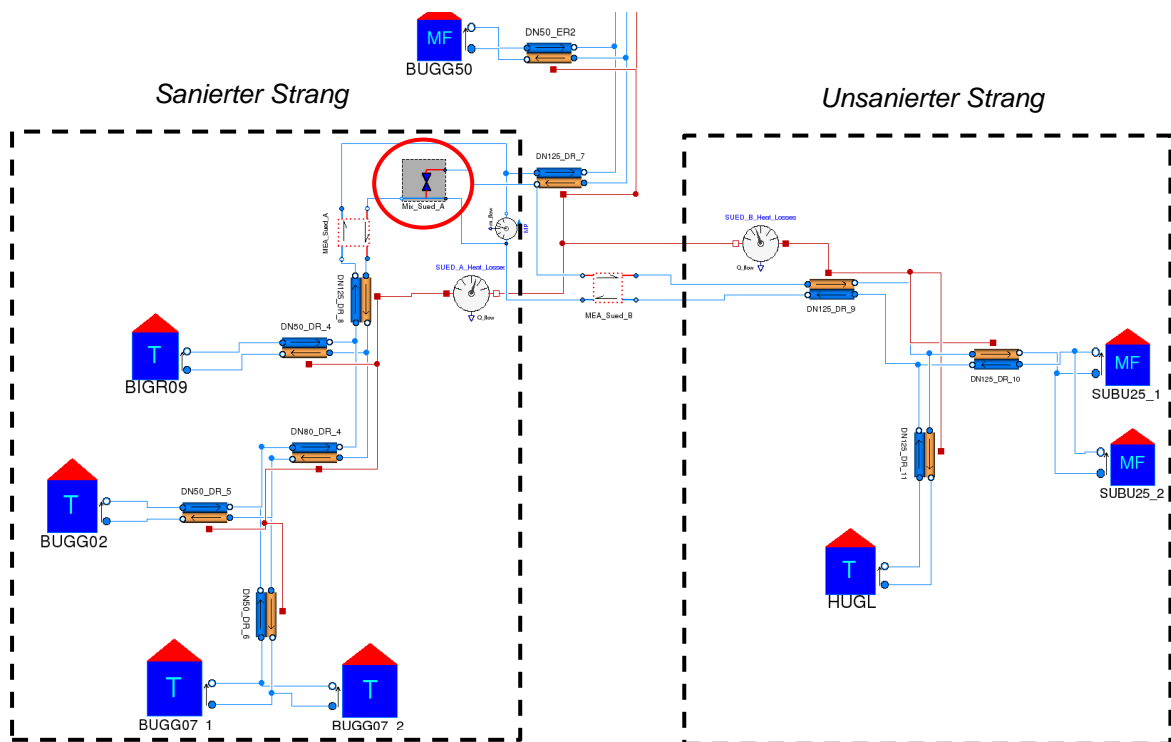


Abbildung 5-3: Rücklaufeinbindung des sanierten Netzstrang im Dymola/ Modelica Simulationsmodell. Änderungen des Modells sind nur im sanierten Strang erfolgt. Der restliche Teil des Modells bleibt unverändert nach Abbildung 4-10 bestehen.



Die Simulation wurde für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr mit stündlichen Inputdaten durchgeführt. Zur Lösung des Gleichungssystems wurde der DASSL-Solver mit einer Konvergenztoleranz von 0,0001 verwendet. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in stündlicher Auflösung aufgezeichnet.

In Tabelle 5-1 sind die Simulationsergebnisse aus der Bilanzierung des sanierten Strangs zusammengefasst und mit dem Ausgangszustand verglichen. In der letzten Spalte sind die prozentualen Abweichungen der zwischen Ausgangszustand und Optimierung aufgeführt.

Tabelle 5-1: Ergebnisse Optimierungsstrategie Rücklaufeinbindung. Sanierten Strang

Bezeichnung	Ausgangszustand	Optimierung	Abweichung
Bereitgestellte Wärme	1.187.685 kWh	1.177.212 kWh	0,9 %
Exergieanteil an Wärme	173.446 kWh	146.570 kWh	15,5 %
Wärmeverluste	140.679 kWh	117.303 kWh	16,6 %
Kumulierte Masse	9.680 kg	17.947 kg	-85,4 %
Mittlere Vorlauftemperatur	84,7°C	70,2°C	17,1 %
Mittlere Rücklauftemperatur	55,1°C	55,1°C	0,0 %

Die Bilanzierung des kompletten Strangs Weingarten Süd ist in Tabelle 5-2 ist aufgelistet. Die Tabelle ist analog zu Tabelle 5-4 aufgebaut. Die Wärmeverluste im sanierten Netzstrang konnten durch die Rücklaufeinbindung auf Grund der Temperaturniveauabsenkung um 16,6% gesenkt werden. Bei Betrachtung des Gesamtstrangs konnte durch die Rücklauftemperatur Absenkung und deutliche Reduzierung der Wärmeverluste im sanierten Strang der Gesamtwärmeverlust um fast 4 % gesenkt werden. Im sanierten Strang musste auf Grund der niedrigeren Temperaturspreizung ein deutlicher größerer Massenstrom umgewälzt werden. Demgegenüber steht jedoch ein reduzierter Massenstrom im Gesamtnetz bedingt durch die effizientere Wärmebereitstellung.

Tabelle 5-2: Ergebnisse Optimierungsstrategie Rücklaufeinbindung. Gesamtstrang WG Süd

Bezeichnung	Ausgangszustand	Optimierung	Abweichung
Bereitgestellte Wärme	8.670.179 kWh	8.632.870 kWh	0,4 %
Exergieanteil an Wärme	1.425.053 kWh	1.398.864 kWh	1,8 %
Wärmeverluste	582.931 kWh	560.317 kWh	3,9 %
Kumulierte Masse	105.998 kg	96.603 kg	8,9 %
Mittlere Vorlauftemperatur	84,9°C	84,9°C	0,0 %
Mittlere Rücklauftemperatur	66,7°C	65,1°C	2,4 %

## 5.2 Optimierungsstrategie Anpassung der Netztopologie

Mit fortschreitender Sanierung der Gebäude im Netz sinkt der Wärmebedarf. Damit nimmt folglich auch der Massenstrom ab. Das Rohrnetz ist, sofern nach der Sanierung keine Nachverdichtung erfolgt, überdimensioniert. Dies trifft auch für den sanierten Strang des Netzes WG Süd zu. Die Sanierung der Gebäude ist erst nach der Rohrverlegung erfolgt.

Bei der Dimensionierung der Fernwärmeleitungen wird versucht die Druckverluste und Wärmeverluste zu minimieren. Leider sind physikalischen Gesetze zur Reduzierung beider Verluste gegenläufig. Eine Vergrößerung des Rohrquerschnitts führt zu einer Senkung der Strömungsgeschwindigkeit bei konstantem Massenstrom und damit zu einer Reduzierung der Druckverluste. Die dadurch bedingte Vergrößerung der Mantelfläche der Rohrleitung führt zu einer größeren Wärmeübertragungsfläche und damit zu höheren Wärmeverlusten. Der Hersteller Isoplus gibt in Abbildung 5-4 die optimale Rohrenweite in Abhängigkeit des Massenstroms vor. Zur Neuauslegung des Rohrnetzes im sanierten Strang werden anhand der Messwerte der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung für die Massenströme in den einzelnen Rohrleitungen berechnet. Addiert und Subtrahiert man die Standardabweichung vom Mittelwert ergibt sich ein Vertrauensbereich in dem 95% aller Massenströme über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr liegen.

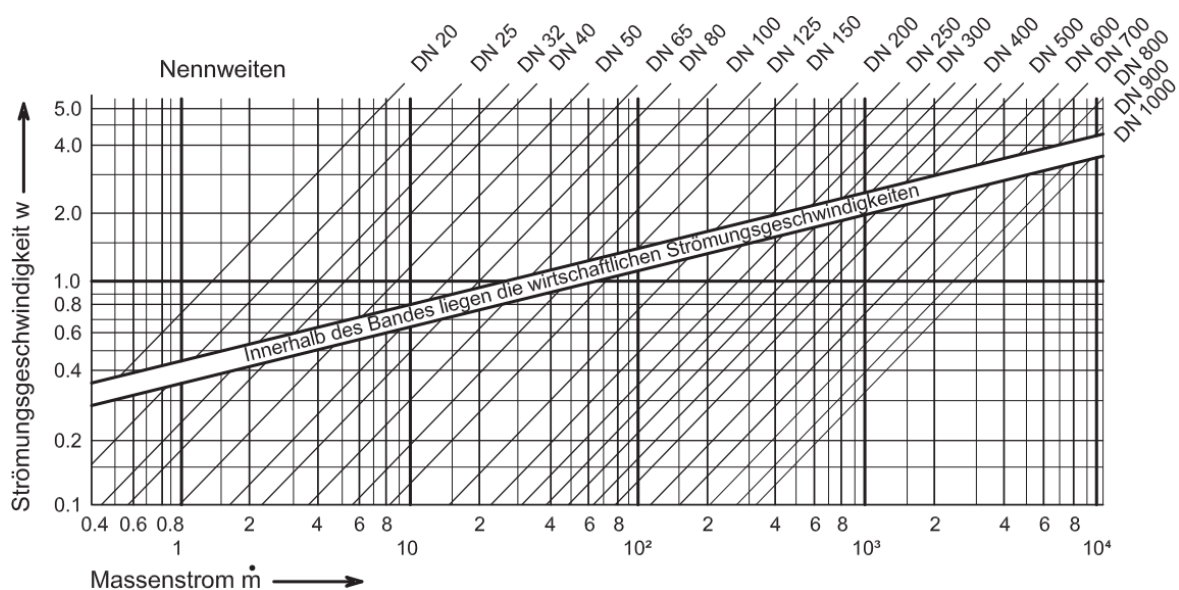


Abbildung 5-4: Wirtschaftliche Wahl der Rohrenweite in Abhängigkeit des Massenstroms. Massenstromangabe in Tonnen pro Stunde. Strömungsgeschwindigkeitsangabe in Meter pro Sekunde [31].

Im Vergleich des berechneten Massenstrombereiches mit dem Rohrdimensionierungsdiagramm aus Abbildung 5-4 sind neue Rohrdurchmesser gewählt worden. Die Massenströme und Rohrdurchmesser sind in Tabelle 5-3 aufgelistet.

Tabelle 5-3: Optimierte Rohrenweiten für den sanierten Strang

Bezeichnung	Mittlerer Massenstrom	Standard-abweichung	Verbaute Rohrenweite	Optimierte Rohrenweite
FWL01	1.19	0.42	DN 125	DN 50
FWL02	0.82	0.29	DN 80	DN 40
BIGR09	0.37	0.19	DN 50	DN 32
BUGG02	0.46	0.20	DN 32	DN 32
BUGG07	0.36	0.15	DN 32	DN 32

Die Bezeichnungen in der ersten Spalte der Tabelle beziehen sich auf Rohrabschnitte aus dem Simulationsmodell in Abbildung 5-5. Die Anschlussleitungen zu den einzelnen Gebäuden sind nach den Gebäudenamen benannt.

