



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Werner
und
Proj-Ass. Dipl.-Ing. Thomas Fellner

E302

Institut für Energietechnik und Thermodynamik
eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Johannes Nagler

Matr.Nr: 0716436
Wiesberggasse 2/22
1160Wien

Wien, im Juli 2014

I. Vorwort

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während meines Studiums und im Rahmen meiner Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein Dank geht an erster Stelle an die Herren Prof. Dr. Andreas Werner und Dipl.-Ing. Thomas Fellner für die vielen Stunden der Besprechungen und die liebevolle Unterstützung bei meiner Diplomarbeit.

Auch den Informationslieferanten Bernhard Kronberger und Elke Hilby der Firma *Voigt+Wipp Industrial Research* sei an dieser Stelle gedankt.

Ein besonderer Dank gilt auch Sabrina und Veronika, welche mich bei meiner Diplomarbeit fachlich unterstützt haben. Ihnen sei für ihren Einsatz und ihr Herzblut gedankt. Ihre Arbeit war mir eine große Hilfe und hat mir einiges an Ressourcen erspart.

Und wo wäre ich ohne der Unterstützung meiner Familie insbesondere meiner Eltern und meiner Schwester. Danke an Evi und Manfred und Magdalena für die mentale und finanzielle Unterstützung während meines Studiums.

II. Zusammenfassung

Die Idee Wärmeenergie zentral zu erzeugen und dann über ein Verteilernetz an Abnehmer zu distribuieren wurde bereits in der Antike genutzt. Das Grundprinzip dabei hat sich seitdem nicht verändert, wohl aber die technologische Umsetzung. Heute wird die Energie in Form von warmem oder heißem Wasser über ein Rohrnetz an die Verbraucher verteilt.

Durch die große Anzahl an existierenden Netzen wird es immer wichtiger ebendiese in Simulationen von Heizkraftwerken mit einzubinden um dadurch die Systemgrenzen der Simulation auszuweiten.

Heute steht eine Vielzahl an Softwarepaketen zur Verfügung, welche dazu dienen thermodynamische Problemstellungen zu modellieren. Welches unter ihnen ist aber das geeignetste um ein gesamtes Netz dynamisch zu simulieren? Mit anderen Worten: Welches der Simulationsprogramme schafft es mit ausreichender Genauigkeit (angemessene Modellbildung) und doch in relativ kurzer Zeit ein Fernwärmenetz zu simulieren?

Hier wurde das Simulationspaket Matlab/Simscape auf die Bewältigung dieses Trade-Offs zwischen Simulationsgenauigkeit und Simulationsdauer geprüft. Der erforderliche Zeitaufwand für die Simulation sollte hier 5% der simulierten Zeit nicht überschreiten. Die Simulation eines Tages sollte also weniger als eine Stunde und 12 Minuten erfordern.

Hauptziel dieser Arbeit war es erstens geeignete Inputdaten für die Simulation eines Fernwärmenetzes wie verbraucherseitige Leistungsabnahmefunktionen zur Verfügung zu stellen und zweitens ein Modell in Simscape zu schaffen, welches sodann die Simulation für einen beliebigen Tag des Jahres vornimmt. Als Ergebnisse liefert die Simulation einen Netzwirkungsgrad, erforderliche Kessel- und Pumpenleistungsverläufe, Netzverluste, das Temperatur- und Druckfeld des Netzes, Verbraucherinformationen wie Vorlauf- und Rücklauftemperatur sowie Massenstromverläufe. Besonderer Wert wurde auf eine möglichst geringe Anzahl an Inputparametern und einen hohen Automatisierungsgrad gelegt.

Erstellt wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Komponentenbibliothek mit Blöcken, welche die einzelnen Komponenten wie Rohrleitungen und Wärmeübergabestationen eines Fernwärmenetzes repräsentieren.

Auf das Verbraucherverhalten der Großverbraucher wurde besonderer Wert gelegt. Beruhend auf historischen Messdaten und Außentemperaturaufzeichnungen wird eine Methode entwickelt die den Wärmebedarfsverlauf eines beliebigen Tages des Jahres ermittelt.

Um die Anforderungen bezüglich Simulationszeiten einhalten zu können wurde eine Methode zur Netzvereinfachung angewandt und in Excel und Matlab implementiert. Diese Netzaggregation vermindert die Anzahl an Verbrauchern und Rohrelementen im Netz und beschleunigt somit indirekt die Simulation. Da diese Netzvereinfachung mit einem Fehler einhergeht, wurde zusätzlich eine Methode entwickelt, die es erlaubt, den Fehler in erforderlicher Kessel- und Pumpenleistung abzuschätzen.

Output dieser Arbeit ist ein Simulationstool, welches vollautomatisch Verbraucherfunktionen ermittelt, die Netztransformation durchführt, das betrachtete Fernwärmenetz simuliert und die daraus erhaltenen Ergebnisse visualisiert. Bei Bedarf kann die Simulation für Planungszwecke (offline) oder als regelungstechnisches Instrument (online) eingesetzt werden.

III. Abstract

In the last decades the number of biomass fueled district heating networks has increased, and will gain importance in the next years due to legislative changes. However, good working tools for a proper simulation of the heat demand and distribution have not yet been developed in Simscape. Thus, the aim of this thesis is to test the software Matlab/Simscape in performing a simulation of a district heating network, keeping the simulation time short with good simulation accuracy. Furthermore, the maximum allowed time in performing the simulation of the network and the components in the power plant is targeted to 5% of the simulated time period.

First, a library of block-components representing the elements of such a network is developed. In order to perform the dynamic simulation a method was developed to determine the arbitrary daily heat load curve of main customers (e.g. hotels). It is based on historical data and the ambient temperature.

To keep simulation time short an aggregation method was applied to the network. The resulting deviation between original and equivalent network in energy efficiency and required boiler and pump power is estimated.

Outcome of this thesis is a fully automated Simscape-model of an existing district heating network in Austria which determines heat loads, required power plant energy demands and simulated customer data like temperatures, required mass flow and pressure drop.

IV. Inhalt:

I. VORWORT	I
II. ZUSAMMENFASSUNG.....	III
III. ABSTRACT	V
IV. INHALT	VII
V. NOMENKLATUR.....	IX
1. EINLEITUNG	1
1.1. ALLGEMEIN	1
1.2. GESCHICHTLICHES.....	1
1.3. EINTEILUNG NACH DEM WÄRMETRÄGER.....	2
1.4. NETZSYSTEME.....	4
2. AUFGABENSTELLUNG.....	5
2.1. ALLGEMEINES	5
2.2. ANLAGENBESCHREIBUNG GROßARL.....	7
2.2.1. HEIZWERK	7
2.2.2. NETZ.....	8
2.2.3. VERBRAUCHER	11
2.3. FRAGESTELLUNGEN	12
3. MODELLBILDUNG.....	15
3.1. ÜBERBLICK MATLAB/SIMSCAPE	15
3.2. THERMAL_LIQUID-LIBRARY	16
3.3. CUSTOM-LIBRARY DIHE_COMPONENTS	18
3.4. KOMPONENTENMODELLE.....	20
3.4.1. ROHRMODELL	20
3.4.2. VERBRAUCHERMODELLE	23
3.4.2.1. EIN-/MEHRFAMILIENHAUS	27
3.4.2.2. HOTEL.....	29
3.4.2.3. INDUSTRIEVERBRAUCHER	34
3.4.3. MODELL ÜBERGABESTATION.....	34
3.4.4. MODELL ÜBERGABESTATION AM NETZENDE.....	37
3.4.5. NETZENDE	37
3.4.6. ERZEUGERMODELLE (KESSEL + PUMPE)	38
3.5. FUNKTIONSWEISE SOLVER.....	39
3.6. ANSÄTZE NETZVEREINFACHUNG.....	40
3.6.1. ÜBERBLICK METHODEN	40
3.6.2. NETZAGGREGATION NACH LARSEN ET AL.....	43
4. MODELL FERNWÄRMENETZ GROßARL.....	46
4.1. NETZTRANSFORMATION.....	46
4.1.1. CLUSTERUNG DES NETZES	46
4.1.2. VORGEHENSWEISE.....	47
4.2. ÜBERBLICK MODELL IN SIMSCAPE	49
4.2.1. SYSTEM	50
4.2.2. CLUSTER	52
4.2.3. VERBRAUCHER	53
4.2.3.1. ORIGINALER VERBRAUCHER.....	54
4.2.3.2. TRANSFORMIERTER VERBRAUCHER.....	55
4.2.4. VERMASCHUNG EINES TEILBEREICHES DES NETZES	55
4.3. SIMULATION	57
4.3.1. INPUTPARAMETER.....	59
4.3.2. PREPROCESSING	60
4.3.2.1. ERMITTLUNG DER LEISTUNGSVERLÄUFE.....	61
4.3.2.2. NETZTRANSFORMATION.....	62
4.3.2.3. ERMITTLUNG DER LEISTUNGSVERLÄUFE DER VEREINFACHTEN VERBRAUCHER	63

4.3.2.4.	DETERMINIERUNG DER FINALEN LEISTUNGSVERLÄUFE INKL. STATIONÄRER VORLAUFPHASE.....	64
4.3.2.5.	EINLESEN DER ROHRGEOMETRIEN	65
4.3.2.6.	ERMITTLUNG DER STARTWERTE DER MASSENSTRÖME IN DEN WÄRMEÜBERGABESTATIONEN.....	66
4.3.3.	NETZSIMULATION	67
4.3.4.	POSTPROCESSING	68
4.3.4.1.	ANPASSEN DES TEMPERATURFELDES IM NETZ.....	68
4.3.4.2.	HEIZWERK: INFORMATIONEN.....	69
4.3.4.3.	SCHLECHTPUNKTVERBRAUCHER: INFORMATIONEN	71
4.3.4.4.	DRUCK- UND TEMPERATURFELD IM NETZ	71
5.	SIMULATIONSERGEBNISSE	72
5.1.	NETZVEREINFACHUNG.....	72
5.1.1.	VERGLEICH ORIGINALMODELL - VEREINFACHTES MODELL	75
5.1.2.	FEHLERENTWICKLUNG	78
5.2.	UNTERSUCHUNG DER NETZ-ZEITKONSTANTE	80
5.3.	SZENARIENANALYSE	81
5.3.1.	REFERENZFALL.....	82
5.3.2.	SZENARIO 1	85
5.3.3.	SZENARIO 2	88
5.3.4.	SZENARIO 3	91
5.3.5.	SZENARIO 4	94
5.3.6.	VERGLEICH	97
6.	DISKUSSION	100
6.1.	NETZVEREINFACHUNG.....	100
6.2.	SIMULATION	100
6.3.	WEITERFÜHRENDE BETRACHTUNGEN.....	103
6.3.1.	TRANSFORMATION	103
6.3.2.	VERBRAUCHERFUNKTIONEN.....	103
6.3.3.	HEIZWERKSEITIGE KOMPONENTEN.....	104
6.3.4.	SIMULATIONSSOFTWARE	105
7.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	106
8.	TABELLENVERZEICHNIS	108
9.	QUELLENACHWEIS	109
10.	ANHANG A	A-1
11.	ANHANG B : LEITFADEN ZUR NETZVEREINFACHUNG	B-1

V. Nomenklatur:

Verwendete Abkürzungen und Indizes

a, i ... außen-, innen-

BHKW, HW... Blockheizkraftwerk, Heizwerk

d... Tag, täglich

F ... Fluid

ges ... gesamt-

HA... Hausanschluss

ISO... Isolierung

K ... Kessel

M... Messwert

MR... Mediumrohr, Fluid führendes Rohr

N ... Netz

P, S ... primär-, sekundär-

P, PE, PA... Pumpe, Pumpe Eingang, Pumpe Ausgang

R... Rohr

S ... Erdreich

SP... Schlechtpunktverbraucher

TS... Teilsystem

V... Verlust

VB ... Verbraucher

VERBRAUCHERFUNKTION, -KURVE... zeitlich abhängige Wärmeentnahme des Verbrauchers aus dem Fernwärmenetz

VF... Verbrauchersfunktion,

VL, RL... Vorlauf, Rücklauf

WUEST, WÜST ... Wärmeübergabestation

Formelzeichen

\dot{Q} ...	Wärmestrom	[W], [kW], [MW]
P ...	Leistung	[W], [kW], [MW]
ϑ ...	Temperatur	[°C]
p ...	Druck	[bar], [mbar]
Δp ...	Druckdifferenz	[bar], [mbar]
μ ...	Massenstrom in der Hauptleitung	[kg/s]
\dot{m} ...	Verbrauchermassenstrom	[kg/s]
λ ...	Wärmeleitfähigkeit	[W/m.K]
c_p ...	spezifische isobare Wärmekapazität	[J/kg.K]
\dot{V} ...	Volumenstrom	[m ³ /s]
$d_{a,i}$...	Außendurchmesser, Innendurchmesser	[m]
l ...	Rohrlänge	[m]
$\alpha_{i,a}$...	Wärmeübergangskoeffizient innen, außen	[W/m ² .K]
ρ ...	Dichte	[kg/m ³]
H ...	Förderhöhe (Pumpe)	[m]
η ...	Wirkungsgrad	[-]
v, w ...	Fluidgeschwindigkeit	[m/s]
E ...	Energie- bzw. Arbeitsgröße	[kWh]
φ ...	Maß für Methodvalidierung Netzvereinfachung	[-]
A ...	Querschnittsfläche	[m ²]
ζ ...	Druckverlustbeiwert	[-]
ξ ...	Rohrwiderstandsbeiwert	[-]

1. Einleitung

1.1. Allgemein

Mit dem Grundgedanken, dass zentrale Wärmeerzeugung im größeren Maßstab und anschließende Verteilung derselben in einem Rohrsystem effizienter erfolgt, als die dezentrale Wärmeerzeugung jedes Wärmeverbrauchers war die Idee der Fernwärme geboren. In früheren Zeiten, wo Wärmeerzeugung noch hauptsächlich durch die Verbrennung von Kohle erfolgte, war dies oftmals mit Luftverschmutzung verbunden. Auch der Wunsch die Luftqualität durch die Reduktion der Anzahl der Feuerstellen zu verbessern nährte den Wunsch nach zentraler Wärmeerzeugung und -bereitstellung. Gepaart mit der Minimierung des Sicherheitsrisikos durch Gefahren wie Brände und Rauchgasvergiftungen wurden Fernheizwerke vielfach am Rande von Ballungszentren errichtet und die erzeugte Wärmeenergie mit einem Wärmeträgermedium - meist Wasser oder Dampf - zu den jeweiligen Verbrauchern geführt. Die Notwendigkeit eines dafür notwendigen Netzes liegt auf der Hand.

Auch heute noch befinden sich Kraftwerke, die die Wärmeerzeugung übernehmen, bedingt durch das im Menschen verankerte negative Empfinden von Schornsteinen und Rauchgasen aber auch wegen Sicherheitsaspekten immer noch am Rande von Ballungszentren. Vielleicht hat dieser Umweltaspekt mitunter zum Ausbau von Fernwärmeversorgungsanlagen und damit zum Siegeszug der Fernwärme in den letzten Jahrzehnten beigetragen.

Auch der mögliche Einsatz von kostengünstigeren Brennstoffen wie z.B. Müll in KWK-Kraftwerken und die hohen Versorgungssicherheiten durch die Möglichkeit mehrere Kessel abwechselnd zu benutzen, macht Fernwärme attraktiv.

1.2. Geschichtliches

Die Idee, zentral zur Verfügung stehendes (erhitztes) warmes Wasser mittels Rohrleitungssystemen zu verteilen, damit es an räumlich weiter entfernten Orten genutzt werden kann, wurde bereits vor mehr als 2000 Jahren in römischen Thermen angewendet [1]. Um Becken und/oder Flächenheizungen mittels warmen Wassers zu beheizen, wurden erste Versorgungsleitungen gelegt. Auch findet man im alten China sowie im osmanischen Reich ähnliche Anlagen [2].

Das weltweit erste bekannte städtische Wärmenetz ist jenes der französischen Kleinstadt Chaudes Aigues aus dem 14. Jh. Dort wurden geothermische Quellen genutzt und das warme Wasser mittels Holzleitungen verteilt [3], [2].

Auch die Idee Dampf als Wärmeträgermedium zu nutzen ist keineswegs neu. Bereits im 17. Jh. wurde angedacht Gewächshäuser mittels Dampfnetzen mit heißem Dampf zu versorgen. James Watt beheizte 1784 seine Bürogebäude mit Abdampf aus seiner Dampfmaschine [4].

Das erste konventionelle Fernwärmenetz ging 1878 in Lockport, New York mit anfänglich 14 Verbrauchern in Betrieb [5]. Später wurden auch industrielle Großverbraucher an das ca. 5km lange Dampfnetz angeschlossen. Die Dampf führenden Eisenrohre wurden damals mit Asbest, Filz und Papier isoliert und in einer mit Sägespänen gefüllten Holzschachtel in einer Tiefe von ca. einem Meter verlegt.

In Österreich ist der Anteil an mit Fernwärme versorgter Wohnungen von ca. 83.000 im Jahr 1980 mittlerweile auf ca. 765.000 (Stand 2011) angestiegen, was einem Anteil von 21% entspricht [6]. Besonders im städtischen Bereich mit hoher Verbraucherdichte macht Fernwärme große Anteile an der Gesamtenergieversorgung aus. Demnach sind es in Linz 60%, Wien 36%, Klagenfurt 30%, Graz 26% und Salzburg 23%. Die von insgesamt 650 Unternehmen erzeugten 14.000 GWh Wärmeenergie (2011) werden in einem insgesamt 4.400 km langen Netz verteilt.

Wärmeenergie wird in Österreich hauptsächlich durch Kraft-Wärme-Kopplungen bereitgestellt (70-75%), wobei diese Kraftwerke größtenteils mit Erdgas betrieben werden [6]. Der Rest kommt aus der Verbrennung von Hausmüll und Biomasse. Verschwindend gering ist der Anteil der Wärmegestehung aus der durch die Stahlerzeugung anfallenden Gase wie Kokerei-, Gicht- und Tiegelgas.

1.3. Einteilung nach dem Wärmeträger

Fernwärmenetze lassen sich nach dem Wärmeträger in folgende 3 Klassen unterteilen [7]:

- Heißwasser mit Temperaturen bis 110°C
- Heißwasser mit Temperaturen über 110°C
- Dampf

Die Unterscheidung der ersten beiden erfolgt nach technischen Gegebenheiten wärmeerzeugungsseitig und Sicherheitsaspekten.

In den Anfängen der Fernwärmewirtschaft wurden Fernwärmenetze vielfach mit Dampf betrieben, zumal dieser die Hauptrolle in Kraftwerksprozessen spielte und somit relativ einfach ausgekoppelt werden konnte. Im Laufe der Zeit stellte sich jedoch heraus, dass die Effizienz bei Verwendung von

Dampf als Wärmeträgermedium im Vergleich zur direkten Verstromung kraftwerksseitig in Dampfturbinen ungleich niedriger war. Ein höherer Wirkungsgrad bei der Ausnutzung primärer Energiequellen mit Heißwasser als Wärmetransportmedium und deutlich höhere Bau-, Instandhaltungs- und Wartungskosten wegen der anfallenden Kondensationseinheiten bei Dampfnetzen führten dazu, dass in den 60er und 70er Jahren immer mehr bestehende Dampfnetze auf Heißwassernetze umgerüstet wurden [8]. Verstärkt wurde diese Tendenz auch durch die bei Dampfbetrieb anfallenden höheren Kosten bei Anschlüssen von Neukunden und das beschränkte Ausbaupotenzial insgesamt sowie durch teurere Rohrleitungen und Verlegesysteme. Auch ist kraftwerksseitig die Eingliederung von Niedertemperaturwärme (z.B.: Rauchgaskondensation, Wärmepumpeneinsatz) und eine effektive Kraft-Wärmekopplung besser durch eine niedrigere Temperatur des Wärmetransportfluids möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Fernwärmenetze mit Heißwassertemperatur unter 110°C betrachtet.

Die neuesten Tendenzen im Fernwärmeversorgungsbereich gehen immer mehr in Richtung tieferer Temperaturen. Die skandinavischen Länder Dänemark und Island starteten in den letzten Jahren Forschungsprojekte, die den Einsatz von Niedrigtemperaturfernwärme genauer betrachten sollten. So wird zum Beispiel in [9] ein Pilot-Niedrigtemperaturfernwärmenetz mit Vor- und Rücklauf-temperatur von $55^{\circ}\text{C}/25^{\circ}\text{C}$ untersucht. Nach den Autoren werden, unter Anbetracht der Tatsache, dass zukünftig immer mehr Häuser Niedrigenergiestandards und damit verbundene Niedrigtemperatur-Flächenheizungen aufweisen, die existierenden Fernwärmenetze mit den aktuellen Betriebsbedingungen nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können. Low-Temperature District Heating Systems (LTDH) werden in skandinavischen Ländern, wo der Fernwärmeanteil bereits 80-90% der Gesamtwärmeenergieversorgung ausmacht, besonders hohes Potential zugeschrieben. Anpassungen von bestehenden Fernwärmeversorgungsanlagen an LTDH sind angedacht und beinhalten Maßnahmen wie Senkung der Vorlauf- und Rücklauf-temperaturen und Verminderung des netzseitigen Wärmeverlustes durch Einsatz kleinerer Rohrquerschnitte. Svend Svendsen kam unter anderem in [10] zur Erkenntnis, dass zusätzliche Pumpenstromkosten verursacht durch höhere Druckverluste der kleineren Rohre durch die verminderten Wärmeverluste überkompensiert werden.

Bedingt durch den hohen Einsatz von Geothermie und den damit verbundenen niedrigen Kosten in der Wärmeerzeugung ist in einem anderen skandinavischen Land, Island, die Nutzung von Niedrigtemperaturfernwärme bereits stark verbreitet. Die Wasserqualität des dort verwendeten Wärmeträgermediums ist so hoch, dass das Wasser teilweise nicht in geschlossenen Kreisläufen zirkuliert, sondern am Verbraucher nach Gebrauch im Wärmetauscher direkt ins Grundwasser geleitet wird.

1.4. Netzsysteme

Der Standort der Wärmequelle/n des Fernwärmenetzes, also des Fernheizwerks oder BHKWs, ist neben dessen Größe ein ausschlaggebender Faktor, der das Netzsystem (auch Netzstruktur oder -form) determiniert. Ebendieses kann eine der folgenden Formen aufweisen [11]:

- Strahlennetz
- Ringnetz
- Maschennetz

Während Strahlennetze, bei denen es sich um Linienversorgung handelt, insbesondere bei kleineren und mittleren Fernwärmenetzen eingesetzt werden, werden Ringnetze und Maschennetze bei einer hohen Anzahl an Anschlüssen und der damit verbundenen hohen Wärmeverbraucherichte eingesetzt. Den Vorteilen des Strahlennetzes, wie kleinere Rohrleitungsdurchmesser sowie die kürzest mögliche Trassenlänge und damit niedrigerer Investitionskosten stehen Nachteile wie Versorgungssicherheit sowie beschränktes Ausbaupotential durch die gegebenen (bereits verlegten) Rohrleitungen gegenüber. Bei diesem Netzsystem ist es jedoch möglich die Anzahl an Werkabgängen zu variieren, wodurch die Leitungsquerschnitte sinken und die (gebietsweise) Regelbarkeit verbessert wird.

Ring- und Maschennetze erweisen sich besonders im urbanen Bereich wegen der oben erwähnten erhöhten Verbraucherichte als vorteilhaft. Auch eignen sich diese Netzsysteme besser, wenn mehrere Wärmequellen zur Verfügung stehen. Die Versorgungssicherheit wird erhöht, da jeder Verbraucher zumindest von zwei Seiten mit Wärme versorgt werden kann. Nachteilig wirken sich die größeren Rohrquerschnitte sowie die längere Trassenführung aus. Bei Schäden am Verteilungssystem müssen hier nur kleine Teilbereiche außer Betrieb genommen werden.

Bei besonders großen Netzen erfolgt zudem noch die Unterteilung in Primär- und Sekundärnetze. Das Primärnetz, welches meist als Maschennetz ausgeführt und von mehreren Wärmequellen versorgt wird, wird dabei mit höheren Drücken und Temperaturen gefahren als das Sekundärnetz. Über Netzkoppelstationen oder Umformerstationen erfolgt dann die Wärmeübergabe vom Primär- auf das Sekundärnetz. Druck und Temperatur im Sekundärnetz werden so angepasst, dass der direkte Anschluss von Hausumformerstationen möglich ist. Diese Vorgehensweise ermöglicht dem Netzbetreiber eine bessere gebietsweise Regelung der Wärmeerzeugung und -verteilung. Historisch bedingt wurden Fernwärmenetze, die vorher als eigenständige Netze betrieben wurden als Sekundärnetze in den Fernwärmeverbund eingegliedert und damit die wirtschaftlichere Erschließung ganzer Versorgungsgebiete ermöglicht.

2. Aufgabenstellung

2.1. Allgemeines

Im Rahmen des aus Mitteln des Klima-und Energiefonds (KLIEN) geförderten Forschungsprojektes bioEPCS (Biomass Energy Performance Control System) soll eine Fernwärmeversorgungsanlage mittels Simulation der einzelnen Komponenten Kessel, Wärmespeicher, Pumpen, Wärmepumpen, ORC-Anlage, Rauchgaskondensation und Fernwärmenetz möglichst realitätsnahe abgebildet werden. Projektziel ist "die Erarbeitung eines intelligenten, modellbasierten Regelungskonzepts für Biomasse-Wärmenetze inklusive Validierung des Konzepts anhand des Biomasseheizkraftwerk Großarl", [12].

In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, ein bestehendes Netz physikalisch abzubilden und dynamisch zu simulieren. Angewendet wird diese Methode auf ein bestehendes Fernwärmenetz. Das gewählte Simulationswerkzeug ist das Programmpaket Matlab/Simulink/Simscape. Ziel der Arbeit ist zusätzlich herauszufinden, inwiefern sich diese Software und insbesondere die Komponentenbibliothek "thermal_liquid", die seit der Matlab-Version 2013b zur Verfügung steht, zur Simulation von Rohrnetzwerken eignet.

Besondere Beachtung wird dabei der für die Simulation benötigten Rechenzeit geschenkt. Diese soll einen vorher festgelegten Prozentsatz (5%) der simulierten Zeit nicht überschreiten. Um diese Vorgaben einzuhalten, ist es unter anderem notwendig die Anzahl der Rohrelemente und Verbraucher im Netz zu reduzieren. Dafür wird eine Methode der Netzaggregation angewendet und deren Ergebnisse mit denen des ursprünglichen Systems verglichen (siehe Kap.3.6 ff.).

Um das Verbraucherverhalten zu determinieren, wird insbesondere für größere Verbraucher wie z.B. Hotels, eine Methode entwickelt, welche es erlaubt, Jahres-Verbraucherfunktionen aufgrund historischer Daten und Außentemperaturen zu eruieren. Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise werden anschließend als Simulations-Verbraucherfunktionen dem Simscape-Modell zur Verfügung gestellt.

Das Ergebnis der Netzsimulation soll als Grundlage der Anlagenregelung dienen und zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Gesamtanlage beitragen. Der Primärbrennstoffeinsatz soll bei ausreichender Versorgungssicherheit aller Wärmekunden minimiert werden. Der Einsatz der Netzsimulation ist sowohl als online-Simulationstool für die Kesselregelung als auch als offline-Simulationswerkzeug zur Untersuchung der Auswirkungen von Änderungen betriebsbestimmender Parameter und Netzgeometrien (Erweiterungen, Ringschlüsse, usw.) vorgesehen.

Abb. 2.1 stellt die Vorgehensweise des Forschungsprojektes bioEPCS dar. Das in dieser Arbeit simulierte Fernwärmenetz und die Fernwärmeverbraucher bilden neben der Stromerzeugung, den Kesselanlagen und den thermischen Speichern das Hardware-Fundament der Simulation des Gesamtsystems.

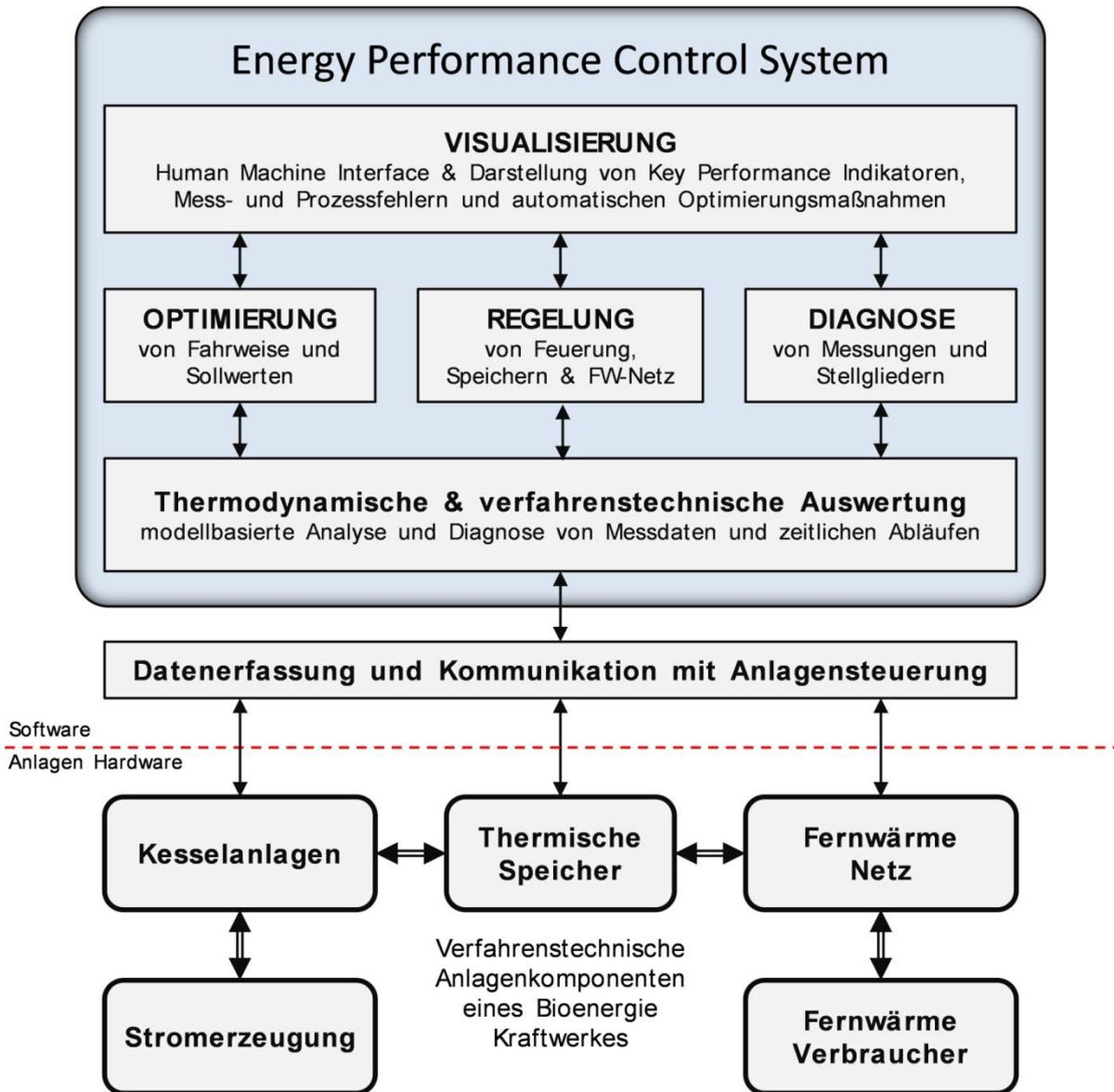


Abbildung 2.1: Überblick bioEPCS

2.2. Anlagenbeschreibung Großarl

Das in dieser Arbeit betrachtete Fernwärmenetz ist jenes des Fernheizwerkes Großarl im Pongau in Salzburg, Österreich, welches seine Kunden seit 1989 mit Wärme versorgt. Diese Anlage wird im Rahmen des Forschungsprojektes *bioEPCS* als Pilotanlage betrachtet und mit verschiedenen Simulationswerkzeugen abgebildet, um anschließend Optimierungspotentiale auszuloten und zu implementieren. Die Validierung der Simulationsergebnisse kann im Anschluss mithilfe realer Betriebsdaten erfolgen.

2.2.1. Heizwerk

Die Wärmebereitstellung erfolgt im Fernheizwerk Großarl durch drei Kessel: Zwei Biomassekessel mit ca. 1,45 und 3,45 MW Leistung sowie einen Spitzenlast- /Reservekessel (ca. 4,75 MW), der mit Heizöl-Extra-Leicht befeuert wird. Die parallel geschalteten Kessel werden je nach Bedarf zu- oder abgeschaltet. Mit dem erwärmten Wasser wird ein Pufferspeicher (48m³) geladen, der die Aufgabe hat Wärmeerzeuger- und Wärmeverteilerseite voneinander zu entkoppeln und möglicherweise auftretende nachfragebedingte Netzspitzen abzuflachen. Die Anlage ist darüber hinaus noch mit einer Rauchgaskondensationsanlage ausgestattet, die auch als Entschwadungsanlage fungiert.

Überschüssige Wärmeenergie (unten gemessene Temperatur im Pufferspeicher wird zu groß) wird bei Bedarf über einen Tischkühler an die Umgebung abgeführt.

Das Fernheizwerk verfügt zusätzlich über ein ORC-Modul mit einer Leistung von 600 kWel, welches direkt aus einem zusätzlichen Kohlbach-Biomassekessel über eine Thermoölanlage mit Wärme versorgt wird. Das Kondensationsmodul der ORC-Anlage ist an den Pufferspeicher angeschlossen und liefert dadurch einen Beitrag zur Gesamtwärmeerzeugung für das netzseitige Wärmeträgerfluid.

Die Anzahl der Netzpumpen ist drei, es kommen parallelgeschaltete drehzahlveränderliche Kreiselpumpen zum Einsatz. Die verbraucherseitige Regelung der Primärvolumenströme führt zu einer geringeren Wasser-Umwälzung in den Sommermonaten. Die Regelung der Netzpumpen ist deshalb besonders wichtig, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet. Das Ergebnis der Netzsimulation soll unter anderem dabei helfen den Trade-Off zwischen den Kostenposten Pumpenstrom und Primärbrennstoffeinsatz zu optimieren.

Die folgende Abbildung 2.2 visualisiert (vereinfacht) die Hauptkomponenten des Fernheizwerks Großarl:

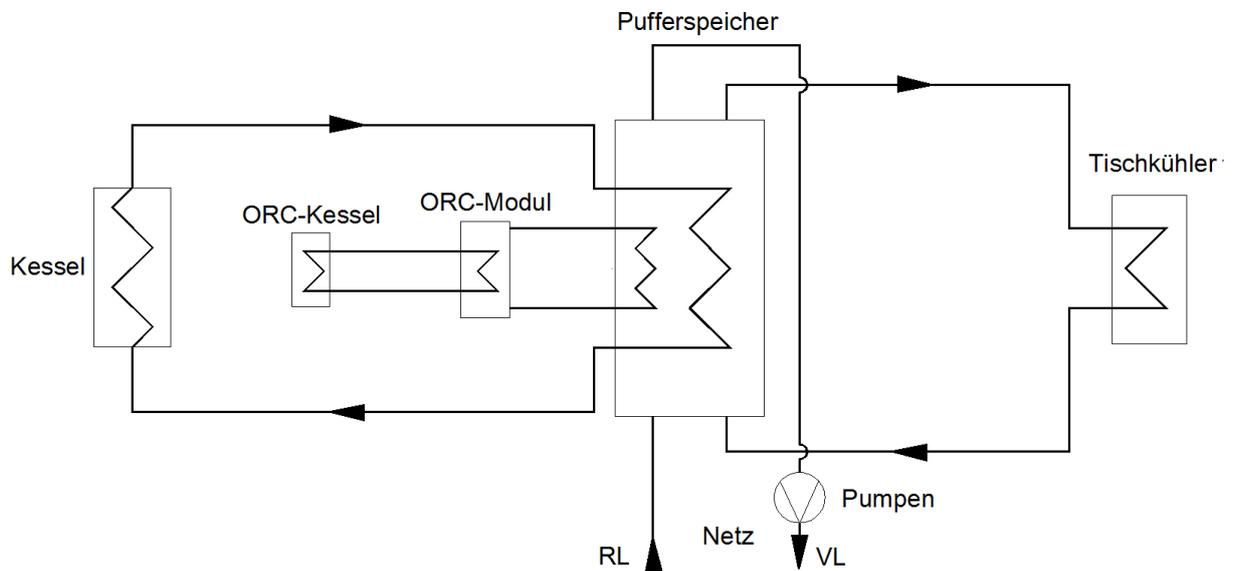


Abbildung 2.2: Fernheizwerk Großarl: Blockschaltbild (vereinfacht)

2.2.2. Netz

Bei dem Fernwärmenetz in Großarl handelt es sich um ein klassisches Strahlennetz. Die Anzahl der fernheizwerksseitigen Abgänge ist zwei, wobei einer dieser beiden Abgänge betriebsintern für Holztrochnungsanlagen verwendet wird. Hier wird nur der zweite betrachtet, welcher die einzelnen Verbraucher im Ort mit Wärme versorgt. Die folgende Abbildung 2.3 visualisiert das Netz mit dem Fernheizwerk am linken Bildrand (rot) und dem Schlechtpunktverbraucher am rechten Netzende (blau):

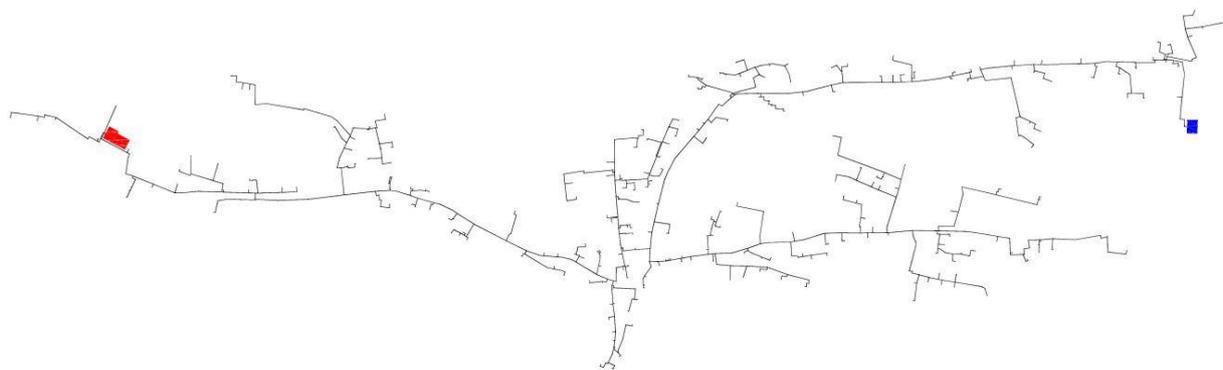


Abbildung 2.3: Fernwärmenetz Großarl, rot: Heizwerk, blau: Schlechtpunktverbraucher

Obwohl das Versorgungsgebiet in Großarl nicht flach ist, werden geodätische Höhen hier vernachlässigt. Gerechtfertigt wird diese Annahme durch die Kompensation des geodätischen Druckverlustes im Vorlauf durch die Drucksäule im Rücklauf. Der vorlaufseitige Druckverlust kann dazu führen, dass die Temperatur des Wärmeträgermediums knapp vor der Wärmeübergabe in der Wärmeübergabestation den mit fallendem Druck sinkenden Siedepunkt überschreitet und ausdampft. Es gelte für das gesamte Netz die Annahme, dass die Wasservorlauftemperatur immer in ausreichendem Abstand unter dem Siedepunkt liegt und es daher zu keinem Ausdampfen in der Leitung kommt.