Die Simulation wurde für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr mit stündlichen Inputdaten durchgeführt. Zur Lösung des Gleichungssystems wurde der DASSL-Solver mit einer Konvergenztoleranz von 0,0001 verwendet. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in stündlicher Auflösung aufgezeichnet.

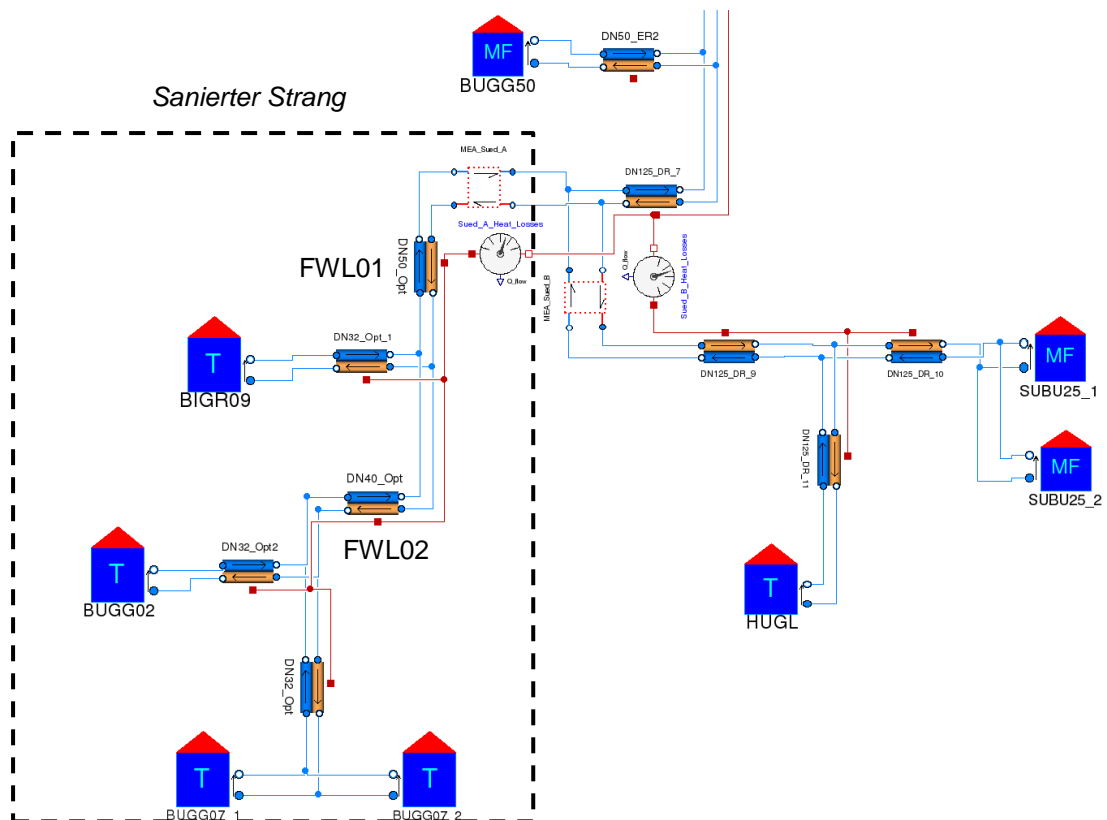


Abbildung 5-5: Anpassung der Rohrtopologie im sanierten Strang des Dymola/ Modelica Simulationsmodell. Das restliche Modell bleibt unverändert nach Abbildung 4-10 bestehen.

In Tabelle 5-4 sind die relevanten Ergebnisse der Optimierung aus der Bilanzierung des sanierten Strangs zusammengefasst und mit dem Ausgangszustand verglichen. In der letzten Spalte sind die prozentualen Abweichungen zwischen Ausgangszustand und Optimierung aufgeführt.

Tabelle 5-4: Ergebnisse Optimierungsstrategie Anpassung der Netztopologie. Sanierten Strang

Bezeichnung	Ausgangszustand	Optimierung	Abweichung
Bereitgestellte Wärme	1.187.685 kWh	1.163.182 kWh	2,1 %
Exergieanteil an Wärme	173.446 kWh	170.355 kWh	1,8 %
Wärmeverluste	140.679 kWh	113.013 kWh	19,7 %
Kumulierte Masse	9.680 kWh	9.550 kWh	1,3 %
Mittlere Vorlauftemperatur	84,7°C	84.7°C	0,0 %
Mittlere Rücklauftemperatur	55,1°C	55.1°C	0,0 %

Die Tabelle 5-5 zeigt die Ergebnisse für die Bilanzierung des kompletten Strangs WG Süd. Die ist nach dem Schema der der Tabelle 5-4 aufgebaut.

Die Wärmeverluste im sanierten Strang konnten durch die Anpassung der Netztopologie um 19,7% gesenkt werden. Das Temperaturniveau im sanierten Netzstrang ist unverändert geblieben, da das Verbraucherverhalten nicht verändert wurde. Im Gesamtstrang konnten die Wärmeverluste um 5,1 % werden und durch die effizientere Wärmebereitstellung die umgewälzte Masse leicht gesenkt werden.

Tabelle 5-5: Ergebnisse Optimierungsstrategie Anpassung der Netztopologie. Strang WG Süd

Bezeichnung	Ausgangszustand	Optimierung	Abweichung
Bereitgestellte Wärme	8.670.179 kWh	8.634.337 kWh	0,4 %
Exergieanteil an Wärme	1.425.053 kWh	1.413.269 kWh	0,8 %
Wärmeverluste	582.931 kWh	552.994 kWh	5,1 %
Kumulierte Masse	105.998 kg	103.254 kg	2,6 %
Mittlere Vorlauftemperatur	84,9°C	84.9°C	0,0 %
Mittlere Rücklauftemperatur	66,7°C	66,2°C	0,7 %

### 5.3 Vergleich und Bewertung der Simulationsergebnisse

Durch beide Optimierungen können die Wärmeverluste im sanierten Strang deutlich reduziert werden:

- Optimierung Rücklaufeinbindung: Reduktion der Wärmeverluste 16,6 %
- Optimierung Topologie: Reduktion der Wärmeverluste 19,7 %

Bezieht man die Wärmeverluste auf die bereitgestellte Wärme, wie in der Fernwärmebranche üblich, ergeben sich die Werte aus Abbildung 5-6. Aus dem Balkendiagramm wird deutlich, dass durch die Optimierungsstrategien auch der Anteil der Wärmeverluste an der gesamt bereitgestellten Wärme sinkt und damit die Effizienz bei der Wärmebereitstellung im sanierten Strang gesteigert werden kann.

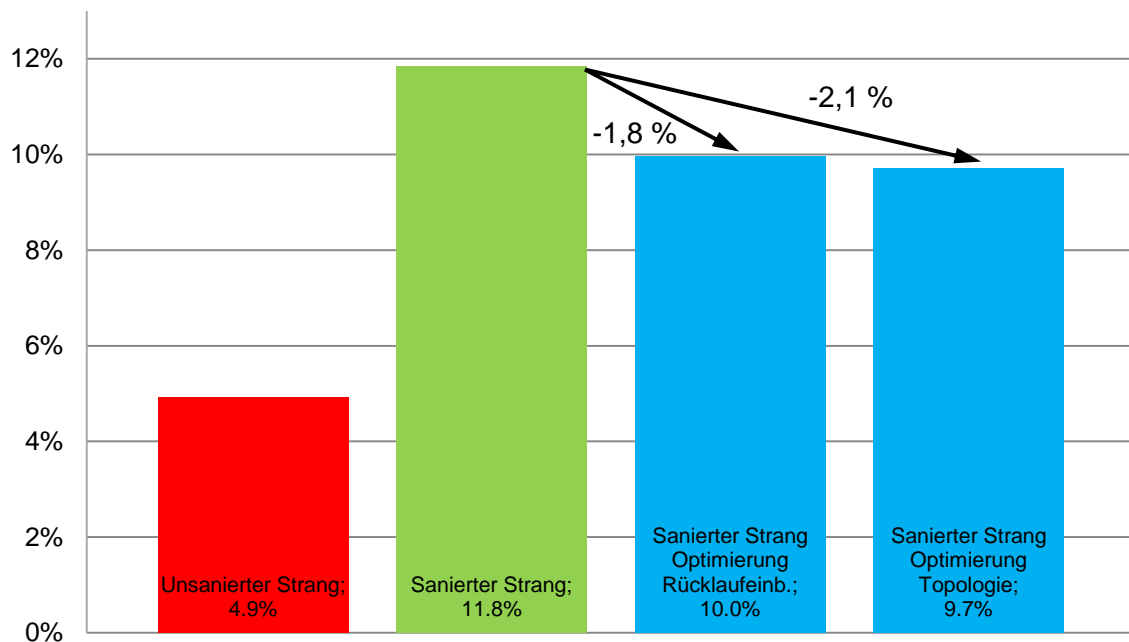


Abbildung 5-6: Balkendiagramm zur Betrachtung der relativen Wärmeverluste bezogen auf die bereitgestellte Wärme

Vergleicht man jedoch die relativen Wärmeverluste des sanierten Strangs mit dem unsanierten Strang fällt auf das selbst nach einer Optimierung des sanierten Strangs, die Wärme im unsanierten Strang wesentlich effizienter bereitgestellt würde. Der Grund für die große Diskrepanz resultiert aus dem geringen Wärmebedarf der sanierten Gebäude. So liegt die Liniendichte im sanierten Strang bei nur  $3110 \text{ kWh}/(a * m)$  während im unsanierten Strang eine Liniendichte von  $16910 \text{ kWh}/(a * m)$  erzielt wird.

In Abbildung 5-7 werden die Einflüsse der Optimierungsstrategien auf den Gesamtstrang Weingarten Süd bewertet. Dazu sind die Wärmeverluste und die kumulierten Massen pro Jahr im derzeitigen Zustand (Ausgangszustand) den Werten aus den Optimierungsstrategien der Simulationsergebnisse gegenübergestellt. Die Prozentzahlen im Balkendiagramm zeigen die

Einsparung des jeweiligen Werts bezogen auf den Ausgangszustand. Mit beiden Optimierungen können sowohl der Wärmeverlust als auch die kumulierte Masse, die von den Pumpen umgewälzt werden muss, reduziert werden. Da die Druckverluste im Netz nicht bekannt sind, kann aus der kumulierten Masse nicht auf die Pumpenenergie geschlossen werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass bei geringer umgewälzter Masse auch die Pumpenenergie gesenkt wird. Die Werte können jedoch nicht quantifiziert werden. Bei gleichem Differenzdruck an den Pumpen und Vernachlässigung der variablen Pumpenwirkungsgrade sinkt die Leistung in dritter Potenz mit Reduzierung des Massenstroms nach den Ähnlichkeitsgesetzen der Strömungsmaschinen [36].

$$\frac{P_2}{P_1} \approx \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}\right)^3 \quad (5.1)$$

Dem großen Einsparpotenzial in der kumulierten Masse bei der Rücklaufeinbindung muss der Mehraufwand durch die größere Massenumwälzung in sanierten Strang auf Grund der geringeren Temperaturspreizung gegenübergestellt werden (siehe Tabelle 5-1). In der Summe ergibt sich dennoch eine leicht reduzierte Gesamtmasse.

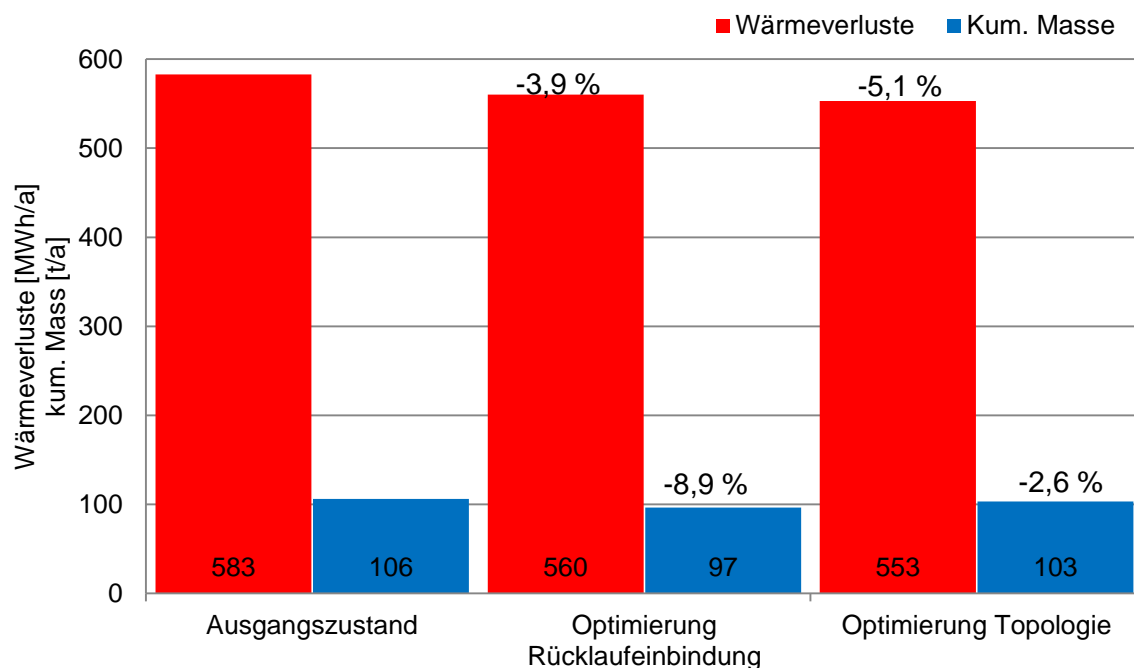


Abbildung 5-7: Balkendiagramm zur Bewertung der Wärmeverluste und kumulierten Massen im Gesamtstrang Weingarten Süd

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der beiden Optimierungsstrategien gegenüber dem derzeitigen Zustand, wird die Differenz der bereitgestellten Wärme pro Jahr berechnet, die benötigt wird um jeweils die gleiche Wärmemengen an den Verbrauchern bereitzustellen. Die Differenz wird dann mit dem Arbeitspreis für die Wärme 0,0656 €/kWh (Stand: Januar 2016) [37] multipliziert. Damit ergibt sich für die Optimierung der Rücklaufeinbindung ein Einsparpotenzial von **2447 €/a** und bei der Netztopologieoptimierung ein Einsparpotenzial von **2351 €/a**.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Erkenntnisse aus dem Vergleich der beiden simulierten Netzoptimierungsstrategien:

- Aus beiden Strategien resultiert bei der Betrachtung des Gesamtstrangs WG Süd ungefähr das gleiche Einsparpotenzial durch die Reduzierung der Wärmeverluste von ca. **2400 €/a**.
- Trotz des gleichen Einsparpotenzials ist die Rücklaufeinbindung zu bevorzugen, da sie zwei wesentliche Vorteile bietet. Zum einen wird durch die Rücklauf Temperaturabsenkung der Exergieverbrauch im Netz um 1,8 % gesenkt, wodurch die Stromproduktion im HKW erhöht werden kann<sup>11</sup> und zum anderen ist die Umsetzung mit geringerem Aufwand und Kosten verbunden, da nur eine punktuell Anpassung im Netz erfolgen muss.
- Die Anpassung der Netztopologie an den sinkenden Wärmebedarf der Gebäude ist nur zu empfehlen, wenn die Rohr alt sind und schlechte Dämmeigenschaften ausweisen, da der Aufwand zur Verlegung neuer Rohrleitung hoch ist. Stattdessen sollte nach Möglichkeit eine Nachverdichtung angestrebt werden, um den Wärmetransport in den Rohrleitungen zu steigern. Durch den sinkenden Wärmebedarf der sanierten Gebäude sind die Rohrleitungen in sanierten Strang derzeit um bis zu vier Nennweiten überdimensioniert (siehe Tabelle 5-3).
- Auch nach der Optimierung würden die Wärmeverluste bei der Wärmebereitstellung im sanierten Strang ca. doppelt so hoch sein, wie die im unsanierten Strang. Maßgeblich dafür verantwortlich ist die 80 % geringere Liniendichte im sanierten Strang auf Grund des niedrigen Wärmebedarfs der Gebäude.

Eine Optimierung der Netzstruktur in Netzsträngen mit sanierten Gebäuden sollte demnach umgesetzt werden, um die Effizienz bei der Wärmebereitstellung zu verbessern. Das alleinige Anpassen der Netzstruktur reicht allerdings nicht aus, um den wirtschaftlichen Betrieb von Nahwärmesystem bei fortschreitender Gebäudesanierung sicherzustellen. Weitere Optimierungsstrategien sollten daher geprüft werden.

---

<sup>11</sup> Der Anteil zwischen Strom- und Wärmeproduktion wird in einer KWK-Anlage maßgeblich durch den Anteil der Exergie beeinflusst, der mit der Wärme an das Fernwärmenetz abgegeben wird. Diese konnte in der Dissertation von Wirths [5] für drei Anlagen bewiesen werden. Je geringer der Anteil der wärmeabgeführten Exergie, desto größer der Anteil der Stromproduktion. Zur Untersuchung dieses Effektes in HKW Freiburg Weingarten müssen zusätzliche Messdaten des HKW ausgewertet werden.

Für das Wärmenetz Freiburg Weingarten sollte die Rücklaufeinbindung als Optimierungsstrategie umgesetzt werden, sobald alle Gebäude im Strang Weingarten Süd saniert sind. Die Sanierung ist nach Sanierungsplan [38] bis zum Jahr 2030 abgeschlossen. Die Einbindung des Strangs WG Süd in den Rücklauf eines anderen Strangs kann dann mit wenig Aufwand in dem HKW direkt am Verteiler der Hauptleitung erfolgen. Um zu ermitteln welcher Strangrücklauf am besten für die Einbindung geeignet ist, sollten in Zukunft an allen Strängen die Rücklauftemperatur separat erfasst werden.



## 6 Zusammenfassung

Eine der zentralen Fragestellungen in der Fernwärmebranche ist die zukünftige wirtschaftliche Wärmebereitstellung unter Berücksichtigung der fortschreitenden Sanierung des Gebäudebestands. Mit Verbesserung der Wärmedämmung nimmt der Wärmebedarf der Gebäude und damit auch der Wärmebedarf im Fernwärmesystem ab. Die Folge sind deutliche höhere Wärmeverluste bezogen auf die bereitgestellte Wärme, da die Wärmeverluste im Verteilnetz ungeachtet des geförderten Enthalpiestroms näherungsweise konstant sind. Bei kleinem Wärmebedarf der Verbraucher ist damit der prozentuale Anteil der Wärmeverlust an der gesamten bereitgestellten Wärme entsprechend groß. Auch im Nahwärmesystem Freiburg Weingarten ist dieses Problem präsent, da im Rahmen eines großangelegten Sanierungsprojekts viele Gebäude im Netz mit modernen Wärmedämmungssystemen ausgestattet wurden. Um Strategien zu entwickeln Nahwärmenetze auch in Zukunft weiterhin wirtschaftlich betreiben zu können hat das Fraunhofer ISE umfangreiche Messdaten zu den einzelnen Gebäuden im Wärmenetz und den Wärmeerzeugern gesammelt.

Schwerpunkt der Arbeit war ein Simulationsmodell zu entwickeln mit dem das thermodynamische Betriebsverhalten des Verteilnetzes Freiburg Weingarten abbildet wird. Zur Simulation der Verbraucher und Erzeuger im Netzmodell sollte auf die Messdaten aus dem Forschungsprojekt zurückgegriffen werden, um einen möglichst realen Betrieb des Netzes abzubilden. Zum Abschluss sollten dann zwei verschiedene Optimierungsstrategien zur Steigerung des wirtschaftlichen Betriebs untersucht und verglichen werden.

Zu Beginn der Arbeit wurde dazu ein Überblick über das thermodynamische Verhalten und die Simulation von Fernwärmenetzen geschaffen. Zudem wurde die Betriebsweise des Nahwärmenetzes Freiburg Weingarten untersucht und beschrieben. Durch die Auswertung der Messdaten und einer Literaturrecherche konnte dann folgende Optimierungsstrategien für das Netz erarbeitet werden:

- Strategie **„Rücklaufeinbindung“**: Eine Möglichkeit die Wärmeverluste im Netz zu reduzieren besteht in der Absenkung des Temperaturniveaus. Dies ist in der Regel jedoch nicht ohne weiteres möglich, da gerade unsanierte Gebäude mit alten Heizungssystemen hohe Vorlauftemperaturen benötigen, um die ausreichend Wärme bereitstellen zu können. Sanierte Gebäude mit modernen Heizungssystemen kommen hingegen mit niedrigen Vorlauftemperaturen aus. Um nur die Temperatur für sanierte Gebäude abzusenken, besteht die Möglichkeit Teilstränge des Netzes, die nur sanierte Gebäude enthalten, in den Netzurücklauf des Gesamtnetzes einzubinden. Dazu wird der Vorlauf des entsprechenden Teilstrangs mit dem Rücklauf des Hauptstrangs verbunden. Nach dem die Verbraucher die Wärme abgenommen haben wird der Rücklauf des Teilstrangs dann wieder mit dem Hauptrücklaufstrang zusammengeführt.

- Strategie „**Anpassung der Netztopologie**“: Durch die Abnahme des Wärmebedarfs sind gerade in Teilsträngen, in denen sich viele sanierte Gebäude befinden, die Rohrleitungen überdimensioniert. Verkleinert man die Rohrdimensionen entsprechend des Wärmebedarfs verringert sich der Wärmeverlust auf Grund der verkleinerten Wärmeübertragungsfläche.

Nachdem die Optimierungsstrategien bekannt waren, wurde das Modell mit dem Simulationsprogramm Dymola/ Modelica entwickelt. Zu Beginn wurde ein Grundmodell entwickelt, das in seiner Struktur dem realen Netz Freiburg Weingarten entspricht. Durch den modularen Aufbau des Gesamtmodells aus Teilmodellen können Optimierungsstrategien leicht implementiert werden. Das Grundmodell wurde mit den Messdaten aus dem Forschungsprojekt validiert. Der Betrachtungszeitraum der Simulation wurde zur Berücksichtigung aller Witterungseinflüsse auf ein Kalenderjahr festgelegt. Da die vorhandenen Messdaten aus dem laufenden Forschungsprojekt lückenhaft sind, wurden diese mit Vergleichswerten aufbereitet und ergänzt. Im Modell werden die Messdaten in stündlicher Auflösung verarbeitet.