Beim Netz handelt es sich um ein Zweileiternetz mit jeweils parallel verlegten Vor- und Rücklaufrohren. Als Rohrmaterial kommen Einzelrohre von Isoplus® mit Stahl- Mediumrohren, PUR-Hartschaumdämmung und PEHD-Mantel zum Einsatz. Die Rohrgeometrien können [13] entnommen werden. Den größten Durchmesser hat das vom Fernheizwerk direkt abzweigende Hauptrohr DN200. Der größte Teil der Hausanschlüsse ist mit DN25 Rohren realisiert. Die folgende Tabelle 2.1 beinhaltet die wesentlichen Rohrgeometrien und aggregierten verlegten Längen:

Tabelle 2.1: Verlegte Rohre nach Rohrgeometrien Netz Großarl

InnenØ	Mediumrohrstärke	AussenØ	Isolierdicke	verlegte Länge
d _i	s _M	d _a	s _{ISO}	l
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]
200	4,5	219,1	67,95	1263,61
150	4	168,3	55,85	65,17
125	3,6	139,7	55,15	1508,36
100	3,6	114,3	55,35	539,75
80	3,2	88,9	45,55	758,31
65	3,2	76,1	41,95	2532,64
50	3,2	60,3	39,85	1553,47
40	3,2	48,3	38,35	582,72
32	3,2	42,4	41,3	2235,26
25	3,2	33,7	38,15	2115,8
Gesamtlänge		[m]		13.155,09
Wasservolumen (Vor-+Rücklauf)		[m ³]		164,87

Interessant ist noch die durchmesserabhängige Betrachtung von thermischen Verlusten. Die folgende Tabelle 2.2 enthält ebendiese für folgende Randbedingungen:

- Aulslegungsvorlauftemperatur $T_{VL} = 95^{\circ}\text{C}$
- Auslegungsrücklauftemperatur $T_{RL} = 55^{\circ}\text{C}$
- Vollbenutzungsstunden $t_{VB} = 2000 \text{ h/yr}$
- Wärmeleitfähigkeit Isolierung $\lambda_{ISO} = 0,025 \text{ W/mK}$
- mittlere Vorlauftemperatur (Jahr) $T_{mVL} = 90^{\circ}\text{C}$
- mittlere Rücklauftemperatur (Jahr) $T_{mRL} = 50^{\circ}\text{C}$
- Betriebsstunden $t_{BS} = 8760 \text{ h}$

Tabelle 2.2: Wärmeverluste Rohre nach Geometrien nach [14], Seite 53

$\varnothing i$	Isol.	Geschw.	Leistung	jährlich	VERLUSTE			
d_i	s_{ISO}	c	$Q \text{ max}$	Q_a	Einzelrohr	Jahres-WV	WV 100m	Länge für 10%
[mm]	[mm]	[m/s]	[kW]	[MWh/a]	[W/m]	[kWh/ma]	[%]	[m]
200	67,95	1,5	8680,85	17361,70	18,4	161,18	0,19%	5385,68
150	55,85	1,3	4231,91	8463,83	16,9	148,04	0,35%	2858,55
125	55,15	1	2260,64	4521,28	15	131,4	0,58%	1720,42
100	55,35	0,9	1302,13	2604,25	12,7	111,25	0,85%	1170,43
80	45,55	0,8	740,77	1481,53	12,2	106,87	1,44%	693,13
65	41,95	0,7	427,89	855,79	11,2	98,112	2,29%	436,13
50	39,85	0,6	217,02	434,04	9,77	85,585	3,94%	253,57
40	38,35	0,5	115,74	231,49	8,71	76,3	6,59%	151,70
32	41,3	0,5	74,08	148,15	7,4	64,824	8,75%	114,27
25	38,15	0,4	36,17	72,34	6,74	59,042	16,3%	61,26

Es ist auffällig, dass die Wärmeverluste über den Rohrmantel mit sinkendem Rohrdurchmesser signifikant zunehmen. Die erdverlegten Hausanschlussleitungen (DN25/32) sollten daher so kurz wie möglich ausgeführt werden.

Anmerkung: In den letzten beiden Spalten der Tabelle 2.2 ist der Wärmeverlust für Vor- und Rücklauf berücksichtigt.

Die das Gesamtnetz ausmachenden Rohrabschnitte und Knoten sowie eine Verbraucherliste sind der Tabelle 1 und Tabelle 2, Anhang A zu entnehmen. Des weiteren sind in der Tabelle die Anzahl von Winkeln für jeden Rohrabschnitt angegeben, um auch Druckverluste, die aufgrund von Richtungsänderungen (Winkel und Abzweigungen) des Wärmeträgerfluids auftreten, im Modell mit betrachten zu können.

2.2.3. Verbraucher

Am Netz sind ca. 250 Abnehmer angeschlossen. Die Normvorlauf-/Rücklauf­temperatur beträgt 90°C bzw. 55°C und die Gesamtwärmeleistung liegt bei ca. 20 GWh. Die gesamte verlegte Rohrlänge beträgt ca. 13 km, der Durchmesser der Hauptleitung ist DN 200. Daraus ergibt sich ein netzseitiges Wasservolumen von ca. 165 m³ (exklusive Pufferspeicher im Fernheizwerk). Rechnet man den Pufferspeicher mit seinem Volumen von 48 m³ dazu, macht dieser ca. 22,5% des Gesamtwasservolumens aus.

Die Holz­tro­cken­kam­mern sind Prozesswärmeabnehmer mit Vorlauf- und Rücklauf­temperat­uren von 90°C bzw. 70°C. Wegen prozessbedingten Problemen mit der Rücklauf­temperatur kann das Rücklaufwasser durch eine Tischkühlanlage abgekühlt werden.

Die Verbraucher setzen sich größtenteils aus Einzel- und Mehrfamilienhausanschlüssen und ca. einem Dutzend Großverbrauchern zusammen. Als Großverbraucher gelten Hotels, Betriebsanschlüsse und Gebäude der öffentlichen Verwaltung (Gemeinde). Im Unterschied zu den Hausanschlüssen kann bei den Großabnehmern davon ausgegangen werden, dass detaillierte Verbraucherdaten (Leistungsentnahmen und Massenströme) vorliegen, bzw. aus vorliegenden Messdaten ausreichend genaue Verbrauchermodelle entwickelt werden können. Ein Modell für die Hausanschlüsse wird in Kapitel 3.4.2.1 entwickelt, jenes für die Großverbraucher in Kapitel 3.4.2.2.

Die Wärmeentnahme bei den Verbrauchern erfolgt über Wärmeübergabestationen. Realisiert ist dies mittels Plattenwärmetauschern. Die primär- (also netzseitige) Ermittlung des für die Leistungsabnahme erforderlichen Volumenstroms erfolgt in dieser Arbeit über die Annahme einer konstanten Rücklauf­temperatur. In der Realität erfolgt die Regelung häufig über ein im Rücklauf eingebautes (volumenstrombegrenztes) Differenzdruck-Regelventil, welches den hydraulischen Abgleich aller Verbraucher und damit die gleichmäßige Versorgung aller angeschlossenen Verbraucher sicherstellt und die sekundärseitige Vorlauf­temperatur regelt. Die Volumenstrombegrenzung ist eine vom Netzbetreiber gewünschte Vorgabe um die Pumpenenergie und Anschlussleistung der Verbraucher in überschaubaren Grenzen zu halten. Bei der Simulation der Verbraucher erfolgt die Volumenstromregelung mittels Differenzdruck-Regelventil. Es wird dabei der Massenstrom bei den einzelnen Wärmeübergabestationen durch einen variablen hydraulischen Widerstand (Differenzdruckregelventil) eingestellt. Die Regelgröße ist dabei die (konstante) primärseitige Rücklauf­temperatur. Um primärseitige Druckdifferenz-Regelung und Sekundär-Vorlauf­temperatur­regelung in einem handhaben zu können, kommen in der Praxis sogenannte Kombiventile zu Einsatz, welche Durchgangs-Regelventile mit eingebautem Druckdifferenz-Regler sind [15]

2.3. Fragestellungen

Die Simulation eines Fernwärmenetzes soll sowohl einen Beitrag zur Betriebsoptimierung der Gesamtanlage als auch als Entscheidungsgrundlage für netzseitige Änderungen dienen.

Der Einsatz des Modelles kann offline oder online erfolgen. Offline bedeutet, dass die Simulation ohne Beachtung der aktuellen Betriebsbedingungen durchgeführt wird. Folgende Ziele werden dabei verfolgt:

- *Wärmeerzeugerregelung: Einsatz als Abnehmerprognose-Tool mit dem Ziel die Betriebsstunden des Spitzenlastkessels zu minimieren*

Mit dem übergeordneten Ziel den Einsatz von fossilen Energieträgern wie Öl zu minimieren, kommt der Wärmeerzeugerregelung große Wichtigkeit zu. Die Betriebsstunden des ölgefeuerten Spitzenlastkessel sollen minimiert werden, er sollte im Idealfall nur mehr als Reservekessel dienen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Lastspitzen entweder durch eine optimierte Pufferspeicherwirtschaft und/oder durch eine zusätzlich installierte Wärmepumpe (im Netz) abgetragen werden. Die Netzsimulation soll quantitative Aussagen bezüglich dieser Problemstellungen liefern und als Entscheidungsgrundlage für kraftwerksseitige Systemänderungen dienen. Der Einbau einer Wärmepumpe im Fernwärmenetz kann abhängig von der Lage im Ortsnetz zu einer optimierten Betriebsweise der Gesamtanlage führen und dabei helfen Lastspitzen abzufedern. Auch kann dadurch eventuell die Vorlauftemperatur ab Fernheizwerk gesenkt werden, was thermische Netzverluste reduziert und relativ geringe Auswirkungen auf die nach der Wärmepumpe angeschlossenen Verbraucher hat.

- *Ermittlung des Optimums von Brennstoffeinsatz vs. Pumpenstrom*

Die Anhebung der Vorlauftemperatur erfordert in erster Linie einen erhöhten Brennstoffeinsatz und führt dazu, dass bei gleichbleibender Wärmeabnahme der Kunden die Pumpen weniger Wasser umwälzen müssen. Der Wärmedurchgang durch ein gedämmtes einschichtiges Rohr wird durch Gleichung 2.1 angenähert:

$$\dot{Q}_R = \frac{\pi \cdot l \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{ISO}} \cdot \ln \frac{d_{ISO,a}}{d_{ISO,i}} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a}}$$

(Gl. 2.1)

Die lineare Abhängigkeit des Wärmestromes durch den Mantel des Fernwärmerohrs führt bei steigender Vorlauftemperatur ϑ_i zu einem erhöhten Wärmeverlust. Ob diese größeren Verluste durch die sinkenden Stromkosten bei den Pumpen für das gesamte System kompensiert werden, gilt es durch die Simulation herauszufinden.

- *Optimierung Pumpen: Änderung der Betriebsweise bei Einbau einer zusätzlichen Pumpstation im verzweigten Ortsnetz, Validierung der Pumpenanzahl und -größe*

Beim Vorliegen von lediglich einer Pumpstation im Fernheizwerk wirkt sich die Anhebung des Betriebsdrucks auf das gesamte Netz aus. Dies kann, abhängig von der örtlichen Lage der (Groß-) Verbraucher zu einer suboptimalen Betriebsweise führen. In einem solchen Fall würde sich der Einbau einer Pumpstation an einer bestimmten Stelle im Netz vorteilhaft auf die Optimierung des Gesamtsystems auswirken. Derartige Szenarien sowie die Überprüfung einer möglichen Überdimensionierung der Pumpenanzahl und -größe sollen mit dem entwickelten Modell abgeschätzt werden können.

- *Abbildung der Druck- und Temperaturverteilung im Netz*

Um die Versorgungssicherheit jedes Verbrauchers gewährleisten zu können und den ordnungsgemäßen Betrieb des Fernwärmenetzes sicherzustellen, soll die Simulation in der Lage sein, die Betriebsparameter im Netz wie Temperatur- und Druckverhältnisse auszugeben. Auch die Optimierung des Betriebsdrucks und der Vorlauftemperatur kann durch die Simulation des Druckes und der Temperatur am kritischen Verbraucher (SP) im Rahmen der Schlechtpunktregelung durchgeführt werden.

- *Untersuchung der Auswirkung von Änderungen der Netztopologie wie Vermaschungen, Ringschlüsse und Erweiterungen*

Weil das Fernwärmenetz kein statisches System darstellt, also im Laufe der Zeit möglicherweise erweitert wird, kann sich mit steigender Abnehmerzahl zukünftig ein Ringschluss positiv auf die Versorgungssicherheit der Kunden auswirken. Die Sinnhaftigkeit solcher Netztopologieänderungen für den Kunden und Betreiber soll im Rahmen dieser Simulation überprüft werden können.

- *Quantifizierung der Auswirkungen neuer Tarifmodelle auf die Gesamtbetriebskosten*

Historisch bedingt verfügt der Großteil der Verbraucher über einen Pufferspeicher, weil sie vorher einen ölbefeuerten Kessel als Wärmequelle nutzten. Im Rahmen des Anschlusses an das Fernwärmenetz wurde der Kessel durch die Fernwärme-Wärmeübergabestation ersetzt. Ein weiteres Ziel der Netzsimulation soll untersuchen inwiefern zeitlich-tarifliche Anpassungen des Puffermanagements zur Abflachung der Netzspitzen beitragen können.

Während es sich bei den bisher erwähnten Zielsetzungen um solche handelt, die offline (also unabhängig vom Betrieb des Fernheizwerks) eingesetzt werden, ist auch der online Einsatz des Modells angedacht. Die mit dem Betrieb der Anlage stets mitlaufende Simulation der Verbraucher und des Netzes soll Bestandteil einer adaptiven Regelung sein. Dabei ist besonderes Augenmerk auf Rechenzeiten zu legen, die 5% der simulierten Zeit nicht überschreiten sollte.

Erreicht werden sollen diese Ziele mittels:

- möglichst allgemeine und umfassende Abbildung des Netzes, damit auch andere Netze mit der Simulation dargestellt werden können
- Entwicklung von Sub-Modellen für Übergabestationen verschiedener Verbraucherklassen (Ein-/ Mehrfamilienhäuser, Industriekunden, Hotels)
- Berücksichtigung von Umweltfaktoren wie Außentemperatur, mittlerer Erdoberflächtemperatur, Verbraucherverhalten
- Festlegung definierter Schnittstellen, wo andere Simulationsmodule (Kessel, Pumpen, ORC-Modul, Pufferspeicher) ans Netz angeschlossen werden können, und/oder Schnittstellen, wo das Modell mit geänderten Inputparametern (z.B. Verbraucherkfunktionen, Massenstromverläufe) gespeist werden kann.

3. Modellbildung

3.1. Überblick MatLab/SimScape

Das seit der Version 2013b verfügbare Matlab/Simulink Domäne *thermal_liquid* vereinigt die hydraulische mit der thermischen Domäne in Simscape. Mit dieser ist es nunmehr möglich den Wärmeaustausch von Fluiden und die mit den Temperaturänderungen einhergehenden Änderungen der Zustandsgrößen zu untersuchen.

Simulink ist eine Erweiterung des Programmpakets Matlab und ermöglicht die Simulation von verschiedenen technischen Systemen. Die Modellierung erfolgt mithilfe von grafischen Blöcken. Auch ist es möglich Matlab-Befehle in das Simulink-Modell einzubauen, was die Änderung bestimmter Kernparameter erleichtert. Bei Simulink handelt es sich um eine Programmiersprache, die mit gerichteten Graphen arbeitet, die Richtung des Signalflusses ist somit von Anfang an vorgegeben.

Simscape hingegen stellt eine Erweiterung von Simulink dar und ermöglicht die physikalische Modellierung von technischen Systemen. Hierbei handelt es sich um reale (physikalische) Systeme. Flussrichtungen von Flussvariablen sind von Anfang an nicht zwingend von Nöten und ergeben sich je nach physikalischer Ausprägung der verwendeten Komponenten. Anders als Simulink-Variablen und Parameter verfügen sämtliche Variablen und Parameter, die in Simscape-Komponenten verwendet werden über physikalische Einheiten. Die Konvertierung der Variablen von Simscape zu Simulink und umgekehrt geschieht über eigens dafür vorgesehene Blöcke.

Die physikalische Modellierung mit Simscape erfolgt über verschiedene Domänen. In der Standard-Library sind dies die elektrische, hydraulische, mechanische, thermische und schließlich hydraulisch-thermische. Sämtliche Blockvariablen und -Parameter werden über die Domäne definiert, nur Komponenten, die sich über dieselbe Domäne definieren, können kombiniert werden. Darüber hinaus ist es in Simscape möglich auf den Quellcode der einzelnen Komponenten zuzugreifen und diesen bei Bedarf zu adaptieren. Auch können neue Domänen kreiert werden. Die Erstellung von so genannten Composite-Components, also Zusammenfassung von verschiedenen Blöcken in einen Block mit definierten Ein- und Ausgängen, gewährleistet die Übersichtlichkeit des grafischen Aufbaus des Modells und ist die programmiertechnische Äquivalente von Subsystemen, welche im Simulink/Simscape-Modell grafisch erstellt werden können. Dabei wird die Composite-Component im Vorhinein kompiliert und steht im Anschluss für die Weiterverwendung im Modell in einer Komponentenbibliothek zur Verfügung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Simulation der physikalischen Gegebenheiten in den Simscape Blöcken vorgenommen wird, die Signalein- und -ausgabe erfolgt über Simulink und Matlab.

Die Motivation für die Verwendung des Programmes Matlab/Simulink/Simscape ist auch in der Tatsache begründet, dass es möglich ist, aus dem Modell Blockcode zu erzeugen. Die Toolbox Simulink Coder kann aus dem physikalischen Modell z.B. C-Code erzeugen, der anschließend auf einer anderen Plattform ausgeführt und als Online-Simulationstool für regelungstechnische Zwecke eingesetzt werden kann.

3.2. Thermal_Liquid-Library

Die Simscape Domäne thermal_liquid stellt eine Erweiterung der hydraulischen Blockbibliothek um die wärmetechnische Komponente dar. Abb.3.1 zeigt die thermal_liquid-Standard-Bibliothek mit den Unterordnern *Elements*, *Sensors*, *Sources* und *Utilities*:

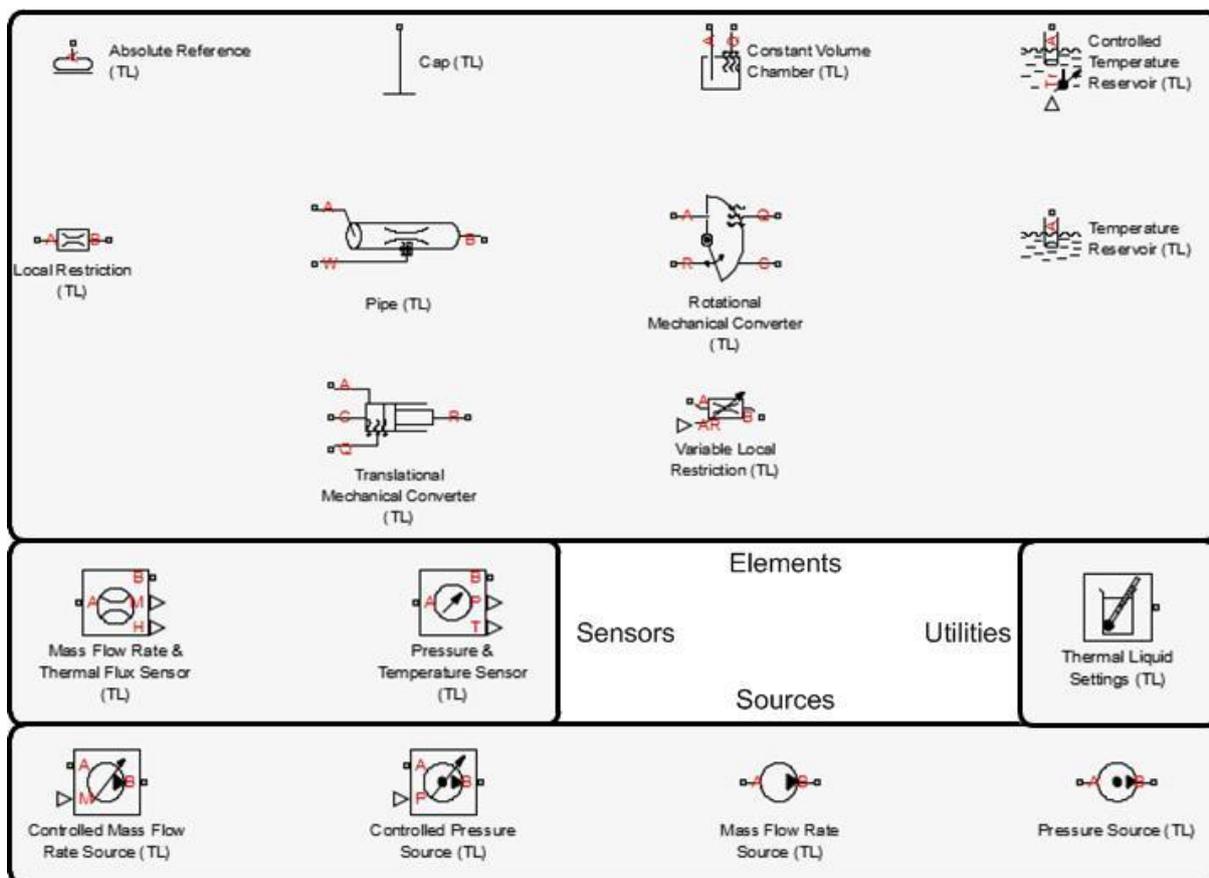


Abbildung 3.1: Simscape Standard-Komponentenbibliothek Thermal-liquid

Eine ausführliche Beschreibung der Blöcke findet sich in [16].

Bei (fast) allen Blöcken der Standard-Bibliothek kann man auf den Quellcode zugreifen. Dieser ist grob in folgende Sections eingeteilt: Declaration, Setup, Branches und Equation. Bei Composite-Components kommt noch die Structure-Section dazu, Domänen-Files hingegen bestehen nur aus dem Declaration-Block.

In der Declaration-Section findet die Definition der Inputs, Outputs, Parameter und Variablen statt, die zur Beschreibung der Blockein- und -ausgänge sowie des Blockverhaltens dienen. Erst nach der Deklaration der (physikalischen) Größen können diese in den Setup- und Equation-Sections verwendet werden.

Die Setup-Section wird für jede Instanz des Blocks während der Kompilierung ausgeführt und beinhaltet die Parametervalidierung, Setzen von Anfangsbedingungen und die Berechnung von abgeleiteten Parametern [17].

Simscape arbeitet mit zwei unterschiedlichen Arten von Variablen, den Through- und Across Variablen. Through-Variablen sind Variablen, welche durch einen Block übertragen werden, also beim Durchfluss des Blockes konstant bleiben. Dazu gehören Flussgrößen wie Massen-/Volumenstrom und Wärmestrom. Across-Variablen hingegen sind Größen, die sich durch Messung von Differenzen am Ein- und Ausgang des Blocks ergeben. Sie bleiben am Verzweigungsknoten konstant, wenn Blöcke parallel verschaltet werden. Beispiele: Temperatur und Druck.

Through-Variablen müssen vor deren Verwendung im Equations-Block in der Branches-Section definiert werden. Da Simscape automatisch die Kirchhoff'schen Gesetze auf die physikalischen Modelle anwendet, muss im Vorhinein geklärt werden, welche Variablen von welchem Typ sind.

Im Equations-Block können schließlich die aus Variablen, Parametern, Inputs, Outputs, der Zeit und zeitlichen Ableitungen bestehenden (Bilanz-) Gleichungen aufgestellt werden. Dieser Abschnitt des Quellcodes bildet den eigentlichen Kern des Formelwerkes, das hinter der Simulation steckt. Durch das Verbinden verschiedener Blöcke wird ein System aus Differenzialgleichungen und algebraischen Gleichungen aufgebaut. Die Lösung des daraus entstehenden Differential-algebraischen Gleichungssystems im Zeitbereich bildet das Ergebnis der Simulation.

Wie bereits oben erwähnt, gibt es die Möglichkeit mehrere Blöcke der Standard-Library in einem Block zu vereinen. Bei solchen *Composite Components* kommt noch vor dem Equations-Block der Structure-Block dazu, in dem definiert wird, wie die einzelnen Basiskomponenten miteinander und den Inputs/Outputs verschaltet sind. Die Basiskomponenten wurden vorher im Declaration-Block definiert und ggf. auch initialisiert.

3.3. Custom-library DIHE_Components

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Komponentenbibliothek erstellt, welche die im Folgenden beschriebenen Elemente (Kap. 3.4.1, 3.4.3) zur Modellierung eines Fernwärmenetzes beinhaltet. Die nach dem Kompilieren entstehende *DIHE_Components_lib* sieht folgendermaßen aus (Abbildung 3.2)

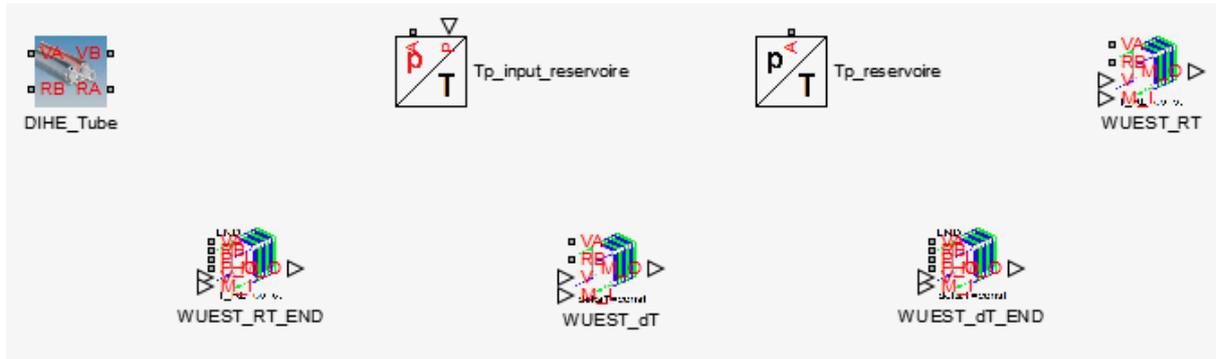


Abbildung 3.2: Simscape Custom library DIHE_Components

Die Funktion der einzelnen Komponenten sei hier kurz erklärt:

- *DIHE_Tube*: Dieser Block bildet das Modell eines Fernwärmerohrpaars mit Vor- und Rücklauf, Kap. 3.4.1
- *Tp_reservoir*: Dieser Block wird als Referenzpunkt für Druck und Temperatur an bestimmten Stellen des Netzes benötigt. Die beiden Zustandsgrößen können als Parameter im Eingabefeld eingestellt werden. (Kap. 3.4.5)
- *Tp_input_reservoir*: Hat die gleiche Funktion wie *Tp_reservoir*, mit dem Unterschied, dass der Druck als Input von einem Signalgeber von außen vorgegeben werden kann und somit ein Druckverlauf, abhängig von den sich ergebenden Druckbedingungen im System vorgegeben wird. (Kap. 4.2.1)
- *WUEST_RT*: Modell der Wärmeübergabestation eines Verbrauchers. Die Abkürzung RT steht für Rücklauf Temperatur und zeigt an, dass die Rücklauf Temperatur der WÜST die Regelgröße für diesen Block ist. Diese wird über die Stellgröße Massenstrom geregelt. (Kap. 3.4.3. Der eingesetzte Regler ist der *Mass_flow_Calculator_RT*)
- *WUEST_RT_END*: Gleiche Funktion wie *WUEST_RT* mit dem Unterschied, dass der Schlechtpunkt im System diesen Block erhält. Dies ist notwendig, weil die Drücke an diesem Punkt extern von *Tp_reservoirs* vorgegeben werden. Im Unterschied zum Block *WUEST_RT* verfügt dieser Block über zwei eigene Ports, wo der Druck vorgegeben wird.

- *WUEST_dT*: Selbe Funktion wie *WUEST_RT* jedoch mit einer anderen Regelstrategie: Regelgröße ist hier eine konstante (einstellbare) Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf. Die Stellgröße ist wieder der Massenstrom über die WUEST. Als Regler kommt der *Mass_flow_Calculator_dT* zum Einsatz.
- *WUEST_dT_END*: Gleiche Funktion wie *WUEST_dT*. Dieser Block ist jedoch wieder für das Netzende und den SP vorgesehen.

Die beschriebenen Blöcke bestehen zum Teil auch aus versteckten Komponenten. Diese sind in den Composite-Components verbaut und nicht in der Komponentenbibliothek *DIHE_Components_lib* sichtbar. Es sind dies:

- *add_Zeta*: Dieser Block modelliert einen zusätzlichen Rohrwiderstand. Alle Zusatzwiderstände, die die Rohrreibung betreffen wie Krümmer, Einlaufwiderstände und Armaturen werden mit diesem Block modelliert.
- *conduction_Tube*: Diese Komponente modelliert die radiale Wärmeleitung in einem Rohrelement, hier jene im Mediumrohrmantel und in der Rohrisolierung. Der Quellcode stellt eine Erweiterung der Standard Komponente *Conduction* der Thermal-Library dar.
- *custom_tube*: Dies ist das eigentliche Rohrelement. Es simuliert die Rohrreibung und den Wärmeaustausch des Fluids mit dem Rohrmantel. Der Quellcode ist eine leichte Abwandlung des Quelltextes der Rohrkomponente *Pipe* der Standard-Thermal_liquid-Library.
- *DDRV*: Die Abkürzung steht für Differenzdruckregelventil. Dieses Ventil, im Rücklauf einer WÜST eingebaut, öffnet das Ventil bei anliegender Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf so weit, dass der geforderte (in den Blöcken *Mass_flow_Calculator_XX* berechnete) Massenstrom über die WÜST fließt. (Siehe auch Abbildung 3.7, *Kombiventil*)
- *Mass_flow_Calculator_dT*: die Abkürzung dT steht für Temperaturdifferenz. Der benötigte Massenstrom wird so berechnet, dass sich eine definierte (in den Blockparametern festgelegte) Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf einstellt. Inputgröße für diese Komponente bildet die Leistungsfunktion und die anliegende Vorlauftemperatur.
- *Mass_flow_Calculator_TRL*: Ähnlich wie die vorhergehende Komponente, die Abkürzung TRL bedeutet hier Rücklauftemperatur. Der Massenstrom wird über die Verbraucherfunktion und anliegende Vorlauftemperatur so berechnet, dass sich eine (in den Blockparametern festgelegte) Rücklauftemperatur einstellt.
- *temperature_custom*: Ist eine leichte Abwandlung des Source-Blocks *Temperature* der Standard-thermal-Library mit dem Unterschied, dass die Temperatur nicht als Signal, sondern als Parameter von außen vorgegeben werden kann. Die hier eingestellte Temperatur ist die Erdreichtemperatur.

3.4. Komponentenmodelle

Für die Simulation eines Fernwärmenetzes wurde in dieser Arbeit eine Komponentenbibliothek angelegt (Kap 3.3) Diese beinhaltet die Komponenten, welche typisch sind für ein Rohrsystem: Rohrteilstücke und Verbraucherschnittstellen (=WÜST). Um die Simulation des Netzes überhaupt zu ermöglichen, ist es notwendig andere (fernheizwerkseitige) Komponenten wie Pumpen und Kessel zusätzlich zu simulieren. Im Folgenden werden die in der Arbeit verwendeten Komponenten kurz beschrieben.

3.4.1. Rohrmodell

Die Hauptkomponenten des Fernwärmenetzes sind die Rohrteilstücke. Im Wesentlichen besteht ein solches Rohrelement aus einem mit PU-Schaum isolierten Mediumrohr, jeweils für Vor- und Rücklauf. Folgendes Bild (Abbildung 3.3) zeigt das Simscape-Modell eines Rohrelements.

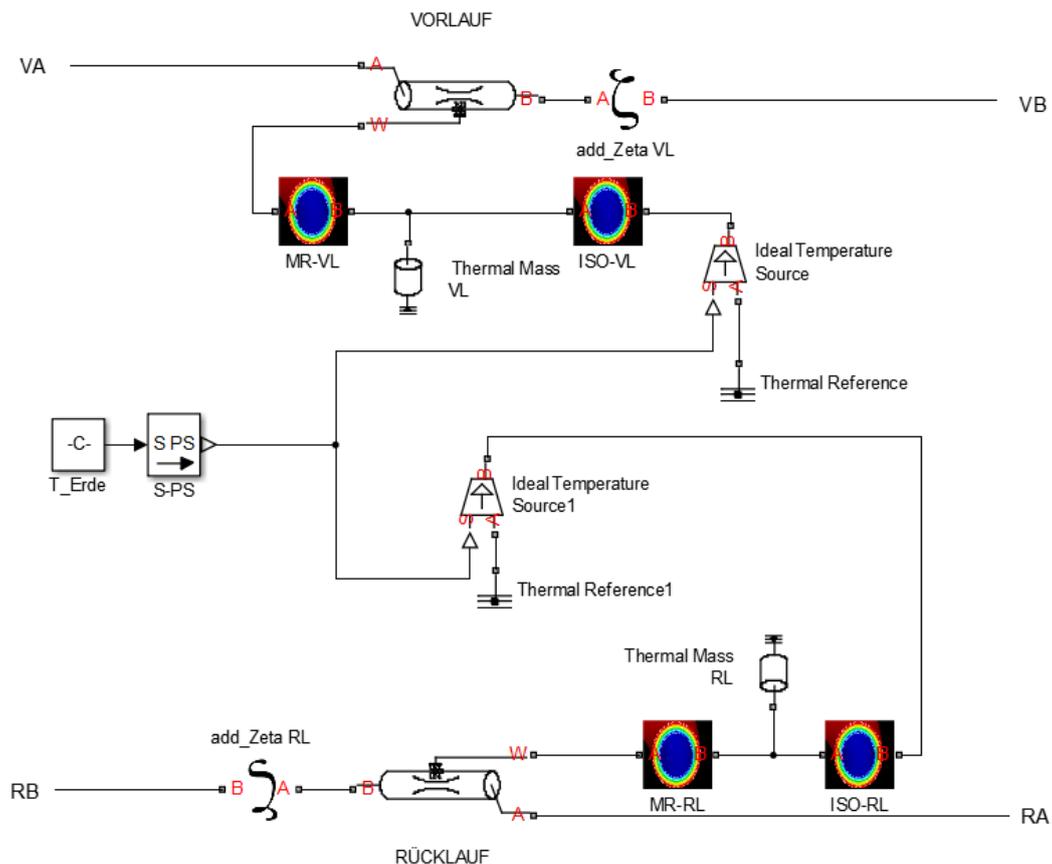


Abbildung 3.3: Simscape-Modell eines Fernwärme-Rohrelements

Folgende Annahmen wurden bei der Modellierung eines Fernwärmerohrpaars getroffen:

- Rohre: Inkompressibles Fluid, Vernachlässigung von Impulsänderungen durch Fluidbeschleunigungen (Druckstöße). Alle Rohre befinden sich in einer horizontalen Ebene, Druckänderungen durch geodätische Höhenunterschiede werden nicht berücksichtigt (vgl. auch Kap. 2.2.2) Die Wärmespeicherfähigkeit, die sich auf die thermische Trägheit des Systems auswirkt, wird im Modell durch eine thermische Masse des Mediumrohres berücksichtigt.
- Isolierung: Die Modellierung der Wärmeverluste über den Rohrmantel erfolgt mit dem Block *Conductive Heat Transfer*, der für die Verwendung mit Rohren angepasst wurde und der Beziehung (Gl. 3.1) genügt: (i... i-te Schicht eines mehrschichtigen Rohres)

$$\dot{Q}_{V,i} = \frac{2\pi \cdot l \cdot \lambda_i}{\ln\left(\frac{d_{a,i}}{d_{i,i}}\right)}$$

(Gl. 3.1)

Der Wärmestrom über den Rohrmantel wird über folgende Beziehung ermittelt:

$$\dot{Q}_V = \frac{\pi \cdot l \cdot (\vartheta_F - \vartheta_S)}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_{MR,i}} + \frac{1}{2\lambda_{MR}} \ln\left(\frac{d_{MR,a}}{d_{MR,i}}\right) + \frac{1}{2\lambda_{ISO}} \ln\left(\frac{d_{ISO,a}}{d_{ISO,i}}\right) + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_{ISO,a}}}$$

(Gl. 3.2)

Da der Wärmübergang außen phänomenologisch nicht in Form von Konvektion erfolgt, sondern eher Wärmeleitungscharakter besitzt, wird hier $\alpha_a = \infty$ angenommen. Dadurch entfällt der letzte Summand im Nenner der (Gl. 3.2). Der Wärmeübergang innen wird vom Block *custom_tube* ermittelt.