Aus der Auswertung der Ergebnisse ergab sich, dass beide Optimierungsstrategien annähernd das gleiche Einsparpotenzial bieten. Unter Berücksichtigung des wirtschaftlichen Aufwandes ist daher die Rücklaufeinbindung zu bevorzugen. Der mechanische Änderungsaufwand in Bezug auf die Anpassung des Rohrsystems ist wesentlich geringer, da lediglich punktuell die Netzstruktur angepasst werden muss. Zudem wird die Energieerzeugung in den BHKWs positiv beeinflusst. Durch das Absenken der Rücklauftemperatur wird der Exergieanteil an den Erzeugern gesteigert. Dies ermöglichte eine Erhöhung der Stromproduktion.

## 7 Literaturangaben

- [1] Schiffers, M., Waschilowski, P. u. Allelein, H.-J.: Sektorenkopplung als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Potenzailanalyse der Kraft-Wärme-Kopplung. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (2017) 09, S. 36–40
- [2] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2015, 2016.  
[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/5\\_datentabelle-zur-abb\\_energieverbrauch-privater-hh-waermezwecke\\_2017-05-08.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/5_datentabelle-zur-abb_energieverbrauch-privater-hh-waermezwecke_2017-05-08.pdf)
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: So heizt Deutschland heute, 2015.  
<https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2015/15/Meldung/infografik-so-heizt-deutschland-heute.html>
- [4] Recknagel, H.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 11/12. München: Oldenburg Verlag 2011
- [5] Wirths, A.: Zur Bewertung der Energieeffizienz von Fernwärmesystemen unter Berücksichtigung des Fernwärmemeterniveaus, Technische Universität Dresden Dissertation. Dresden 2014
- [6] Robbi, S.: LowEx-Fernwärme. Vergleichende Bewertung von Maßnahmen für eine effiziente, multifunktionale Fernwärmeversorgung, Technische Universität Dresden Dissertation. Dresden 2013
- [7] Bargel u. Stefan: Entwicklung eines exergiebasierten Analysemodells zum umfassenden Technologievergleich von Wärmeversorgungssystemen unter Berücksichtigung des Einflusses einer veränderlichen Außentemperatur, Ruhr Universität Bonn Dissertation. Bochum 2010
- [8] Karl, J.: Dezentrale Energiesysteme. Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. Oldenburg Verlag 2012
- [9] Transformationsstrategien Fernwärme. TRAFO - Ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW, Herbert, F., Paar, A. u. Pehnt, M., Dr., Frankfurt am Main 2013
- [10] Beyssat, T.: Vergleich der thermischen Anforderungen an die Trinkwassererwärmung in Europa, Technische Universität Dresden Großer Beleg. Dresden 2010
- [11] Das Wärmenetz als Speicher im Smart Grid: Betriebsführung eines Wärmenetzes in Kombination mit einem stromgeführten Heizkraftwerk, Lorenz, P., 2013
- [12] Trinkwasserverordnung 17.7.2017 I 2615; 17.07.2017. *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch*. [https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv\\_2001/TrinkwV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/TrinkwV.pdf)
- [13] DIN Norm DIN EN 806-2; 06.2005. *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 2: Planung*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-806-2/75468690>, abgerufen am: 16.04.2018
- [14] DIN Norm DIN EN 12831-1:2017-09; 09.2017. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3*; <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-12831-1/261292587>, abgerufen am: 16.04.2018

- [15] Recknagel, V.: Prognose und Optimierung der Fernwärmeeinspeiseleistung unter Berücksichtigung thermisch-instationärer Speichervorgänge im Netz, Technische Universität Berlin Dissertation. Berlin 2012
- [16] Google: Kartendienst. <https://www.google.de/maps/>, abgerufen am: 05.04.2018
- [17] Projektinfo BHKW Freiburg Weingarten, Klaus Schipek, Freiburg 2014
- [18] Dahash, A.: A Comparative Study of Modeling Approaches for District Heating Systems, Hochschule Offenburg Masterthesis. Offenburg 2016
- [19] Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und -Techniken, Umweltbundesamt, 2016
- [20] Weingarten 2020 - Aktueller Stand, Behrens, J. u. Steingrube, A., 2017
- [21] Martin, M.: Messtechnische Untersuchung und Bewertung des Gebäudeenergie-verbrauchs unter Berücksichtigung des Sanierungsstandes und der Gebäudenutzung am Beispiel des fernwärmeversorgten Freiburger Quartiers Weingarten West, Hochschule Trier Bachelorthesis. Hoppstädten-Weiersbach 2017
- [22] Wikipedia: Energieeinsparverordnung.  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Energieeinsparverordnung#Die\\_EnEV\\_2009](https://de.wikipedia.org/wiki/Energieeinsparverordnung#Die_EnEV_2009), abgerufen am: 21.03.2018
- [23] Heizkraftwerk Freiburg Weingarten. Funktionsbeschreibung Wärmeerzeugung, Dütsch, A., 2016
- [24] Operating Instructions. Gas engine 12 V 4000 L63 16 V 4000 L63, MTU Friedrichshafen GmbH, Friedrichshafen 2012
- [25] Zehnle, S. u. Engelmann, P.: Weingarten Strang Süd. Datenbank. 2017
- [26] Zehnle, S. u. Steingrube, A.: Weingarten Heizzentrale Messdaten. Datenbank. 2017
- [27] Statischer Wärme- und Kältezähler T550. Technische Beschreibung, Reimern, 2015
- [28] Mauch, W. u. Gobmaier, T.: Einflüsse der Temperaturspreizung in Nahwärmenetzen -, 2017.  
<https://www.ffe.de/die-themen/speicher-und-netze/184-einfluesse-der-temperaturspreizung-in-nahwaermenetzen->, abgerufen am: 11.04.2018
- [29] Hauptbericht 2016, Schmitz, K. u. Müller, U., Frankfurth am Main 2017
- [30] Perschk, A.: Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden, Technische Universität Dresden Dissertation. Dresden 1999
- [31] Rohrleitungssystem Fernwärme Isoplus. Starre Verbundsysteme, Codil, C., 2011
- [32] Arvid Markert: Einfluss von Substrateigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Böden. Bodenphysikalische Nutzungsaspekte von Erdwärmekollektoren, Technische Universität Berlin Diplomarbeit. Berlin 2012
- [33] Besier, R., Klöpsch, M. u. Wagner, A.: Wirtschaftliche Dämmung von KMR. Reicht für Kunststoffmantelrohre die Standarddämmung heute noch aus?, 2009.  
[https://www.agfw.de/verteilung/aktuelles/wirtschaftliche-daemmung-von-kmr/cal////list/?tx\\_cal\\_controller%5Bgetdate%5D=20171107&cHash=7a5c08d73cc6e4da4fde0ebc06b61bb1](https://www.agfw.de/verteilung/aktuelles/wirtschaftliche-daemmung-von-kmr/cal////list/?tx_cal_controller%5Bgetdate%5D=20171107&cHash=7a5c08d73cc6e4da4fde0ebc06b61bb1), abgerufen am: 02.02.2018
- [34] Forschungsvorhaben Fernwärmemodellstadt Ulm. Exergetische Optimierung der Fernwärmeversorgung Ulm, Zepf, K., Richter, S., Zieher, M. u. Floß, A.

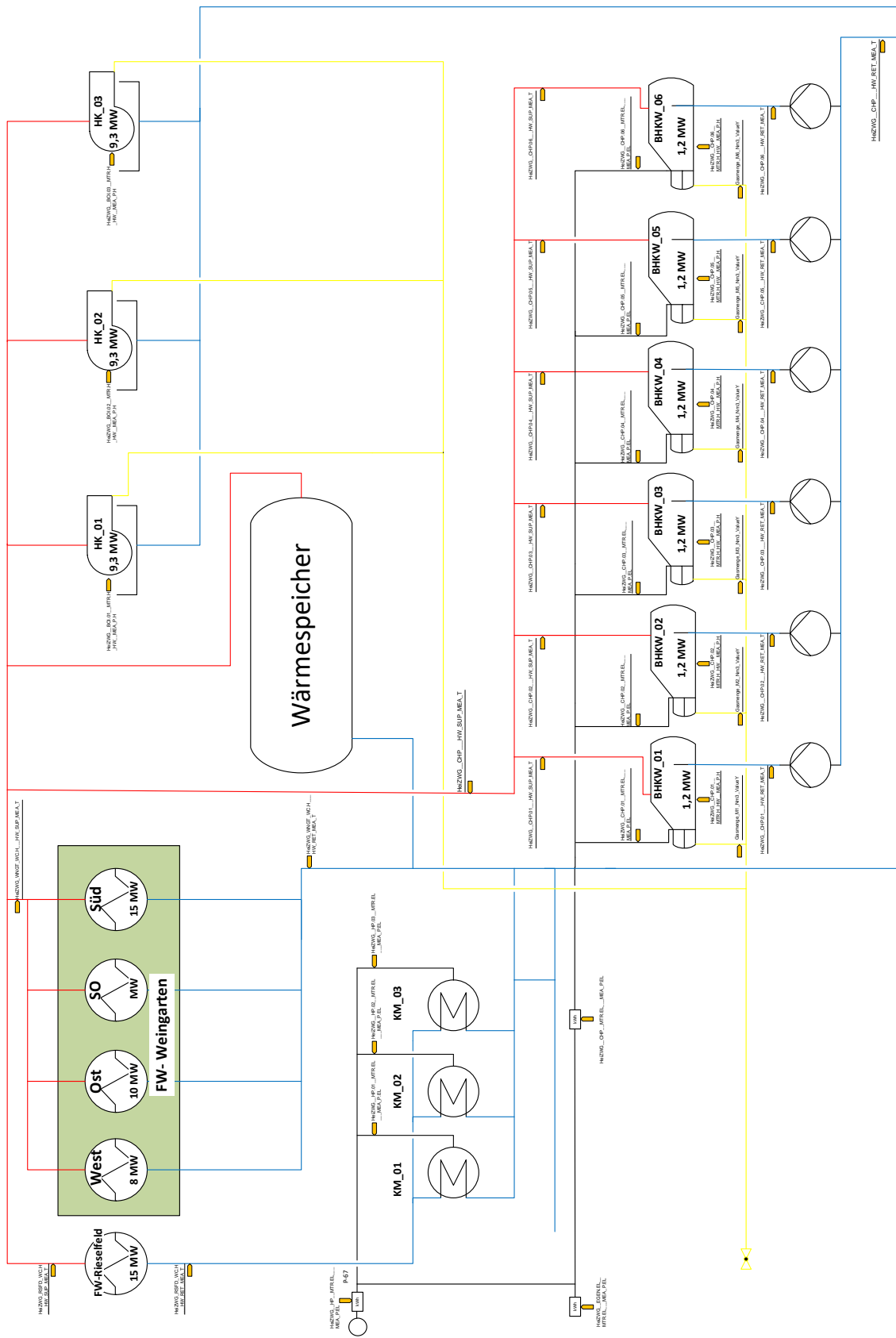
- [35] Wirths, A. u. Fröhlich, K.-P.: Wärmeversorgung aus dem Netzzücklauf. Stand der Technik und Perspektive für die Netzverdichtung
- [36] Vinnemeier, F.: Strömungsmaschinen. Vorlesungsskript, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Vorlesungsskript. Hamburg
- [37] Preisblatt für die Fernwärmelieferung in Freiburg. Preisstand 01. Januar 2016, Dellino, S., Freiburg
- [38] Weingarten 2020. Abschlussbericht EnEff Stadt, Herkel, S., Bachmaier, A., Elci, M., Kagerer, F. u. Narmsara, S.
- [39] Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (CDC). Zugang zu Klimadaten, Offenbach. <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>, abgerufen am: 04.04.2018