- Erdreich: Die Erdreichtemperatur wird als homogen und konstant über das Jahr angesehen. Sie wurde hier mit $\vartheta_S = 10^\circ\text{C}$ angenommen. Die sich nach vielen Betriebsjahren eventuell ausbildenden Temperaturtrichter im Erdreich werden hier nicht berücksichtigt. Die Modellierung in Simscape erfolgt über den Block *Ideal Temperature-Source*.

- Zusätzliche Druckverluste, die etwa durch Abzweigungen, Rohrbögen oder Rohreinbauten verursacht werden, können durch die Eingabe eines zusätzlichen Druckverlustbeiwerts ζ_R (*zusätzliches Zeta*) berücksichtigt werden. Die möglichen zusätzlichen Druckverluste eines Fernwärmerohres sind hier Rohrbögen und Druckverluste durch Querschnittsänderungen.

Die in Abbildung 2.3 dargestellten Blöcke wurden zu der Composite-Component *DIHE_Tube* (Abbildung 3.4) zusammengefasst. Die Flussrichtung des Warmwassers ist von VA nach VB im Vorlauf, sowie von RA nach RB im Rücklauf.



**Abbildung 3.4: Composite
Component *DIHE_Tube***

Die so erstellte neue Komponente verfügt über folgendes Eingabefeld, wo die Eingabeparameter festgelegt werden können (Abbildung 3.5):

DIHE_Tube		
View source for DIHE_Tube		
Parameters		
Rohrinnendurchmesser:	<input type="text" value="1e-1"/>	<input type="text" value="m"/>
Rohrlänge:	<input type="text" value="1e-1"/>	<input type="text" value="m"/>
zusätzliches Zeta:	<input type="text" value="1"/>	
absolute Rohrrauigkeit:	<input type="text" value="10e-6"/>	<input type="text" value="m"/>
Anfangstemperatur Rohr VL:	<input type="text" value="273.15"/>	<input type="text" value="K"/>
Anfangstemperatur Rohr RL:	<input type="text" value="273.15"/>	<input type="text" value="K"/>
Dicke Rohrwand:	<input type="text" value="1e-2"/>	<input type="text" value="m"/>
Dicke Isolierschicht:	<input type="text" value="1e-1"/>	<input type="text" value="m"/>

OK Cancel Help Apply

Abbildung 3.5: Eingabefeld der Komponente *DIHE_Tube*

3.4.2. Verbrauchermodelle

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei einem Fernwärmenetz um eine inhomogene Verbraucherstruktur handelt (Verbraucher können sowohl Ein- und Mehrfamilienhäuser aber auch Großverbraucher wie Hotels oder Industrieverbraucher sein), werden bei der Modellierung der einzelnen Verbrauchertypen verschiedene Ansätze der Wärmebedarfsermittlung verfolgt.

Bei der Modellierung der Ein- und Mehrfamilienhausanschlüsse (Kleinverbraucher) wird zufällig aus vier Standardverläufen ein Verlauf ausgewählt. Die vier Standardverläufe sind angenommene Tagesgänge des Wärmebedarfs (im Folgenden *Verbraucherfunktion* genannt). Diese Verläufe stellen die qualitative Verbrauchsfunktion dar. Die quantitative Anpassung erfolgt anhand historischer Verbraucherdaten.

Großverbraucher wie Hotels hingegen unterliegen einer starken saisonalen und/oder konjunkturabhängigen Schwankung, was die tägliche Leistungsabnahme betrifft. Hier wird eine stochastische Bedarfsermittlung beruhend auf historischen Messdaten und der Außentemperatur angewandt.

Volumen- bzw. Massenströme stellen sich in einem realen System aufgrund aufgeprägter Druckdifferenzen ein. Damit sichergestellt ist, dass jeder Verbraucher seine Anschlussleistung beziehen kann, muss sichergestellt werden, dass der Druckverlust über jeden einzelnen Verbraucher ein Mindestmaß nicht unterschreitet. Zudem ist für den ordnungsgemäßen Betrieb der Armaturen (Druckdifferenzregel-, bzw. Kombiventil) ein Mindestdruck im Bereich von einigen wenigen bar notwendig. Liegt am Schlechtpunkt die geforderte Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf an, ist gewährleistet, dass jeder andere Verbraucher im Netz über mindestens diesen Differenzdruck verfügt. Abbildung 3.6 veranschaulicht die Druckverhältnisse im Netz für 5 Netzabschnitte. Die Schwarzen Kreise stellen Verbraucher dar, der linke rote Kreis symbolisiert die Pumpe, welche die erforderliche Druckdifferenz im System aufprägt.

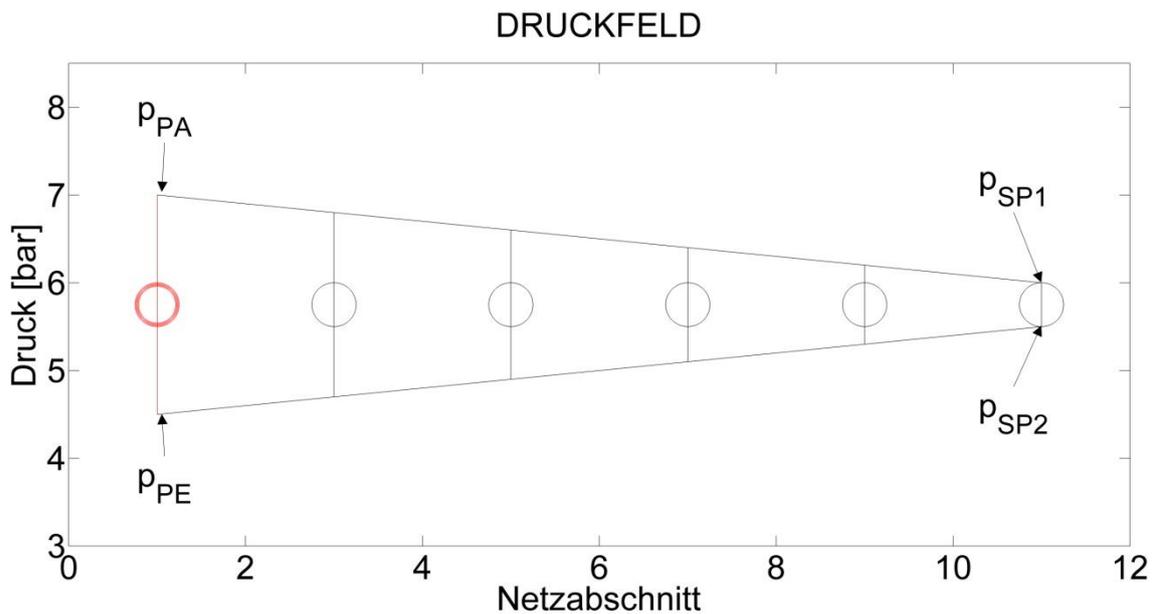


Abbildung 3.6: Druckverhältnisse im Netz. Oben: Druck in den Vorlaufrohren, unten: Druck in den Rücklaufrohren. Roter Kreis: Pumpe im HW, schwarze Kreise: Verbraucher im Netz

Dabei bedeuten die Drücke p_{SP1} , p_{SP2} , p_{PE} und p_{PA} Vorlauf- und Rücklaufdruck am Schlechtpunkt (SP), sowie Pumpeneingangs- und Ausgangsdruck. Vom Benutzer einstellbare Parameter sind die beiden Drücke am SP. Die Steigung der schwarzen Linien im oberen (Vorlaufdruck) und unteren (Rücklaufdruck) Bereich der Abbildung geben Aufschluss über den Druckverlust im Netz. Sie ändern im Zeitablauf je nach Massenstrom (und Temperatur) ihre Steigung. Das Modell errechnet den für jeden Zeitpunkt erforderlichen Druckhub durch die Pumpe (Differenz aus p_{PA} und p_{PE}).

Die Druckspreizung Δp_{VSP} am von den Netzpumpen weitesten entfernten Verbraucher, dem SP gewährleistet dessen maximale Leistungsabnahme (Anschlussleistung). Sollte dieser einen Mindestwert unterschreiten, muss das gesamte Netz "aufgeblasen" werden, die Vorlaufdrucklinie verschiebt sich nach oben.

Die Regelung der WÜST erfolgt in der Praxis auf die sekundärseitige Vorlauftemperatur (vgl. auch Abbildung 3.7). Regelgröße hierbei ist der primärseitige Volumenstrom. Die Anschlussleistung des Hausanschlusses wird mittels Kombiventil (und bekannter primärseitiger Temperaturspreizung) sichergestellt. Dieses vereinigt ein Temperatur-Regelventil und ein Differenzdruckregelventil. Letzteres begrenzt die maximale Druckspreizung zwischen Vor- und Rücklauf und damit auch den maximal beziehbaren Massenstrom. Im Zuge der Wärmebedarfsermittlung wird dieser Tatsache Rechnung getragen. Um in Simscape nicht mit veränderbaren Druckdifferenzen arbeiten zu müssen, werden diese nicht aufgeprägt, sondern gleich der berechnete Massenstrom durch einen veränderlichen Ventilhub im DDRV eingestellt. Bei bekannter Leistungsentnahme \dot{Q}_{VB} und konstanter Temperaturspreizung $\Delta\vartheta_{WÜST}$ ergibt sich dieser wie folgt:

$$\dot{m}_{VB}(t) = \frac{\dot{Q}_{VB}(t)}{c_P \cdot \Delta\vartheta_{WÜST}(t)}$$

(Gl. 3.3)

mit $\Delta\vartheta_{WÜST}(t) = \vartheta_{P,VL}(t) - \vartheta_{P,RL}$ (bei verwendeter Regelstrategie *konstante Rücklauftemperatur*)

Annahmen: Die Leistungsentnahme $\dot{Q}_V(t)$ und die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{WÜST}$ ist bekannt und vorgegeben. Bei gleitender Vorlauftemperatur ändert sich die primär-Vorlauftemperatur $\vartheta_{P,VL}$ über den Tag. Die Rücklauftemperatur $\vartheta_{P,RL}$ wird im Zuge dieser Modellierung konstant gehalten.

Hier werden nur indirekt angeschlossene Verbraucher berücksichtigt. Diese verfügen über eine WÜST mit (Platten-)Wärmetauscher und damit über einen hausseitigen Sekundärkreislauf, der über den Wärmetauscher vom Primärnetz entkoppelt wird. Abbildung 3.7 veranschaulicht das Fließschema einer hier betrachteten WÜST:

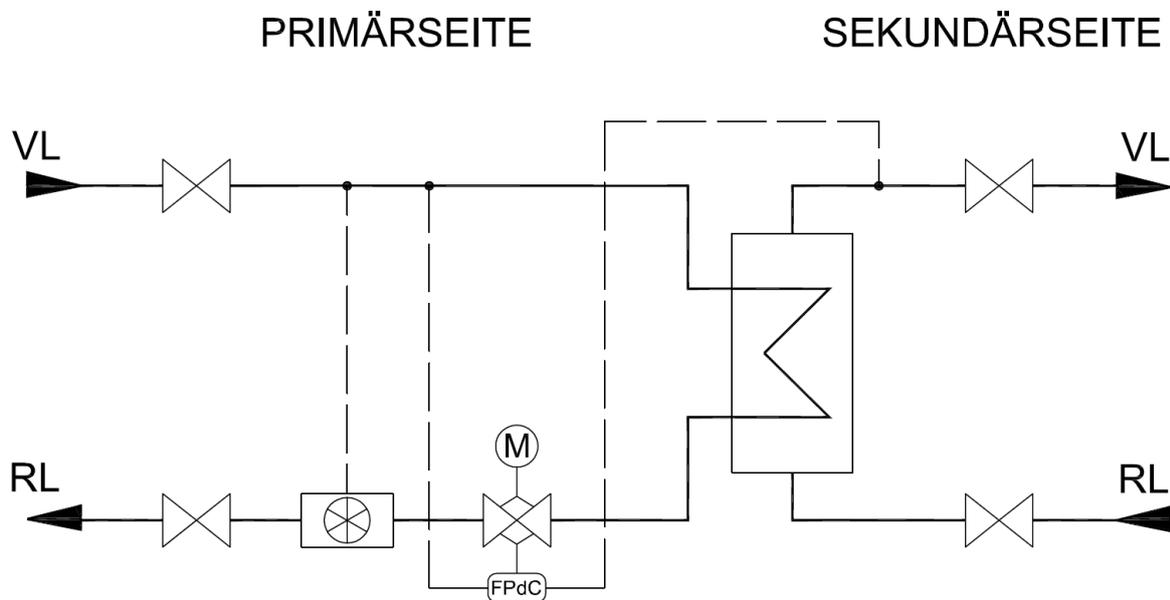


Abbildung 3.7: Fließschema einer Wärmeübergabestation (Primär- und Sekundärseite) mit Hauptkomponenten Plattenwärmetauscher, Kombiventil, Wärmemengenzähler und Absperrventilen

Die Hauptkomponenten sind der Plattenwärmetauscher (Bildmitte), das Kombiventil im Rücklauf, über dessen Ventilstellung die sekundärseitige Vorlauftemperatur geregelt und der maximale Volumenstrom begrenzt wird, der Wärmemengenzähler im primärseitigen Rücklauf sowie Absperrarmaturen in den Vor- und Rückläufen.

Die Verläufe der Leistungsentnahmen und die damit verbundenen Massenströme werden im Folgenden ermittelt. Bei den Ein-/Mehrfamilienhaus-Anschlüssen über eine Betrachtung der historischen Daten und bei den Großverbrauchern zusätzlich noch über die mittlere Außentemperatur.

3.4.2.1. Ein-/Mehrfamilienhaus

Untersuchungen des Wärmebedarfs von Ein-/ Mehrfamilienhäusern haben ergeben, dass die beiden Haupteinflussfaktoren die Außentemperatur und das Verbraucherverhalten sind [18]. Unter Verbraucherverhalten werden hierbei Einflussgrößen der Verbraucher wie körperliche Verfassung und Lebensstandard verstanden. Andere Einflussgrößen wie zum Beispiel Wetterbedingungen (Sonnenstrahlung, Wind) haben weniger Einfluss auf den Wärmebedarf. [19].

Andere (interne) Einflussgrößen betreffen bauliche Gegebenheiten im Sekundärkreis des Wärmeverbrauchers. Historisch bedingt verfügen viele Verbraucher im betrachteten Fernwärmenetz in Großarl über einen Pufferspeicher. Dies ist in der Tatsache begründet, dass die Kunden im Zuge des Anschlusses an das Fernwärmenetz ihren alten Ölbrenner durch eine WÜST ersetzt haben. Der vorher bereits installierte Pufferspeicher blieb weitestgehend erhalten. Bei Neubauten wurde meist auf den Pufferspeicher verzichtet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine detaillierte Untersuchung des Verbraucherverhaltens durchgeführt. Die qualitative Ermittlung der Verbraucherkfunktionen erfolgt durch die zufällige Auswahl von einem der vier Standardverläufe (Abbildung 3.8). Die quantitative Anpassung der Verbraucherkfunktionen erfolgt im Anschluss durch den Abgleich mit den Tagesenergieentnahmen des Vorjahresmonats.

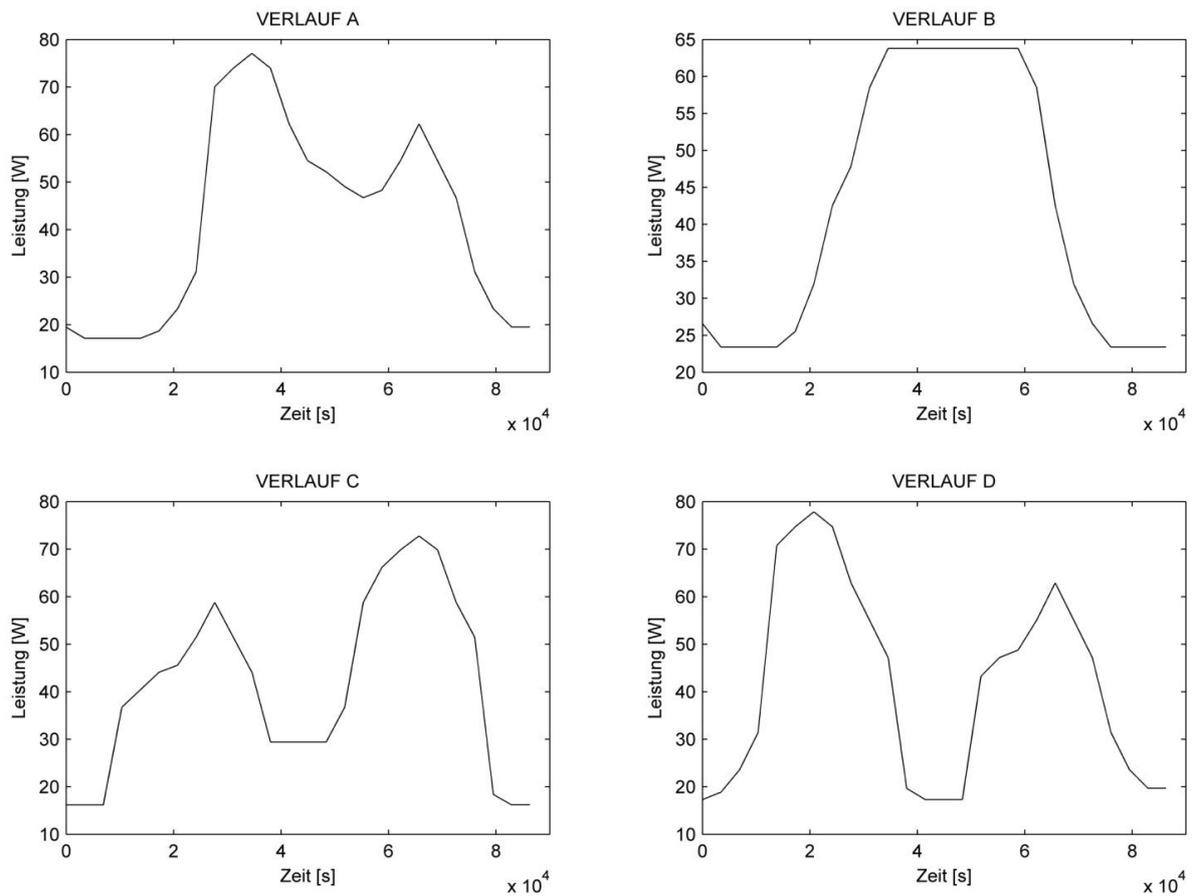


Abbildung 3.8: Standardverläufe Leistungsabnahme Ein- und Mehrfamilienhäuser

Der ausgewählte Verlauf wird anschließend im Rahmen des Preprocessings der Simulation quantitativ angepasst, es erfolgt also eine Skalierung des Verlaufes an der Ordinate, sodass die Fläche unterhalb der Kurve mit der Tagesenergieentnahme der Vorjahreswerte des Verbrauchers übereinstimmen.

3.4.2.2. Hotel

Ausgehend von historischen Daten der an das Fernwärmenetz angeschlossenen Großverbraucher wird eine Verbraucherkurve erstellt. Anhand von realen Messdaten wird eine Jahresverbrauchskurve ermittelt, welche den Wärmebedarf über einen Tag für die verschiedenen Tage eines Jahres darstellt. Der so entstehende Verlauf wird anschließend noch über die Außentemperatur der Größe nach angepasst.

Die Messdaten stammen von einem Hotel in Tirol und sind viertelstündliche Werte des Wärmemengenzählers an der WÜST des Hotels im Zeitraum Jänner 2006 bis Dezember 2007.

In fünf Schritten wird ausgehend von den Messdaten eine spezifische Verbraucherkurve für das o.g. Hotel entwickelt. Die Ermittlung der Funktion erfolgt zweistufig: Nach der qualitativen Wärmebedarfsermittlung (Schritte 1-4) folgt die quantitative Anpassung der Kurve an die (abhängig von der Außentemperatur) erforderliche Energiemenge (Schritt 5).

1.) Monatliche Darstellung Wärmemengenverbrauch für einen Tag

Die Messdaten lagen in Form von Spaltenvektoren vor. Vektoren für Leistungsentnahme und Außentemperatur und die korrespondierenden Vektoren für Datum und Tageszeit im Zeitraum Januar 2006 bis Dezember 2007 standen zur Verfügung. Durch Aufbereitung der Daten werden vier Matrizen erstellt:

- Die monatliche Leistungsmatrix, welche spaltenweise mit den entnommenen Wärmemengen der Tage des Monats gefüllt wird. Die Anzahl der Elemente in den Zeilen ist gleich der täglichen Messwerte. Dimension: $[n_{M,d} \times n_d]$ mit $n_{M,d}$ Anzahl der Messwerte pro Tag und n_d Anzahl der Tage des Monats
- Die Zeitmatrix, welche zeilenweise mit den aggregierten Sekundenwerten der korrespondierenden Messwerte gefüllt wird. Die Spalten stellen wieder die Tage eines Monats dar. Dimension: wie monatliche Leistungsmatrix.
- Die Datumsmatrix: die Spalten sind mit der fortlaufenden Nummer der Monatstage gefüllt. Dimensionen wie die beiden vorhergehenden Matrizen.
- Die Außentemperaturmatrix: Enthält die aufgezeichneten Außentemperaturen für die korrespondierenden Messwerte.

Diese jeweils 4 Matrizen werden für alle Monate des Jahres erstellt.

Abbildung 3.9 enthält die grafische Darstellung der Wärmenahmemeistungen für Januar 2006:

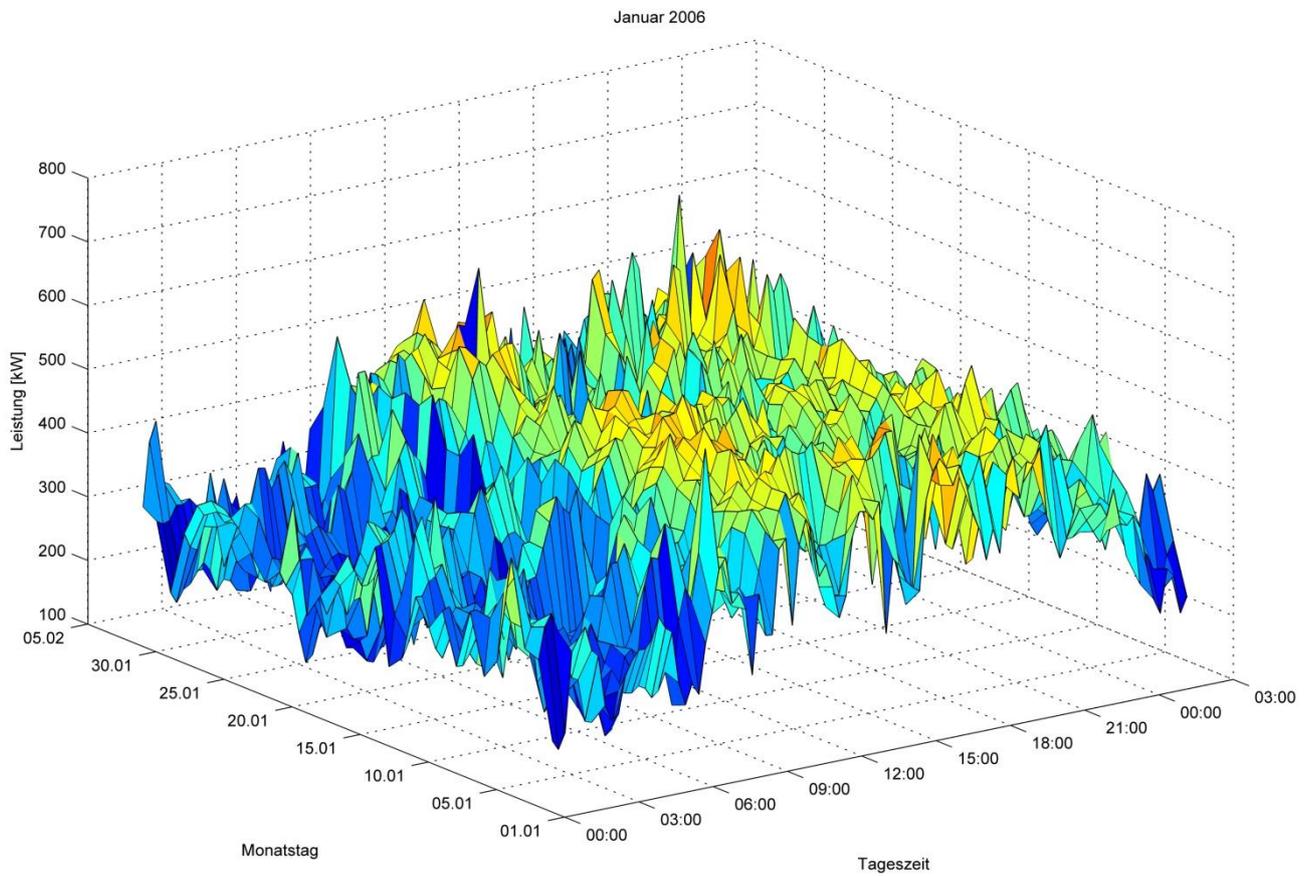


Abbildung 3.9: Leistungsentnahmen Hotel im Zeitraum Januar 2006

Im Allgemeinen fällt auf, dass es zwischen 09:00 und 20:00 Uhr ein erhöhter Leistungsbedarf besteht. Die monatstägliche Schwankung der täglichen Leistungskurven fällt nicht sonderlich auf.

2.) Erstellung der Jahresverlaufsmatrix

Durch die Auswahl von jeweils drei Tagen eines Monats, welche den monatlichen Verlauf jeweils gut repräsentieren, wird die Jahresverlaufsmatrix ermittelt. Sie besteht aus der Zusammenfassung der 36 Tage in der Jahresverlaufsmatrix. Die Visualisierung des Jahresverbrauchs sieht folgendermaßen aus (Abbildung 3.10):

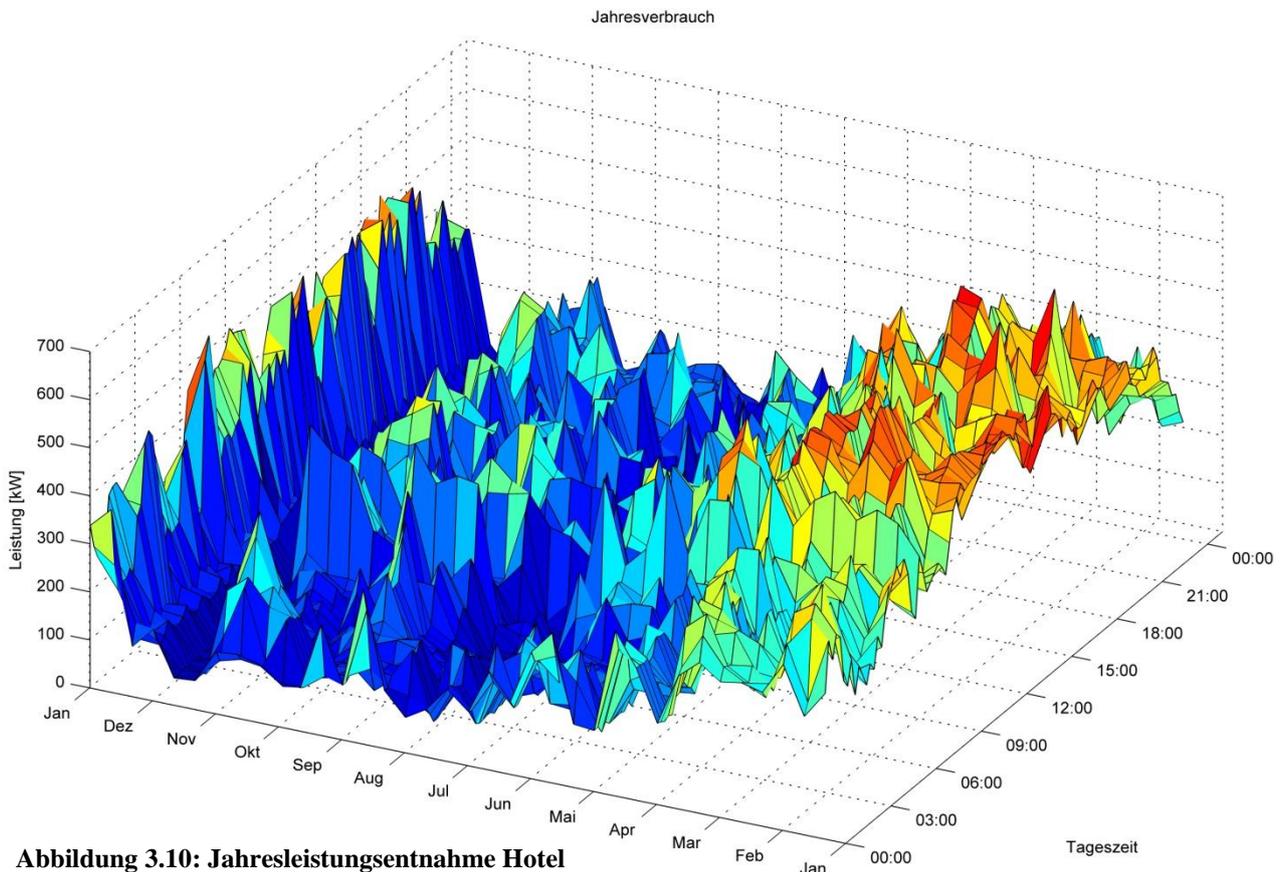


Abbildung 3.10: Jahresleistungsentnahme Hotel

Es fällt auf, dass der Verbrauch in den Wintermonaten wegen dem hohen Anteil der Heizleistung viel höher ist als in den Sommermonaten. Die da auftretenden Spitzen sind auf den Warmwasserverbrauch zurückzuführen. Das betrachtete Hotel war offensichtlich im November geschlossen, da in diesem Monat die Leistung fast auf null zurückgeht.

3.) Normierung der Leistungsmatrix

In diesem Abschnitt erfolgt die Erstellung der Hotel-Verbraucherfunktion nur qualitativ. Daher sind wir hier nicht an Absolutwerten der Wärmeentnahme interessiert. Deshalb wird in diesem Schritt die Verbrauchermatrix auf ihren Maximalwert normiert. Ergebnis ist derselbe Verlauf wie in Abbildung 3.10, jedoch skaliert um den Maximalwert der Jahres-Verbrauchsmatrix.

4.) Erstellung der 3D-Fläche (Visualisierung des Jahresverbrauchs)

Ausgehend von der Jahresverlaufsmatrix wird jetzt eine Regression angewandt, die aus den Messwerten eine stetige Funktion in Form einer 3D-Fläche erstellt. (Abbildung 3.11)

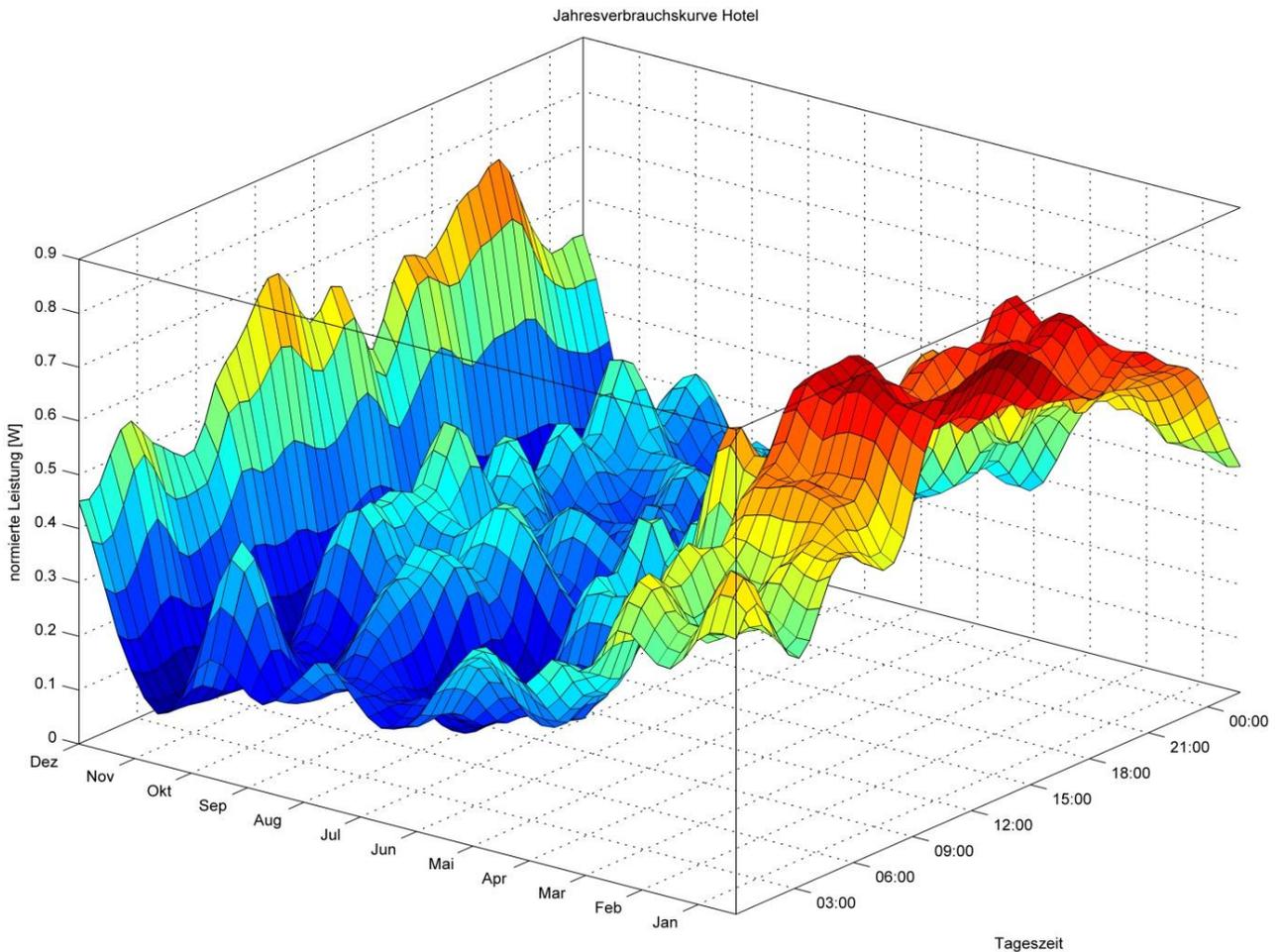


Abbildung 3.11: Regressionsfläche des Jahresverbrauchs Hotel

5.) Ermittlung des Zusammenhanges Leistungsbedarf-Außentemperatur

Die Quantitative Anpassung der Verbraucherfunktion erfolgt mithilfe einer linearen Regression. Dabei wird monatsweise die Energieentnahme über der mittleren Außentemperatur aufgetragen. Die aus diesem Datensatz ermittelte lineare Regressionsgerade dient als Skalierfaktor der Standardverbraucherfunktion. Dies geschieht für jeden Monat.

Folgende Abbildung 3.12 enthält die lineare Regression eines Hotel-Energieverbrauchs über die mittlere Außentemperatur des Monats September:

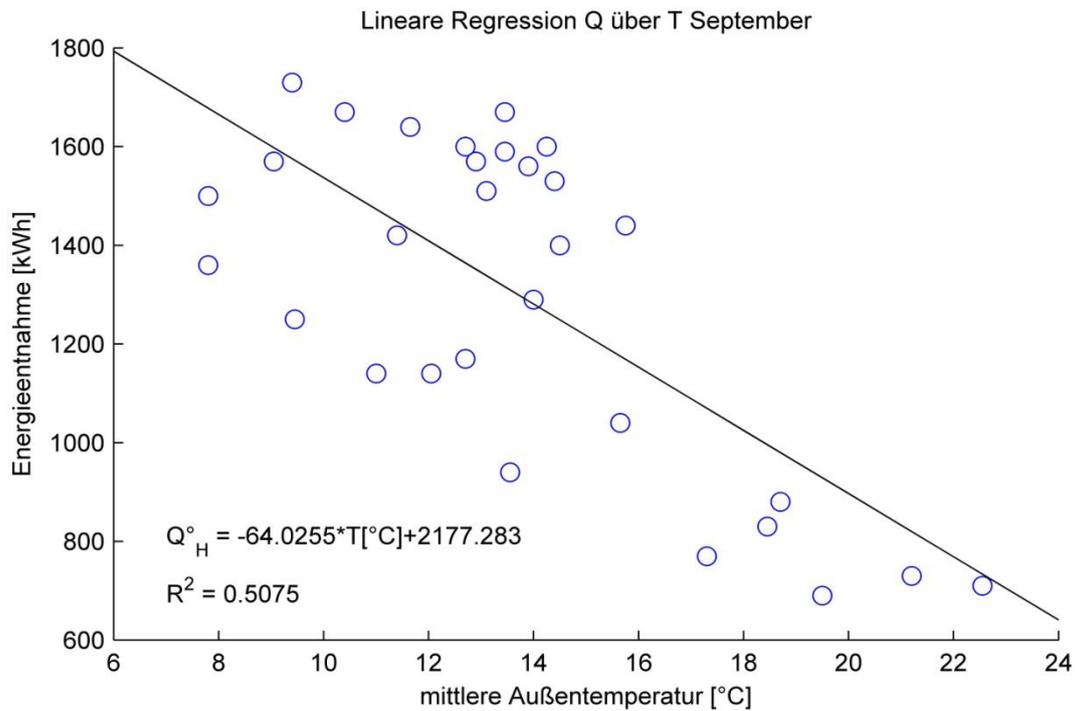


Abbildung 3.12: Lineare Regression Außentemperatur/Energieentnahme

Diese Regressionsgerade stellt die Grundlage für die quantitative Anpassung der Hotel-Verbraucherkurve dar. Nachdem die qualitative Hotel-Verbrauchsfunktion ermittelt wurde (die 3D-Fläche wird am zu simulierenden Tag "abgeschnitten"), wird diese mit der aus der linearen Regression ermittelten prognostizierten Tagesenergiemenge skaliert. Daraus folgt eine qualitativ und quantitativ richtige Verbrauchsfunktion des betrachteten Hotels, deren Integral über den Tag gleich der vorhin prognostizierten Energieentnahme ist.