## **8 Softwareverzeichnis**

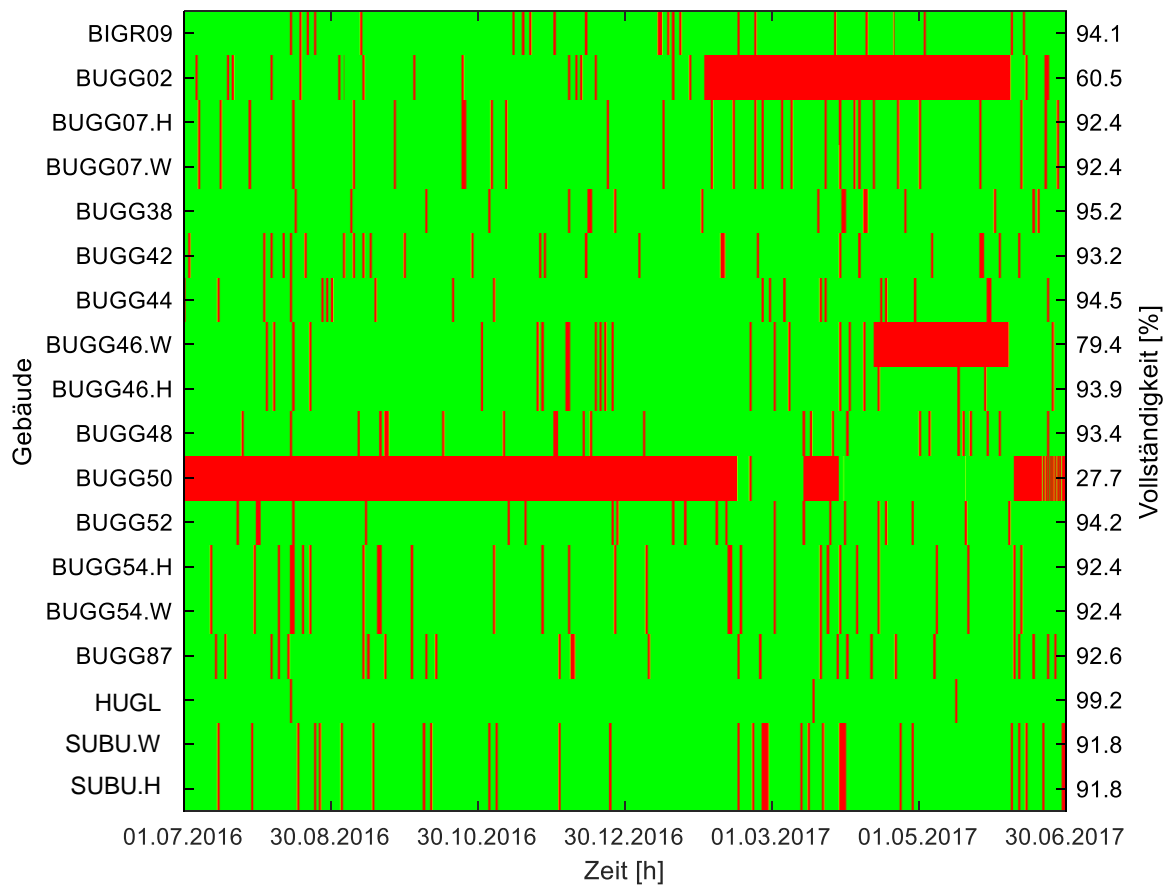
- [A] Dymola Modelica Version 2015 FD01 / 64-bit, 2014-11-04, Dassault Systemes
- [B] MATLAB Version 2017b(9.3.0.713579) / 64-bit, 2017-09-14, Mathworks
- [C] X-Steam for MATLAB, 2006-01-20, Holmgren Magnus, URL: <http://www.x-eng.com/>

# 9 Anhang

## A. Verfahrensfliessbild Heizkraftwerk Freiburg Weingarten

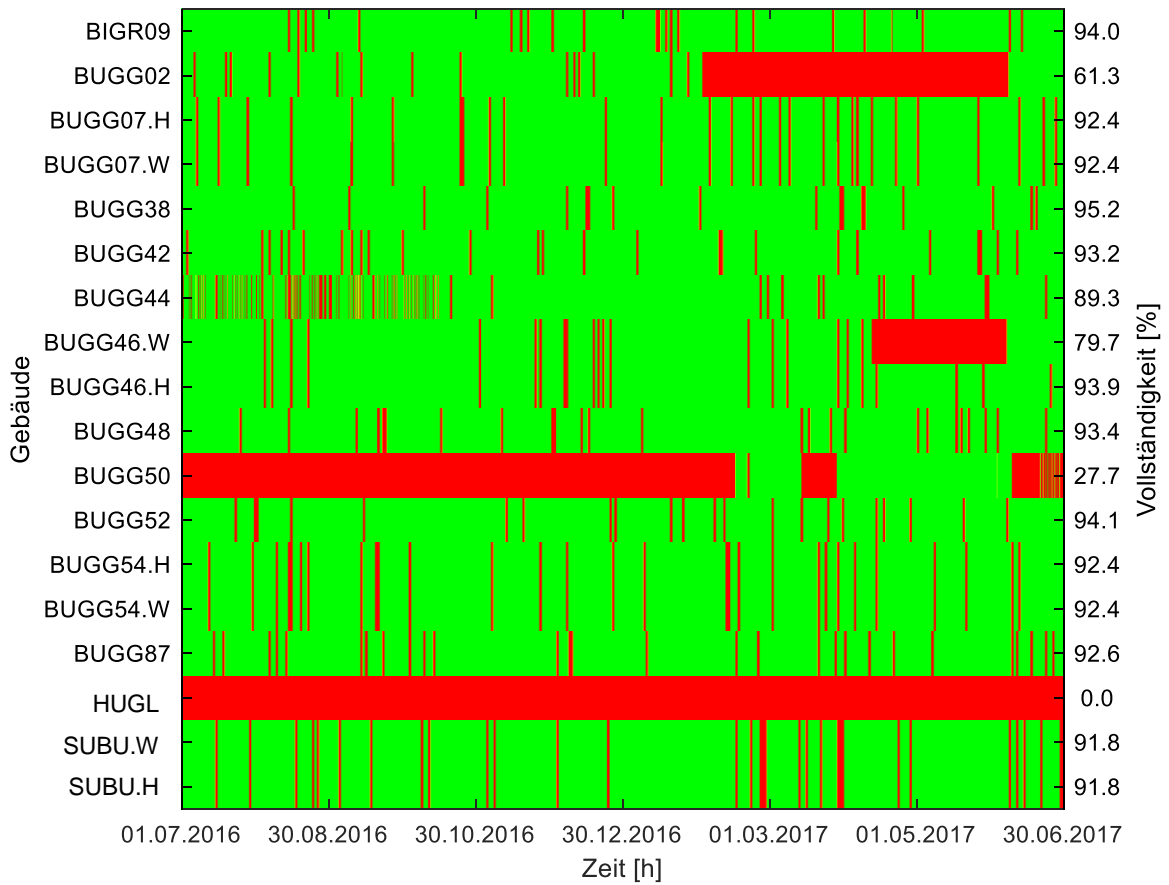


## B. Optische Qualitätskontrolle der Gebäudemessdaten



Messwerte der stündlich gemittelten Rücklauftemperatur der Gebäude im Verteilnetzstrang Weingarten Süd vom 01.07.2016 – 1.7.2017 (1 Jahr)/ Messwert vorhanden = grün/ Messwert nicht vorhanden = rot

### C. Optische Qualitätskontrolle der Gebäudemessdaten



Messwerte der stündlich gemittelten Wärmeleistung der Gebäude im Verteilnetzstrang Weingarten Süd vom 01.07.2016 – 1.7.2017 (1 Jahr)/ Messwert vorhanden = grün/ Messwert nicht vorhanden = rot



## D. MATLAB-Skript zur grafischen Auswertung der Datenlücken

23.03.18 15:21 C:\Work\ISE\Bearbeitun...\Quality\_Check.m 1 of 2

---

```
%Grafischer Qualitätscheck der Messdaten durch eine Rot-Grün-Matrix
%Bearbeiter Hendrik Schweichler

clear all

%Inputdaten
file = 'WG_SUED_Hourly_v2.xlsx';
value = 'MEA_P.H';
%*****
%Daten aus Excel-Datei importieren
[DATA, TXT] = xlsread(file, value);

sz_DATA = size(DATA);
sz_TXT = size(TXT);
%%
%NaN-Werte in Messwertetabelle finden und Zeilen(row) und Spalten (col)
%schreiben
[row, col] = find(isnan(DATA)==1);

% Matrix nach RGB-Farben erstellen. Matrix entspricht der gesamt Zeilen- und
% Spaltenanzahl der Messwertetabelle. Ganz Matrix grün.
PIC(1:sz_DATA(1),1:sz_DATA(2),1) = 0;           %Rot
PIC(1:sz_DATA(1),1:sz_DATA(2),2) = 255;       %Grün
PIC(1:sz_DATA(1),1:sz_DATA(2),3) = 0;         %Blau

%Zeilen und Spalten mit NaN-Werten in Grün-Matrix durch rote Farbe ersetzen
for i = 1:length(row)
    i_row = row(i);
    i_col = col(i);
    PIC(i_row,i_col,1) = 255;
    PIC(i_row,i_col,2) = 0;
end

%Prozentuale Vollständigkeit der Datenreihen errechnen
CNT_N=0;
for j = 1:sz_DATA(2)
    for i = 1:sz_DATA(1)
        if isnan(DATA(i,j))==0
            CNT_N = CNT_N+1;
        end
    end
    N(j,1) = CNT_N/sz_DATA(1)*100;
    CNT_N = 0;
end

N_STR = cellstr(num2str(N, '%2.1f\n'));
N_STR = cellstr(N_STR);

% Grafische Darstellung der Rot-Grün Matrix in Plot

PIC_trans = permute(PIC,[2 1 3]);
f1 = figure;
set(f1, 'defaultAxesColorOrder', [[0 0 0];[0 0 0]]); %Achenfarbe: Schwarz
```

```
% Y-Achse Beschriftung Links
yyaxis left
image(PIC_trans);
Y_TXT = extractBefore(TXT(1,2:sz_TXT(2)), '_');
yticks(1:sz_DATA(2));
yticklabels(char(Y_TXT));
ylabel('Gebäude');

% X-Achsen Beschriftung
X_TXT = extractBefore(TXT([2 1464 2924 4384 5842 7302 8761],1),11);
xticks([1 1460 2920 4380 5840 7300 8760]);
xticklabels(char(X_TXT));
xlabel('Zeit [h]');

% Y-Achse Rechts
yyaxis right
image(PIC_trans);
yticks(1:sz_DATA(2));
yticklabels(char(N_STR));
ylabel('Vollständigkeit [%]')

% Plot Formatierung
set(gca,'FontName','Arial')
set(gca,'FontSize',9)
set(gcf,'Units','centimeters','Position',↙
[0,0,15.5,13.0],'PaperUnits','centimeters','PaperSize',[15.5,13]);

%Export des Plots als Vektor-Grafik(meta) und PDF-Datei
print(f1,strcat(value,'_QC.emf'),' -dmeta')
print(f1,strcat(value,'_QC.pdf'),' -dpdf')
```