Anmerkung: Die Entwicklung der allgemeinen Hotel-Verbraucherfunktion (Abbildung 3.11) wurde hier beispielhaft an einem Hotel durchgeführt. Da die Form der 3D-Fläche jedoch stark von Hotel zu Hotel variiert, wird empfohlen für jedes betrachtete Hotel eine eigene Jahresverbrauchsfunktion zu erstellen.

3.4.2.3. Industrieverbraucher

In erster Näherung wurden bei den Industrieverbrauchern dieselben Verläufe der Verbraucherfunktionen angenommen wie bei den Ein-/Mehrfamilienhausanschlüssen. Da der Anteil der Industrieverbraucher im betrachteten Fernwärmenetz jedoch beträchtlich ist, wird empfohlen die Verläufe der Leistungsentnahmen (inklusive Massenstromverläufe) durch reale Messdatensätze zu ersetzen.

3.4.3. Modell Übergabestation

Das vereinfachte Modell einer WÜST für die verschiedenen Verbrauchergruppen wurde ebenfalls mithilfe eines Rohrelementes realisiert. Die folgende Abbildung 3.13: Simscape-Modell einer Wärmeübergabestation zeigt die Verschaltung der verwendeten Blöcke:

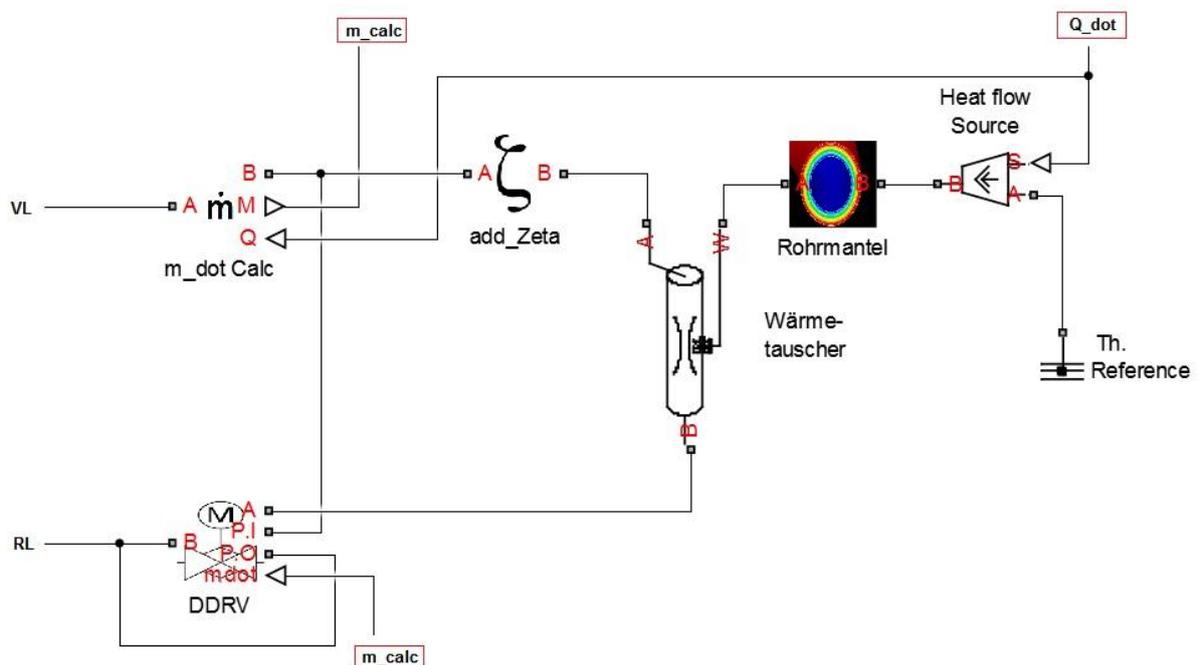


Abbildung 3.13: Simscape-Modell einer Wärmeübergabestation

Der Block besteht aus folgenden Komponenten:

- Rohrelement (*Wärmetauscher*): Dieses modelliert den Plattenwärmetauscher, welcher als Wärmeübergabeelement fungiert.
- Differenzdruckregelventil (*DDRV*): Dient zur Steuerung des Massenstroms über einen veränderlichen Rohrwidestand (Ventilhub). Je nach berechnetem Massenstrom (m_calc) zur Einhaltung der Regelgröße (konstante Rücklauftemperatur, bzw. konstante Temperaturspreizung) wird die Stellgröße Ventilhub angepasst.
- Massenstromrechner (*m_dot_Calc*): Dieser ermittelt mit den Inputgrößen Vorlauftemperatur und Verbraucherleistung(t) den erforderlichen Massenstrom (m_calc), welcher nach außen übergeben wird (zum Zweck der Massenstromstartwertvorgabe) und in weiterer Folge wieder dem Differenzdruckregelventil als Inputgröße übergeben wird.
- zusätzlicher Rohrwidestand (*add_Zeta*): Zusätzliche Rohrwidestände wie beispielsweise jener des Plattenwärmetauschers können hier eingegeben werden. Dadurch verändert sich der Gesamtwidestand des Blocks WUEST und damit die Ventilstellung des Differenzdruckregelventils.
- *Rohrmantel*: Modelliert den Mediumrohrmantel.
- *Heat flow Source*: Hier wird die Verbraucherfunktion angeschlossen. Modelliert den Wärmefluss über den Wärmetauscher.

Der Block verfügt über folgende Ein- und Ausgänge:

- *VL*: mediumgebunden. Wassereintritt in die WUEST
- *RL*: mediumgebunden. Wasseraustritt aus der WUEST
- *m_calc_out*: wird von der Komponente *m_dot_Calc* berechnet.
- *m_calc_in*: wurde von der Komponente *m_dot_Calc* berechnet und dient als Ermittlung der Stellgröße Ventilhub des Differenzdruckregelventils.
- *Q_dot*: Anschluss der Verbraucherfunktion aus dem Workspace.

Nach der Zusammenfassung in der Composite-Component ergibt sich das Modell des Verbrauchers mit den Knoten VA (Vorlauf) und RB (Rücklauf) sowie den Input-Ports V für die Verbraucherfunktion und M_I, bzw. M_O für den Massenstromverlauf (Abbildung 3.14)

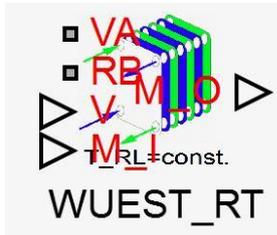


Abbildung 3.14: Composite Component *WUEST_RT*

Der Block verfügt über folgendes Parametereingabefenster (Abbildung 3.15)

Abbildung 3.15: Eingabefeld der Komponente *WUEST_RT*

Die in den Kapiteln 3.4.2.1 und 3.4.2.2 ermittelte Verbraucherfunktion wird von außen als Funktion vorgegeben.

Um welche Art von Verbraucher es sich handelt wird durch die beiden Input-Nodes V und M festgelegt. Über den Knoten V kann das Verbrauchermodell mit einer zeitvariablen Leistungsentnahme (Verbraucherfunktion) gespeist werden. Knoten M dient zur Vorgabe eines Massenstromes von außen.

Sollten Messdaten für die Verbraucherfunktion und/oder Massenstrom zur Verfügung stehen, können diese über die beiden Knoten V und M_I als verbesserte Inputdaten für die Simulation vorgegeben werden. Der Signaleingang M_O bleibt in diesem Fall unbesetzt.

3.4.4. Modell Übergabestation am Netzende

Am Netzende werden dem Modell von außen bestimmte Druckbedingungen aufgeprägt (siehe auch Abbildung 3.6). Dieser Tatsache Rechnung tragend wurde der Block WUEST_RT so abgeändert, dass der Druck eigens durch zwei Input-Ports festgelegt werden kann. Der Block für den SP-Verbraucher hat folgendes Aussehen (Abbildung 3.16):

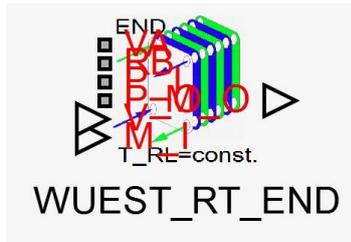


Abbildung 3.16: : Composite

Component *WUEST_RT_END*

Dabei bedeuten die Anschlüsse von oben nach unten: *VA*: Anschluss Wasser Vorlauf; *RV*: Anschluss Wasser Rücklauf; *P_I*: Anschluss an den Vorlaufdruck-Block oder der Anschlussleitung mit dem geforderten Druck (Kap. 3.4.5), hier Vorlaufdruck; *P_O*: Anschluss an den Rücklaufdruck-Block oder der Anschlussleitung mit dem geforderten Druck, hier Rücklaufdruck; *M_I*: Anschluss des Ausgangs des Memory-Blockes; *M_O*: Anschluss des Einganges in den Memory-Block.

3.4.5. Netzende

Das Netzende beinhaltet zwei Mal den Block *Tp_reservoir* (Abbildung 3.17).

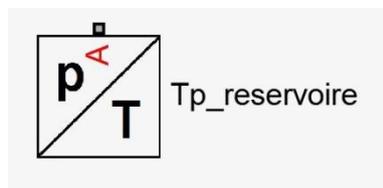


Abbildung 3.17: Block *Tp_reservoir*

Im ersten Block wird der Vorlaufdruck p_{SP1} und im zweiten der Rücklaufdruck p_{SP2} des SP eingestellt.

Anmerkung: Die im Block eingestellten Temperaturen haben keinen Einfluss auf das Systemverhalten. Sie werden von den systemvariablen Temperaturen überschrieben.

3.4.6. Erzeugermodelle (Kessel + Pumpe)

Auf die detaillierte Modellierung der Heizwerk-Komponenten Kessel und Pumpe wurde in dieser Arbeit verzichtet. Die Pumpe besteht im Modell aus einer Serienschaltung der beiden Blöcke *Controlled Massflowrate Source* und *Pressure Source* der Standard Thermal-Liquid Library.

Ein Kessel im eigentlichen Sinne gibt es im Modell nicht. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass eine eingestellte Vorlauftemperatur immer bereitgestellt wird. Realisiert wird dies im Modell durch den Block *Temperature_pressure_reservoir_input* der Components_DIHE. Dieser Block ist eine leichte Abwandlung des Blockes *Temperature Pressure Reservoir* der Standard Thermal-Liquid Library. Diese wurde dahingehend abgeändert, dass die Typologie der Druckgröße von einem Parameter auf einen Signal-Input geändert wurde. Dadurch wird es möglich den Druck (Pumpeneingangsdruck) im Betrieb zu berechnen, bzw. je nach sich einstellenden Druckverlusten im Netz zu adjustieren.

Sollte in zukünftigen Simulationen auch mit variablen Vorlauftemperaturen gearbeitet werden, ist es notwendig den Block *T_p_reservoir_input* so abzuändern, dass auch die Temperatur als (zeitvariabler) Input von außen vorgegeben werden kann.

3.5. Funktionsweise Solver

Die Lösung des durch die Verknüpfung der Simscape-Blöcke aufgestellten differential-algebraischen Gleichungssystems im Zeitbereich erfordert Lösungsverfahren. Matlab stellt zu diesem Zweck einige Solver zur Verfügung.

Grundsätzlich muss zwischen Solvern mit variabler und fester Schrittweite unterschieden werden. Wird das Modell als offline-Simulationstool eingesetzt, kommt der Solver ode15s zum Einsatz. Dies ist ein auf der Methode der numerischen Differentiation beruhendes Verfahren, das für steife Probleme geeignet ist.

In Simscape gibt es auch die Möglichkeit Teilsysteme mit lokalen Solvern mit fester Schrittweite zu lösen. Dadurch können steife Teilsysteme mit fixed-step Solvers und nicht steife Systeme mit einem globalen (variable Step-Size-) Solver gelöst werden. Dies kann dabei helfen die Simulationszeit zu verkürzen. Die zur Verfügung stehenden lokalen Solver sind der Implizites-Euler und die Trapezregel. Zusätzlich kann noch die Anzahl der Rechen-Iterationen pro Zeitschritt begrenzt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass bei impliziten Solvern im Vergleich zu expliziten größere Zeitschritte zur Lösung des differenzial-algebraischen Systems angesetzt werden können wird hier auf implizite Solver zurückgegriffen. Auch die numerisch höhere Stabilität bei impliziten Solvern trägt dazu bei, dass diese für eine Fernwärmenetzsimulation angemessener erscheinen. Nachteilig bei impliziten Solvern ist jedoch, dass aufgrund des impliziten Vorliegens der Systemvariablen bei jedem Zeitschritt ein eigenes Gleichungssystem gelöst werden muss. Durch die Vorgabe der festen Schrittweite konnte dieser Nachteil jedoch in Grenzen gehalten werden. Des Weiteren ist das Input-Handling wie z.B. das Filtern der Input-Signale wie Verbraucherkfunktionen, die über Simulink-Blöcke importiert werden bei impliziten Solvern nicht notwendig.

Wird das Modell hingegen als online-Simulationstool eingesetzt, bietet sich die Simulation mit Solvern fester Schrittweite an. Hierbei ist die erforderliche Genauigkeit mit der Schrittweite abzustimmen.

Im speziellen Fall der Fernwärmenetzsimulation wurde hier ein lokaler Fixed-Step-Size Solver (Backwards-Euler) eingesetzt. Die Schrittweite beträgt 100 Sekunden. Dies wurde durch den Einsatz der Simscape Memory-Blöcke notwendig, welche im folgenden Modell eingesetzt wurden um algebraische Schleifen zu umgehen. Diese Memory-Blöcke erfordern Startwerte in den jeweilig zu berechnenden Größen (Kap. 4.2.1, 4.2.3). Für jeden Berechnungsschritt wird der berechnete Wert vom vorhergehenden Durchlauf benötigt. Die Schrittweite dieser Zeitdifferenz muss von Vorne herein bekannt sein. Da dies bei Solvern mit fester Schrittweite der Fall ist, wurde hier auf ebendiese zurückgegriffen.

Zusätzlich hat sich herausgestellt, dass sich die Simulationszeit bei der Verwendung von Solvern mit fester (und angemessen großer) Schrittweite bei ausreichender Simulationsgenauigkeit dramatisch reduziert.

3.6. Ansätze Netzvereinfachung

Da die Simulationszeit des Netzes überproportional mit der Anzahl der Rohrelemente und Verbraucher ansteigt, ist es notwendig im Sinne einer angemessenen Simulationsdauer deren Anzahl zu reduzieren. Die Literatur stellt diesbezüglich eine Vielzahl an Netzvereinfachungsmethoden zur Verfügung.

3.6.1. Überblick Methoden

In [20] werden unter anderem folgende Methoden zur Aggregation von Fernwärmenetzen vorgestellt:

1. *Das stochastische Modell der kritischen Punkte (z.B. [21])*

Als kritische Punkte werden in diesem Zusammenhang die Schlechtpunkte verstanden. Ist die Versorgung dieser Verbraucher gewährleistet, kann davon ausgegangen werden, dass alle anderen Verbraucher im Netz auch ausreichend mit Wärmeenergie versorgt werden können. Es werden also in einem stochastischen Modell nur die Schlechtpunktverbraucher betrachtet, die z.B. das Verhältnis Vorlauftemperatur ab HW zu Vorlauftemperatur am SP ermitteln. Nachteil dieser Methode ist laut Loewen dass, "die Wärmespeicherfähigkeit des Netzes und die Wärmeverluste nicht berücksichtigt und der Pumpenstrom nicht ermittelt werden kann".

2. *Das Modell des äquivalenten Netzes*

In [22] entwickelt Bøhm eine Methode zur Erstellung eines äquivalentes Fernwärmenetz, das eine kleinere Anzahl an Verbrauchern und Rohrleitungselementen enthält. Das der Methode zugrundeliegende Modell besteht aus einem Rohrleitungspaar (Vor- und Rücklauf), einem Verbraucher und einem Bypass.

Diese vorher erwähnten ersten beiden Methoden zur Netzaggregation wurden in [21] kombiniert und zu einem stochastischen Modell der kritischen Punkte in einem äquivalenten Netz zusammengefasst. Das so entstehende Black-Box-Modell (durch die Netzaggregation gehen Systeminformationen

verloren) ist es jedoch nicht mehr möglich nach der Simulation Untersuchungen an beliebigen Netzpunkten vorzunehmen wie z.B. Rückschlüsse auf Temperatur- und Druck im betrachteten Punkt zu machen.

3. Aggregationsmodell auf Basis der Struktur des Ursprungsnetzes

In [21] wird unter den Annahmen des Vorhandenseins aller Rohrgeometrien, des Vorliegens eines Strahlennetzes, der konstanten Rücklauf temperatur aller Verbraucher und der Identität aller Vor- und Rückleitungen ein Modell zur Netzaggregation entwickelt. Zusätzlich werden alle Vor- und Rücklaufleitungen als isotherm angesehen.

Die Ergebnisse der Wärmeverluste dieser Berechnung weichen, wie in [21] gezeigt wird von denen des realen Netzes um ca. 10% ab, da alle Rohrleitungen als isotherm angenommen wurden. Auch kommt es laut [20] aufgrund der Tatsache, "dass bei seriellen Rohrleitungen Verbraucher komplett an das Ende des Ersatzrohres verschoben werden zu deutlichen Laufzeitfehlern. Auch die Drücke im Netz werden nicht berücksichtigt, so dass sich beispielsweise der Pumpenstromaufwand mit dem aggregierten Netz nicht berechnen lässt [...]".