## E. MATLAB-Skript zur Aufbereitung der Rohdaten BUGG50

23.03.18 17:05 C:\Work\ISE\Datenban...\RAW\_Data\_BUGG50.m 1 of 2

```
%Zusammenfassung der Rohdaten CSV-Dateien BUGG50 in einer Excel-Tabelle
%Barbeiter: Hendrik Schweichler

clear all

i_m = 1;
%Einlesen der Rohdaten-Dateinamen
files = dir('Rohdaten');
names = {files.name};
c1=1;

Size_names = size(names);

%Einlesen der CSV-Dateien
for i = 3:Size_names(2)
name=strcat('Rohdaten/',names(i));
[M1,M2,M3,M4,M5]= textread(char(name),'%s %s %s %s %s','delimiter',';');

disp(char(name));
M1_SIZE = size(M1);
    for I_FIL = 1:M1_SIZE(1)
        VERGLEICH=char(M3(I_FIL));

%Durchsuche der CSV-Dateien nach den benötigten Messwerten: Wärmeenergie,
%Volumenstrom, Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur Primärseitig.
        switch (VERGLEICH)
            case('WMZ Haupt Energie')
                i_m = i_m+1;
                M(i_m,1:2) = [M1(I_FIL) M2(I_FIL)];
                M(i_m,3) = M4(I_FIL);

            case('WMZ Haupt Volumenstrom')
                i_m = i_m+1;
                M(i_m,1:2) = [M1(I_FIL) M2(I_FIL)];
                M(i_m,4) = M4(I_FIL);

            case('WMZ Haupt VL Temperatur')
                i_m = i_m +1;
                M(i_m,1:2) = [M1(I_FIL) M2(I_FIL)];
                M(i_m,5) = M4(I_FIL);

            case('WMZ Haupt RL Temperatur')
                i_m = i_m +1;
                M(i_m,1:2) = [M1(I_FIL) M2(I_FIL)];
                M(i_m,6) = M4(I_FIL);

        end
    end
end
end
%%
%Export der Rohdaten-Matrix in Excel-Datei

M(1,:) = {'Datum' 'Uhrzeit' 'Energie [kWh]' 'VP [m^3/h]' 'SUP_T [°C]' 'RET_T [°C]'};

xlswrite('BUGG50_Event_DATA.xlsx',M);
```

```
%Homogenisierung der heteorgenen Zeitschritte aus der Rohdaten-Excelltabelle
%Bearbeiter: Hendrik Schweichler
```

```
%Erklärung:
```

```
%Bei den Rohdaten handelt es sich um Event-Daten. Das heißt die Daten
%werden nur auf gezeichnet wenn sie sich zu Vorwert ändern. Durch entstehen
%unterschiedliche Zeitschritte. Für die Simulation müssen jedoch stündliche
%Zeitschritte vorliegen.
```

```
clear all
```

```
%Einlesen der Roh-Daten-Excel-Tabelle
```

```
[DATA, TXT] = xlsread('BUGG50_RAW_DATA');
```

```
Size_DATA = size(DATA);
```

```
j=0;
```

```
%%
```

```
%Wärmestromberechnung aus Energie
```

```
for i = 1:Size_DATA(1)
```

```
    if isnan(DATA(i,2)) == 0
```

```
        j = j+1;
```

```
        Time(j) = DATA(i,1);
```

```
        Energy(j) = DATA(i,2);
```

```
    end
```

```
end
```

```
j = 0;
```

```
DATA(1:Size_DATA(1),6) = NaN;
```

```
for i = 1:length(Time)-1
```

```
    Power(i) = (Energy(i+1)-Energy(i))/(Time(i+1)-Time(i))*3600;
```

```
    %Energy [kWh]/ Time [s]/ Power [kW]
```

```
    col = find(DATA(:,1)==Time(i) & isnan(DATA(:,2))==0);
```

```
    DATA(col,6) = Power(i);
```

```
end
```

```
j_hourly = 0;
```

```
for i = 1:(DATA(Size_DATA(1),1)/3600)
```

```
    LOW_Limit = DATA(1,1)+3600*(i-1);
```

```
    HIGH_Limit= LOW_Limit+3600;
```

```
    find_row = find(DATA(:,1)>=LOW_Limit & DATA(:,1)<=HIGH_Limit);
```

```
%Mittlung des Wärmestroms, des Volumenstrom und der Temperaturen
```

```
%(Arith. Mittelwert)
```

```
Mean_VP = mean(DATA(find_row,3), 'omitnan');
```

```
Mean_SUP_T = mean(DATA(find_row,4), 'omitnan');
```

```
Mean_RET_T = mean(DATA(find_row,5), 'omitnan');
```

```
Mean_Power = mean(DATA(find_row,6), 'omitnan');
```

```
%Zuordnung der Zeit
```

```
TIME = LOW_Limit;
```

```
H_DATA(i,:) = [TIME Mean_Power Mean_VP Mean_SUP_T Mean_RET_T];
```

```
end
```

```
sz_H_DATA = size(H_DATA);
```

```
%Bei den Rohdaten handelt es sich um Event-Daten. Das heißt nur wenn sich
%der Wert innerhalb einer Std ändert wird erneut geloggt. Ist ein Wert
%einer Std NaN und der vorherige und nächste Wert vorhanden wird der
%Wert vorherige Stunde übernommen.

for j = 2:sz_H_DATA(2)
    for i = 2:sz_H_DATA(1)
        if isnan(H_DATA(i,j)) == 1
            if isnan(H_DATA(i-1,j)) == 0
                if isnan(H_DATA(i,2))==0 || isnan(H_DATA(i,3))==0 || isnan(H_DATA(i,4),
4))=0 || isnan(H_DATA(i,5))==0
                    H_DATA(i,j) = H_DATA(i-1,j);
                end
            end
        end
    end
end

%Export stündlichen Messwerte in Excel-Datei
XLS_DATA(1,:) ={'Time [s]' 'Power [kW]' 'VP [m^3/h]' 'SUP_T [°C]' 'RET[°C]'};
XLS_DATA(2:sz_H_DATA(1)+1,:) = num2cell(H_DATA);

delete('BUGG50_Hourly.xlsx')
xlswrite('BUGG50_Hourly.xlsx',XLS_DATA);
```



```

%Stündliche Ausbereitung der Rohdaten BUGG02 und BUGG46.1
%Bearbeiter: Hendrik Schweichler
%Wandelt die Sampled Daten(5min Werte ) in stündliche Daten um
%Alle Daten werden stündlich gemittelt
%Daten werden in zeitsynchronisiert
clear all

%Einlesen der Sampled Daten
[DATA,TXT] = xlsread('BUGG02_sampled_1706');
Size_DATA = size(DATA);

for i = 1:(DATA(Size_DATA(1),2))/3600

    LOW_Limit = 3600*(i-1);
    HIGH_Limit= LOW_Limit+3600;

    find_row = find(DATA(:,2)>=LOW_Limit & DATA(:,2)<=HIGH_Limit);

    %Berechnung der stündlich gemittelten Leistung
    Min_Energy = DATA(min(find_row),3); %Wh
    Max_Energy = DATA(max(find_row),3); %Wh
    Mean_Power = (Max_Energy - Min_Energy)/1000; %kW

    %Berechnung des stündlich gemittelten Volumenstrom
    Min_Volume = DATA(min(find_row),4); %m^3
    Max_Volume = DATA(max(find_row),4); %m^3
    Mean_Flow = Max_Volume - Min_Volume; %m^3/h

    %Mittlung der restlichen Werte
    Mean_SUP_T = mean(DATA(find_row,7));
    Mean_RET_T = mean(DATA(find_row,8));
    Mean_DIFF_T = mean(DATA(find_row,9));

    %Zeit Bestimmung
    TIME = LOW_Limit;
    find_Date = find(DATA(:,2)==TIME);
    Date = TXT(find_Date+1,1);
    %Sammeln der aller berechneten stündlichen Werte in einer Matrix
    Hourly_DATA(i+1,:) = {char(Date) TIME Mean_Power Mean_Flow Mean_DIFF_T Mean_SUP_T
Mean_RET_T};

end

%Matrix Ueberschrift
Hourly_DATA(1,:) = {'Date' 'TIME [s]' 'Mean_Power [kW]' 'Mean_Flow [m^3/h]'
'Mean_DIFF_T[K]' 'Mean_SUP_T[°C]' 'Mean_RET_T[°C]'};

%Ueberfuehrung der Matrix in eine Excel-Tabelle
xlswrite('BUGG02_Hourly_1706.xlsx',Hourly_DATA);

```

## G. MATLAB-Skript zur Bereinigung der Wärmestrom- und Volumenstromdatenlücken

04.04.18 14:07 C:\Work\ISE\Datenbank...\Bereinigung PH.m 1 of 3

---

```
%Datenbereinigung Datenbank Weingarten Sued
%Bearbeiter: Hendrik Schweichler
%Daten werden mit Datenlücken eingelesen. Die Datenlücken (NaN_Werte) werden
%erkannt und mit vorhandenen Daten bei minimal abweichenden
%Tagesmitteltemperaturen zu den gleichen Uhrzeiten eingesetzt. Die
%Eingesetzten Werte werden dann mit der kumulierten Leistung über den
%Datenausfall nomiert, um die Gesamtleistung über Datenlücke prozentual
%auf die Stunden verteilen zu können. Durch Multiplikation der prozentualen
%Verteilung mit der kumulierten Gesamtleistung ergibt sich dann die
%Leistung für jede Stunde.

clear all

%Einlesen der Daten aus Excel-Tabelle
[DATA,TXT] = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_Matlab.xlsx','CALC_P.H');
[OA_T] = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_Matlab.xlsx','OA_MEA_T');
[SUP_T,SUP_T_TXT] = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_Matlab.xlsx','SUP_MEA_T');

sz_DATA = size(DATA);
sz_SUP_T = size(SUP_T);
sz_TXT = size(TXT);

%% Daten Plausibilitätscheck
if sz_DATA(1)~=sz_SUP_T(1) || sz_DATA(2)~=sz_SUP_T(2)
    error('Matrizen unterschiedlich groß');
end

for j = 1:sz_DATA(2)
    for i = 1:sz_DATA(1)
        if DATA(i,j)~=0 && isnan(SUP_T(i,j))==1
            error('NaN-Fehler');
        end
    end
end

for j = 1:sz_TXT(2)
    if strcmp(char(TXT(1,j)),char(SUP_T_TXT(1,j)),6)==0
        error('Unterschiedliche Spaltenreihenfolge');
    end
end

%% Spaltenweise durchlaufen der Rechenoperation
for j_d = 1:sz_DATA(2)
    DATA(:,j_d);

    %Nichtvorhandene Werte in CALC_P.H markieren da in diesem Array nicht
    %vorhandene Werte statt durch nan mit 0 gekennzeichnet sind
    for i = 1:sz_DATA(1)
        if isnan(SUP_T(i,j_d)) == 1 && DATA(i,j_d) == 0
            DATA(i,j_d) = NaN;
        end
    end
end

%Daten Sortieren in 24h Interwall
i = 0;
```



```

    for k = 1:365
        for j = 1:24
            i = i+1;
            DATA_24(j,1:2,k) = OA_T(i,1:2); %Zeit/Temperatur
            DATA_24(j,3,k) = DATA(i,j_d); %Volumenstrom der Spalte j
        end
        DATA_24(1,4,k) = mean(DATA_24(:,2,k));
    end
i = 0;
sz_DATA_24 = size(DATA_24);
%% 24h Intervalle finden in den NaN Daten in den mindestens ein NaN-Wert ist
[col,val] = find(isnan(DATA_24(:,3,:))~=1);
NaN_val = unique(val);
N_val = 1:sz_DATA_24(3);

for i=1:length(NaN_val)
    N_val = N_val(N_val~=NaN_val(i));
end

%Aufteilung der 24h Intervalle nach NaN-Daten und Number_Daten(N)
N_DATA_24 = DATA_24(:, :, N_val);
sz_N = size(N_DATA_24);

%% Minimale Temperaturdifferenz zwischen NaN und N 24h Interval finden
for i_val = 1:sz_DATA_24(3)

Mean_OA_T_NaN = DATA_24(1,4,i_val);
Diff = abs(Mean_OA_T_NaN-N_DATA_24(1,4,:));
[min_Dis,index] = sort(Diff);

%NaN-Daten in 24h Interwall ersetzten durch N-Daten aus einem vollständigen
%24 Interwall mit der geringsten Umgebungstemperaurabweichung
for i_repl=1:24
    if isnan(DATA_24(i_repl,3,i_val))==1

        DATA_24(i_repl,3,i_val) = N_DATA_24(i_repl,3,index(1));
    end
end
end

%Zusammenfügen der 3D-Teilmatrizen NaN_DATA_24 & N_DATA_24 zu einer
%vollständig zeitlich geordneten 2D Matrix
row_low = 1;
for i_2 = 1:sz_DATA_24(3)
    row_high = row_low+23;
    DATA2(row_low:row_high,j_d) = DATA_24(:,3,i_2);
    row_low = row_low+24;
end

%Ersetzte 24h Interwalle nomieren und mit dem kummulierten Wert Multiplizieren
%Danach Werte in die Datenmatrix DATA2 schreiben
i_nom = 0;
for i_DATA2 = 1:sz_DATA(1)-1
    if isnan(SUP_T(i_DATA2,j_d))==1 && isnan(SUP_T(i_DATA2+1,j_d))==1
        i_nom = i_nom+1;
    end
end

```

```
NOM(i_nom,1) = DATA2(i_DATA2,j_d);
NOM(i_nom+1,1) = DATA2(i_DATA2+1,j_d);

elseif isnan(SUP_T(i_DATA2,j_d))==1 && isnan(SUP_T(i_DATA2+1,j_d))==0
    i_nom = i_nom+1;
    NOM(i_nom,1) = DATA2(i_DATA2,j_d);
    NOM2 = DATA2(i_DATA2+1,j_d);

    Sum_NOM = sum(NOM);
    for i = 1:length(NOM)
        NOM(i,1) = NOM(i,1)/Sum_NOM*NOM2;
    end
    NOM(length(NOM)+1,1) = NOM(length(NOM),1);
    col_low = i_DATA2+2-length(NOM);
    col_high = i_DATA2+1;
    DATA2(col_low:col_high,j_d) = NOM(:,1);
    NOM = [];
    i_nom = 0;
end

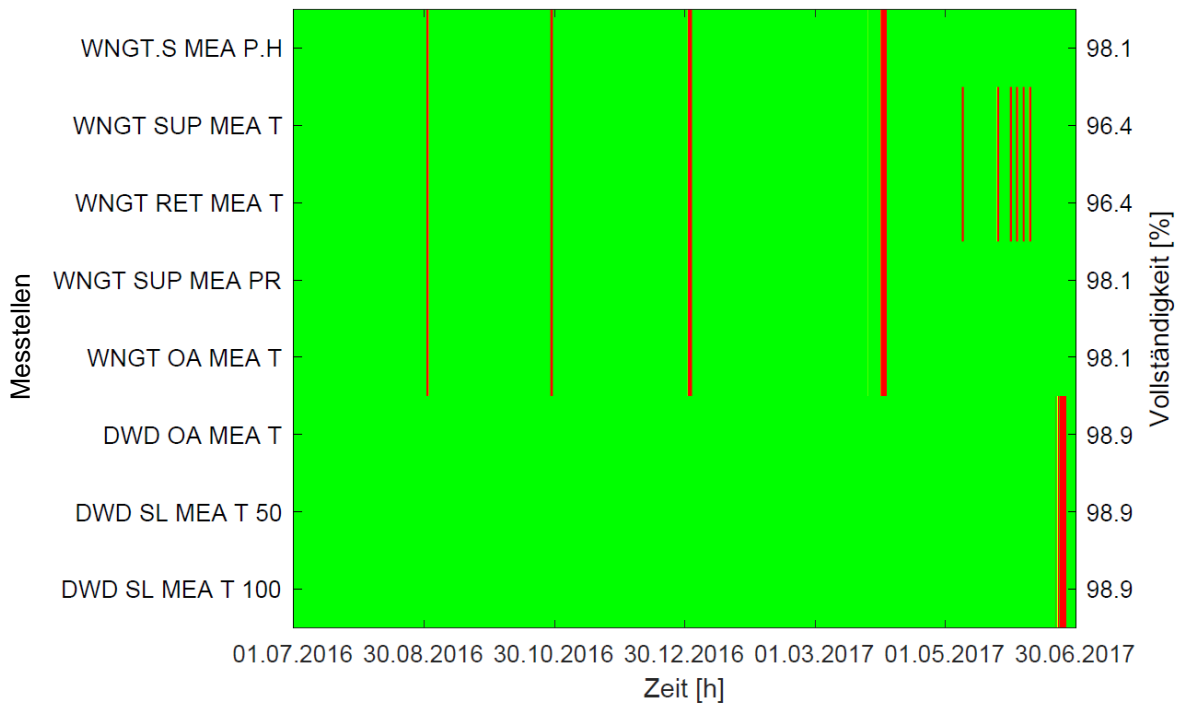
end

end

%% Excel Matrix vorbereiten und schreiben mit Überschrift und Zeitstempel
DATA2 = num2cell(DATA2);
sz_TXT = size(TXT);
XLS_DATA = TXT;
XLS_DATA(2:sz_TXT(1),2:sz_TXT(2)) = DATA2;

xlswrite('WG_SUED_Hourly_Bereinigt.xlsx',XLS_DATA,'CALC_P.H');
```

## H. Optische Qualitätskontrolle der HKW-Messdaten und der DWD-Messdaten

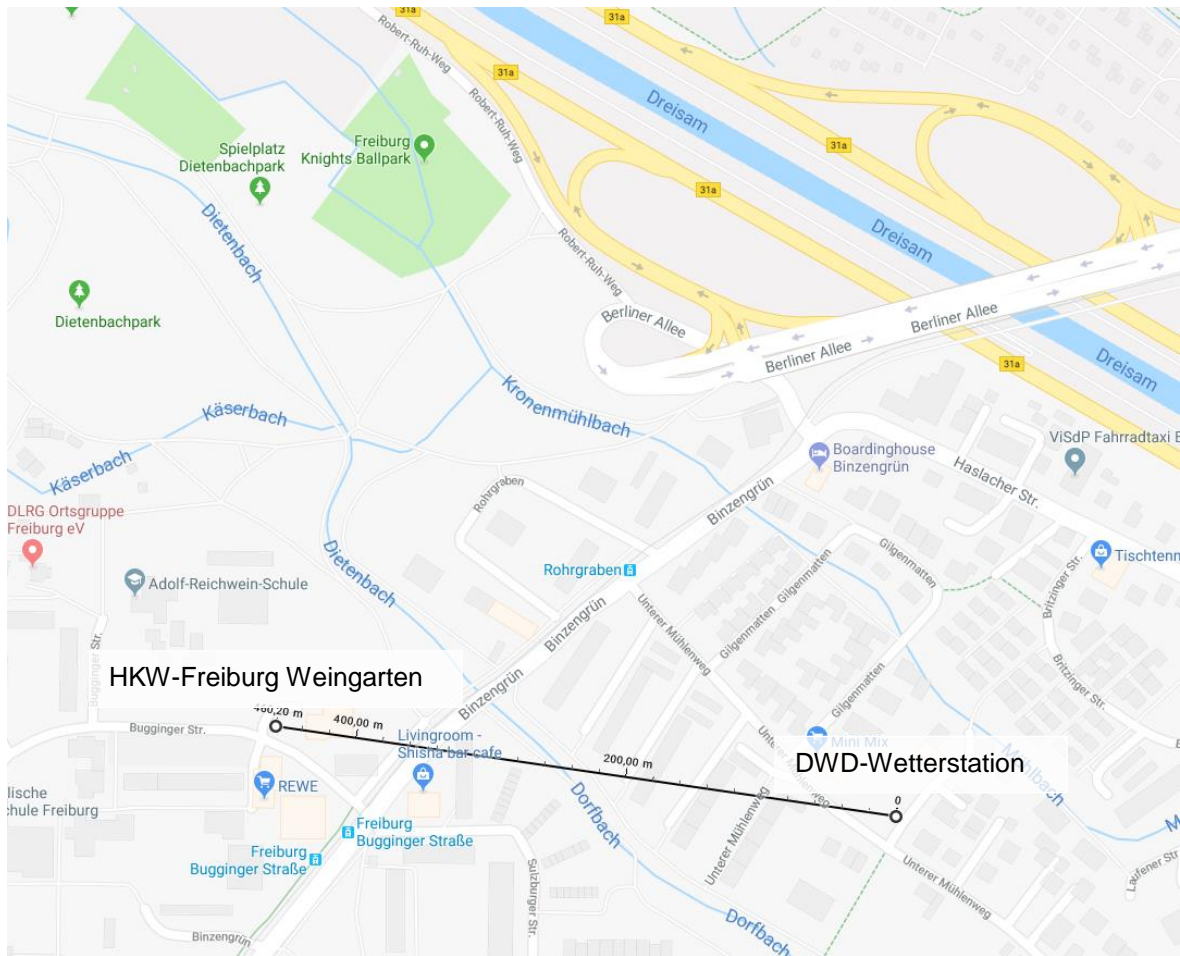


Im Diagramm sind in rot die Datenlücken der einzelnen Messreihen gekennzeichnet. An der linken Ordinate sind die Namen der Messstellen aufgetragen: Die Abkürzungsaufschlüsselung ist wie folgt:

WNGT = Daten vom HKW Freiburg Weingarten; DWD = Daten des Deutschen Wetterdienst;  
 MEA = Messwerte; SUP = Vorlauf; RET = Rücklauf; SL = Erdboden; P.H = Thermische Leistung;  
 T = Temperatur; PR = Druck; 50 = Erdreichtiefe 50 cm; 100 = Erdreichtiefe 100 cm

An der Abszisse ist der betrachtete Messzeitraum vom 01.07.16 00:00 – 01.07.17 00:00 aufgetragen.

## I. Entfernung des HKW Freiburg von der DWD-Wetterstation



Die Entfernung (Luftlinie) zwischen dem HKW-Freiburg Weingarten und der DWD-Wetterstation beträgt 460,2 m. Die Entfernungsmessung und das Bild stammt von Google Maps [16].

Name	Ort
HKW-Freiburg Weingarten	Bugginger Str. 85, 79114 Freiburg
DWD-Wetterstation Nr. 01443	48°00'11.9"N 7°51'20.9"E <sup>12</sup> [39]

<sup>12</sup> Koordinaten in Grad, Minuten, Sekunden

## J. MATLAB-Skript zur Bereinigung der Vorlauftemperatur Messreihen

08.04.18 18:42 C:\Work\ISE\Datenb...\Bereinigung SUP T.m 1 of 1

---

```
%Datenbereinigung Datenbank Weingarten Sued Vorlauftemperatur
%Bearbeiter: Hendrik Schweichler
%Die Datenlücken(NAN-Werte) werden erkannt und durch Daten mit minimal
%Abweichender Außentemperatur ersetzt

clear all

%Daten aus Excel-Datei einlesen
[SUP_T,TXT] = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v2.xlsx','SUP_MEA_T');
OA_T = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v2.xlsx','OA_MEA_T');

sz_SUP_T = size(SUP_T);
sz_TXT = size(TXT);
sz_OA_T = size(OA_T);

for j = 1:sz_SUP_T(2)
%NaN-Daten aus SUP_T Matrix finden
col_nan = find(isnan(SUP_T(:,j))==1);
col_n = 1:sz_SUP_T(1);
col_n = col_n(~col_nan);

%Minimum Werte zwischen Außentemp(OA_T) NaN-Zeile und vorhandenen Werte
%finden
    for i = 1:length(col_nan)
        OA_T_nan(length(col_n)) = OA_T(col_nan(i));
        [min_value,min_col] = min(OA_T_nan-OA_T(col_n));
        % Daten vorhandener Werte in NaN-Zeilen kopieren
        DATA(nan_col(i),j) = SUP_T(min_col(1),j);
    end
end
plot(DATA(:,1))
XLS_DATA = TXT;
XLS_DATA(2:sz_TXT(1),2:sz_TXT(2)) = num2cell(DATA);
%% Daten in Excel-Tabelle schreiben
xlswrite('WG_SUED_Hourly_Bereinigt.xlsx',XLS_DATA,'SUP_MEA_T');
```

## K. MATLAB-Skript zur Bereinigung der Rücklauftemperatur Messreihen

04.04.18 14:42 C:\Work\ISE\Datenb...\Bereinigung RET T.m 1 of 2

```
%Datenbereinigung Datenbank Weingarten Sued
%Hendrik Schweichler
%Die fehlenden Rücklauftemperaturen werden durch den ersten Hauptsatz
%anhand der Leistung, des Volumenstroms und der Vorlauftemperatur berechnet
%Die Stoffdaten Wärmekapazität und Dichte werden in Abhängigkeit der
%Temperatur bei einem konstanten Druck von 5ba5 mit dem Skript XSteam
%berechnet.

clear all

%Einlesen der Excel-Dateien
[RET_T,TXT] = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v3.xlsx','RET_MEA_T');
SUP_T = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v3.xlsx','SUP_MEA_T');
VP = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v3.xlsx','CALC_VP');
P_H = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v3.xlsx','CALC_P.H');
OA_T = xlsread('Input\WG_SUED_Hourly_v2.xlsx','OA_MEA_T');

sz_RET_T = size(RET_T);
sz_TXT = size(TXT);
sz_SUP_T = size(SUP_T);
sz_VP = size(VP);
sz_P_H = size(P_H);

%Plausibilitätscheck
if sz_RET_T(1)~=sz_SUP_T(1) || sz_VP(1)~=sz_P_H(1) || sz_RET_T(1)~=sz_P_H(1)
    error('Matrizengrößen unterschiedlich')

elseif sz_RET_T(2)~=sz_SUP_T(2) || sz_VP(2)~=sz_P_H(2) || sz_RET_T(2)~=sz_P_H(2)
    error('Matrizengrößen unterschiedlich')
end

for j = 1:sz_RET_T(2)
    for i = 1:sz_RET_T(1)
        if isnan(SUP_T(i,j))==1
            error('NaN-Wert in Matrix SUP_T')
        end
    end
end

for j = 1:sz_RET_T(2)
    for i = 1:sz_RET_T(1)
        if isnan(VP(i,j))==1
            error('NaN-Wert in Matrix VP')
        end
    end
end

for j = 1:sz_RET_T(2)
    for i = 1:sz_RET_T(1)
        if isnan(P_H(i,j))==1
            error('NaN-Wert in Matrix P_H')
        end
    end
end
end
```

```

%%
% NaN-Werte in Matrix RET_T finden und durch den LHS anhand der gegebenen
% Größen Volumenstrom (VP), Wärmeleistung (P_H) und Vorlauftemperatur
% (SUP_T) berechnen
RET_T_2 = RET_T;
for j = 1:sz_RET_T(2)
    for i = 1:sz_RET_T(1)
        if isnan(RET_T(i,j))==1
            RHO = XSteam('rho_pT',5,SUP_T(i,j));
            c_p = XSteam('Cp_pT',5,SUP_T(i,j));
            if VP(i,j) == 0
                RET_T_2(i,j) = SUP_T(i,j);
            else
                RET_T_2(i,j) = SUP_T(i,j)-(P_H(i,j)/(VP(i,j)/3600*RHO*c_p));
            end
        end

        if isnan(RET_T_2(i,j)) == 1
            error('NaN nach Berechnung')
        end
    end
end
plot(RET_T_2(:,1));

XLS_RET_T = TXT;
XLS_RET_T(2:sz_TXT(1),2:sz_TXT(2)) = num2cell(RET_T_2);
XLS_SUP_T = TXT;
XLS_SUP_T(2:sz_TXT(1),2:sz_TXT(2)) = num2cell(SUP_T);
XLS_VP = TXT;
XLS_VP(2:sz_TXT(1),2:sz_TXT(2)) = num2cell(VP);
XLS_P_H = TXT;
XLS_P_H(2:sz_TXT(1),2:sz_TXT(2)) = num2cell(P_H);

%% Schreiben der bearbeiteten Daten in Exceldatei
xlswrite('WG_SUED_Hourly_Bereinigt_v2.xlsx',XLS_RET_T,'RET_MEA_T');
xlswrite('WG_SUED_Hourly_Bereinigt_v2.xlsx',XLS_SUP_T,'SUP_MEA_T');
xlswrite('WG_SUED_Hourly_Bereinigt_v2.xlsx',XLS_VP,'CALC_VP');
xlswrite('WG_SUED_Hourly_Bereinigt_v2.xlsx',XLS_P_H,'CALC_P.H');

```

## L. Technische Spezifikationen der Rohrleitungen

Bezeichnung Modell- bezeichnung	Rohrleitung				Isolierung			
	Nennweite DN [mm]	Aussend. [mm]	Wandstärke [mm]	Länge [m]	Isolierungs- material	Leitungs- typ	Isolierungs- sd. [mm]	Leitungs- kategorie
DN25_DR_1	25	33.7	3.2	36.5	PUR- Schaum	Doppelro- hr	140	Hausanschluss
DN40_DR_1	40	48.3	3.2	13.2	PUR- Schaum	Doppelro- hr	180	Hausanschluss
DN40_ER_1	40	48.3	3.2	32.6	PUR- Schaum	Einzelroh- r	110	Hausanschluss
DN50_DR_1	50	60.3	3.2	19.4	PUR- Schaum	Doppelro- hr	225	Hausanschluss
DN50_DR_2	50	60.3	3.2	9.8	PUR- Schaum	Doppelro- hr	225	Hausanschluss
DN50_DR_3	50	60.3	3.2	9.8	PUR- Schaum	Doppelro- hr	225	Hausanschluss
DN50_ER_1	50	60.3	3.2	18.4	PUR- Schaum	Einzelroh- r	140	Hausanschluss
DN50_ER_2	50	60.3	3.2	11.3	PUR- Schaum	Einzelroh- r	140	Hausanschluss
DN50_DR_4	50	60.3	3.2	10.7	PUR- Schaum	Doppelro- hr	225	Hausanschluss
DN50_DR_5	50	60.3	3.2	7.2	PUR- Schaum	Doppelro- hr	250	Hausanschluss
DN50_DR_6	50	60.3	3.2	93.7	PUR- Schaum	Doppelro- hr	200	Hausanschluss
DN65_DR_1	65	76.1	3.2	76.6	PUR- Schaum	Doppelro- hr	250	Hausanschluss
DN80_DR_1	80	88.9	3.2	47.6	PUR- Schaum	Doppelro- hr	250	Verteilleitung
DN80_DR_2	80	88.9	3.2	79.1	PUR- Schaum	Doppelro- hr	250	Verteilleitung
DN80_DR_3	80	88.9	3.2	18.3	PUR- Schaum	Doppelro- hr	250	Hausanschluss
DN80_DR_4	80	88.9	3.2	134.8	PUR- Schaum	Doppelro- hr	280	Verteilleitung
DN125_DR_1	125	139.7	3.6	11.9	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_2	125	139.7	3.6	41.8	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_3	125	139.7	3.6	17.9	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_4	125	139.7	3.6	26.9	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_5	125	139.7	3.6	23.4	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_6	125	139.7	3.6	23.4	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_7	125	139.7	3.6	29.2	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Hauptleitung
DN125_DR_8	125	139.7	3.6	123.4	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Verteilleitung
DN125_DR_9	125	139.7	3.6	122.9	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Verteilleitung
DN125_DR_10	125	139.7	3.6	40.0	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Verteilleitung
DN125_DR_11	125	139.7	3.6	60.0	PUR- Schaum	Doppelro- hr	450	Verteilleitung

)  
Folgende technische Eigenschaften gelten für alle Rohrleitungen in der Tabelle:

- Wärmeleitfähigkeit 0,027 W/(m\*K) bei einer Referenztemperatur von 50°C
- Rohrrauigkeit 0,15 mm
- Verlegungstiefe mit einer Überdeckung von 0,8 m
- Baujahr 2010





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Schweichler

Vorname: Hendrik

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Simulationsgestützte Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Nahwärmenetze

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

\_\_\_\_\_  
Ort

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original