4. Sukzessive Reduktion des Fernwärmenetzes

In [23] wird eine Methode vorgestellt, die nicht vermaschte Fernwärmenetze aggregiert. Die Vorgehensweise erfolgt mit schrittweiser Steigerung des Aggregationsgrades. Die Methode besteht aus zwei Sub-Methoden, der Zusammenfassung von Rohrsträngen sowie der schrittweisen Reduktion von Rohrelementen (siehe Kap. 3.6.2).

5. Systemischer Ansatz zur Aggregation von Fernwärmenetzen

Mit den folgenden Anforderungen wurde in [20] von Loewen ein Verfahren zur Aggregation komplexer Fernwärmenetze entwickelt:

- Bei gleich bleibenden Parametern wie Leistungsentnahme der Verbraucher, Vorlauf temperatur und Massenstrom am Heizwerk sollen Speicherleistung und benötigte Pumpenleistungen des vereinfachten Systems gleich bleiben wie beim Originalsystem (Volumenskonstanz des Netzes)
- Druckfeld- und Temperaturfeldkonstanz für die sich nicht verändernden Netzknoten
- Möglichkeit der Ausnahme von Knoten und Netzelementen aus der Aggregation
- Schrittweise Aggregation des Originalnetzes bis zu einem beliebigen Aggregationsgrad
- Keine Veränderung der Datenstruktur durch die Aggregation

- Keine Veränderung in der Regelstrategie durch die Aggregation
- Möglichst geringe Änderungen der geografischen Lage der nicht in der Aggregation enthaltenen Knoten.

Diese Methode erfordert folgende "aggregationsrelevante Konfigurationsdaten, Betriebsparameter und Stoffdaten" (Tabelle 3.1):

Tabelle 3.1: aggregationsrelevante Konfigurationsdaten, Betriebsparameter und Stoffdaten

Knoten	Temperatur
	Druck
Rohrleitung	Volumen
	Länge
	Durchmesser
	Massenstrom
	Laufzeit
	Austrittstemperatur
	Wärmedurchgangskoeffizient
	Zusatzwiderstand
Verbraucher	Massenstrom
	Anschlusslast
	Auslastungsfaktor
	Austrittstemperatur
Stoffdaten	Spezifische Wärmekapazität
	Dichte
	Viskosität

Aufgrund der Anforderung der Kenntnis der Betriebsdaten wie Druck und Temperatur in jedem Knoten sowie der Verbrauchermassenströme wäre es bei der Anwendung dieser Methode notwendig das Originalsystem zunächst zu modellieren um die daraus erhaltenen Simulationsergebnisse als Inputgrößen für die Netzaggregation verwenden zu können.

Auf die Modellierung des Originalnetzes wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Als Aggregationsmethode wird deshalb die Methode von Larsen et al. [23] gewählt.

3.6.2. Netzaggregation nach Larsen et al.

Obwohl in [20] bei der in [23] beschriebenen Methode der Netzaggregation bemängelt wird, die Netzdrücke nicht zu berücksichtigen und die Methode daher nicht zur Berechnung von Pumpenenergien geeignet wäre, wurde diese Methode in dieser Arbeit gewählt. In Untersuchungen (Kap. 5.1) stellte sich heraus, dass der Fehler in Druckdifferenz und Temperaturdifferenz (zwischen Vor- und Rücklauf) zwischen Originalsystem und vereinfachtem Netz ca. 1% beträgt. Dies ist jedoch nur für geringe Aggregationsgrade zulässig. Deshalb wurde in dieser Arbeit der Kompromiss gewählt, nur jene vom Hauptstrang abzweigenden Nebenstränge zu aggregieren. Die Netzstruktur im Hauptstrang vom Heizwerk bis zum Schlechtpunktverbraucher bleibt unverändert.

Eine der Hauptvoraussetzungen der verwendeten Methode zur Netzaggregation ist die Konstanz der Massenstromverhältnisse der Verbraucher [23]. Untersuchungen in Kap. 5.1 zeigen jedoch, dass der Fehler auch bei unterschiedlichen Verbrauchern (und damit variierenden Massenstromverhältnissen) die 1% Marke nicht überschreitet.

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Methode der Netztransformation nach Larsen et. al. gegeben [23]:

Die Methode reduziert das Netz in zwei unterschiedlichen Vorgangsweisen. Erstens werden Verzweigungen parallelisiert, also Rohre ineinander geklappt, Abbildung 3.18.

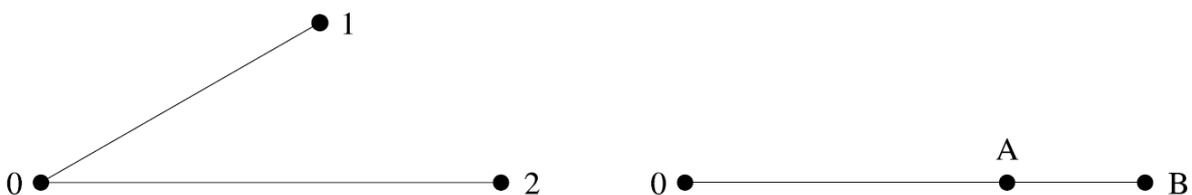


Abbildung 3.18: Vereinfachungsvariante I nach Larsen et.al

Das Originalsystem bestehend aus jeweils zwei (Vor- und Rücklauf) Fernwärmeleitungen (links) wird zum Äquivalentsystem (rechts) transformiert. Folgende Voraussetzungen werden dabei getroffen:

- Die Zeitdauer eines Fluidteilchens von Knoten 0 bis Knoten 1 ist kürzer als von 0 bis 2, ansonsten werden die Indizes der betrachteten Leitungen umgedreht.
- Die Vorlauftemperatur im Knoten 0 ist für beide Netzsysteme gleich
- Die Leistungsentnahme der Verbraucher in den Knoten 1 und 2 ist die selbe wie in den Knoten A und B
- Der mantelseitige Wärmeverlust der Rohre 0-1 und 0-2 ist gleich dem Wärmeverlust der neuen Leitungen
- Fluidseitige Volumenskonstanz der beiden Systeme
- Die das Massenstromverhältnis $\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}$ ist konstant über die Zeit

In [23] wird ein Formelwerk entwickelt, welches die neuen Rohrgeometrien (Indizes A, B) aus den originalen Rohrgeometrien (Indizes 1, 2) ermittelt.

Zweitens wird die Anzahl der Rohrelemente reduziert. Im zweiten Schritt werden Verbraucher auf den jeweils vor- und nachliegenden Knoten mittels Verteilungsfaktoren verteilt, Abbildung 3.19:

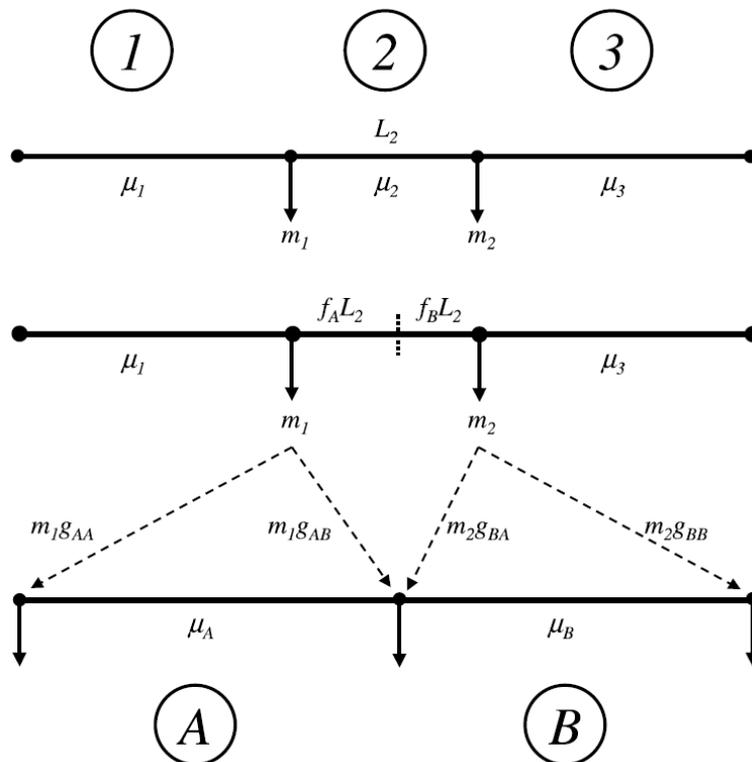


Abbildung 3.19: Vereinfachungsvariante II nach Larsen et.al

Dabei sind μ_i die Massenströme in den Hauptleitungen, m_i die Massenströme zu den WÜSTen der Verbraucher, f_i die Verteilungsfaktoren für Rohrlängen und g_{ij} die Leistungsverteilungsfaktoren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Matlab-Subprogramm (m-File) erstellt, welches diese Transformation für ausgewählte Netzbereiche automatisch vornimmt. Zur Anwendung der Methode auf das Netz in Großarl und der Validierung der Methode sei auf die Kapitel 4.1 und 5.1 sowie Anhang B *Leitfaden zur Netzvereinfachung* hingewiesen.

4. Modell Fernwärmenetz Großarl

4.1. Netztransformation

Mit der Forderung die Komplexität des Netzes (und damit die Anzahl der im Modell verwendeten Blöcke) zu reduzieren, um angemessene Simulationszeiten zu erreichen, wurde die Netztransformation beispielhaft am betrachteten Netz durchgeführt.

Bewerkstelligt wurde dies mithilfe eines Excel-Files, wo der Benutzer angibt, welche Teilbereiche des Netzes aggregiert werden sollen. Die eigentliche Netztransformation findet in Matlab statt. Ein m-File liest die benötigten Daten ein, führt die Netztransformation aus und übergibt die erhaltenen Geometriedaten und Verteilungsfaktoren wieder ins Excel.

Zusätzlich beinhaltet das Excel-File alle Geometriedaten der Netzrohre und dient somit als Geometriedatenquelle für die Simulation in Matlab/Simscape.

4.1.1. Clusterung des Netzes

Um die Übersicht über die Rohrelemente und Verbraucher des Netzes zu wahren, wurde dieses in Cluster unterteilt. Die Netztransformation erfolgt ebenfalls clusterweise. Folgende Abbildung 4.1 zeigt die Unterteilung des Beispielnetzes in Teilabschnitte T01-T12:

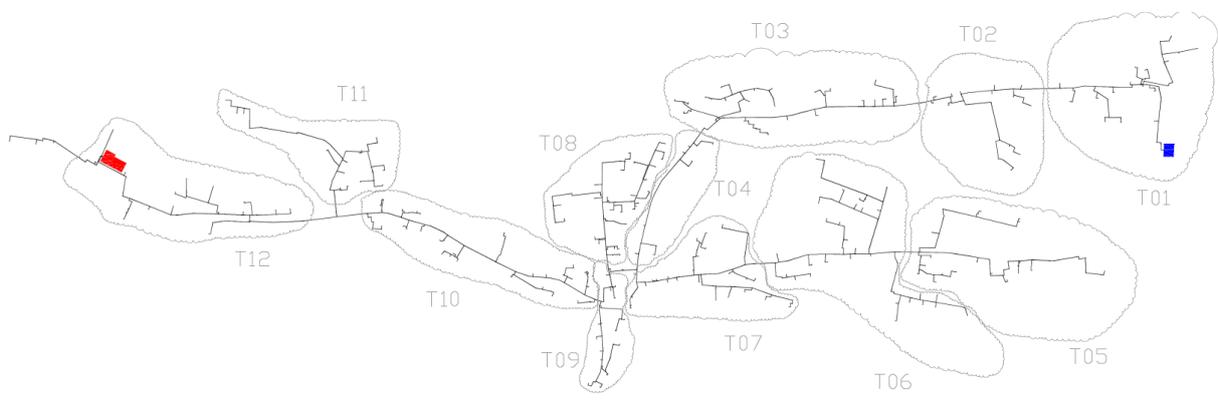


Abbildung 4.1: Einteilung des Fernwärmenetzes Großarl in Cluster. Rot: HW, blau: SP

4.1.2. Vorgehensweise

Es soll im Folgenden ein grober Überblick über die Netztransformation gegeben werden. Genauere Informationen, wie das Excel-File mit Daten bestückt wird, finden sich im Leitfaden zur Netztransformation, Anhang B.

Da für die Ausführung der Transformation wie in Abbildung 3.19 ersichtlich, Massenströme erforderlich sind, werden diese im Rahmen der Transformation nach (Gl. 3.3) berechnet. Ausgangspunkt dafür sind Tagesdurchschnittsenergiemengen und eine angenommene vorlaufseitige Temperaturspreizung von 40K. Die Tagesdurchschnittsenergiemengen setzen sich aus den monatsweisen Vorjahresenergieentnahmen zusammen.

Insgesamt benötigt man für die Transformation folgende Parameter:

- mittlere Dichte Wasser
- Spezifische Wärmekapazität Wasser
- Dichte Mediumrohrmaterial (Stahl)
- Spezifische Wärmekapazität Mediumrohrmaterial
- Wärmeleitfähigkeit Rohrisolierung
- mittlere Temperaturspreizung

Ausgehend vom Netzende (Cluster T01) wird die Netztransformation durchgeführt. Dabei werden alle Verbrauchergruppen (bestehend aus mindestens zwei Verbrauchern), die vom Hauptstrang abzweigen zu drei äquivalenten Verbrauchern zusammengefasst. Folgende Tabelle 4.1 enthält, für den Cluster T01 die Verbrauchergruppen, welche im Rahmen der Transformation zu jeweils drei äquivalenten Verbrauchern zusammengefasst wurden. Die vollständige Tabelle findet sich im Anhang A, Tabelle 3.

Tabelle 4.1: Zusammengefasste Verbraucher nach Cluster

Cluster	HA-Nr.-Cluster	VB-Nr. lt. Plan	äquiv. VB
T01	10-13	252;271;266;255	1,2,3
	3,4,5	142;187;165	4,5,6
	8,9	145;216	7,8,9

Durch die Transformation verringert sich nicht nur die Anzahl der Verbraucher, auch die Anzahl der Rohrelemente wird reduziert, Tabelle 4.2:

Tabelle 4.2: Anzahl Netzelemente vor und nach der Netztransformation

Cluster	vor Transformation		nach Transformation			
	Verbraucher	Rohr- elemente	Verbraucher			Rohr- elemente
			vereinfachte Verbraucher	originale Verbraucher	Ver- braucher gesamt	
T01	17	33	9	8	17	27
T02	13	27	6	8	14	24
T03	16	33	12	5	17	26
T04	15	31	3	7	10	18
T05	18	35	3	0	3	3
T06	23	47	9	6	15	24
T07	27	55	15	8	23	36
T08	28	55	3	0	3	3
T09	15	31	6	2	8	13
T10	29	59	27	5	32	46
T11	15	31	3	0	3	3
T12	17	35	9	6	15	25
T13	1	3	0	1	1	3
Summe	234	475	105	56	161	251
Aggregationstiefe				Verbraucher	Rohrelemente	
				31,197%	47,158%	

Daraus ergibt sich nach der Transformation das folgende Netz (Abbildung 4.2)

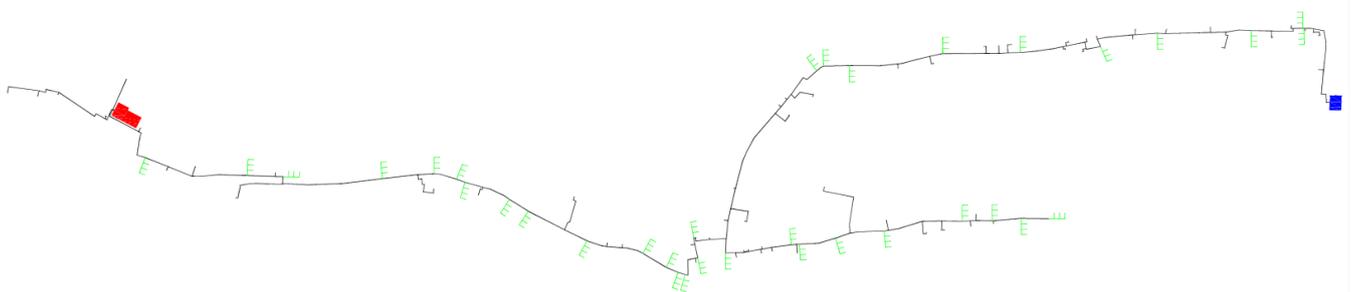


Abbildung 4.2: Fernwärmenetz Großarl nach der Netzvereinfachung. Rot: HW, blau: SP

Die Aggregationstiefen (unterer Teil, Tabelle 4.2) belaufen sich schließlich auf 31,197% bei den Verbrauchern und 47,158% bei den Rohrelementen.

4.2. Überblick Modell in Simscape

Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über das in Simscape entwickelte Fernwärmenetzmodell gegeben werden. Dabei wird nicht detailliert auf die Aufgabe der einzelnen Blöcke eingegangen, sondern grob die Funktionsweise und Verschaltung der Subsysteme erläutert. Die folgende Abbildung 4.3 zeigt das Simscape-Modell des Fernwärmenetzes Großarl:

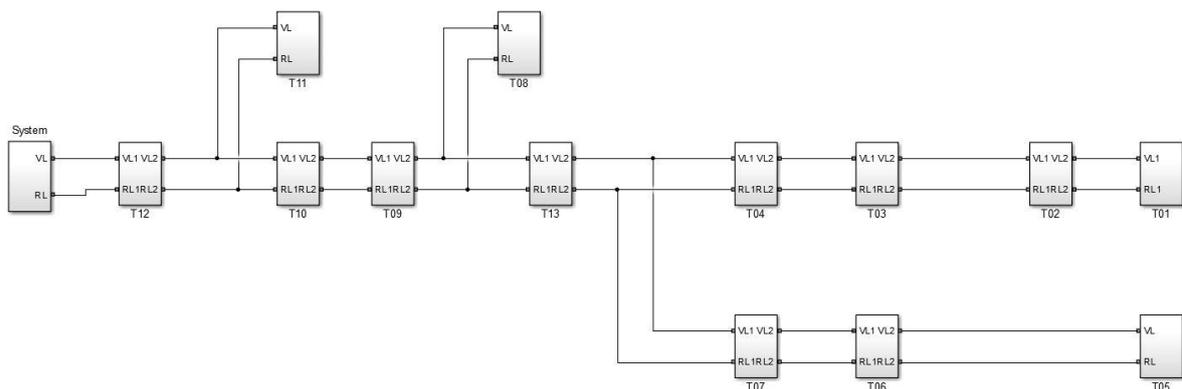


Abbildung 4.3: Simscape-Modell des Fernwärmenetzes Großarl

Das Modell in Simscape gliedert sich in die in Kap.4.1.1 eingeführten Cluster. So wurden für die Cluster 1-13 jeweils Subsysteme geschaffen, in denen die detaillierte Modellierung der Verbraucher vorgenommen wurde. Darüber hinaus verfügt das Netz noch über das Subsystem *System* (ganz links), welches das Heizkraftwerk mit Pumpe und Kessel darstellt.

4.2.1. System

Dieses Subsystem modelliert die Wärmequelle und ist für die Ermittlung des benötigten Vorlaufdruckes zuständig. Abbildung 4.4 zeigt das Subsystem *System*.

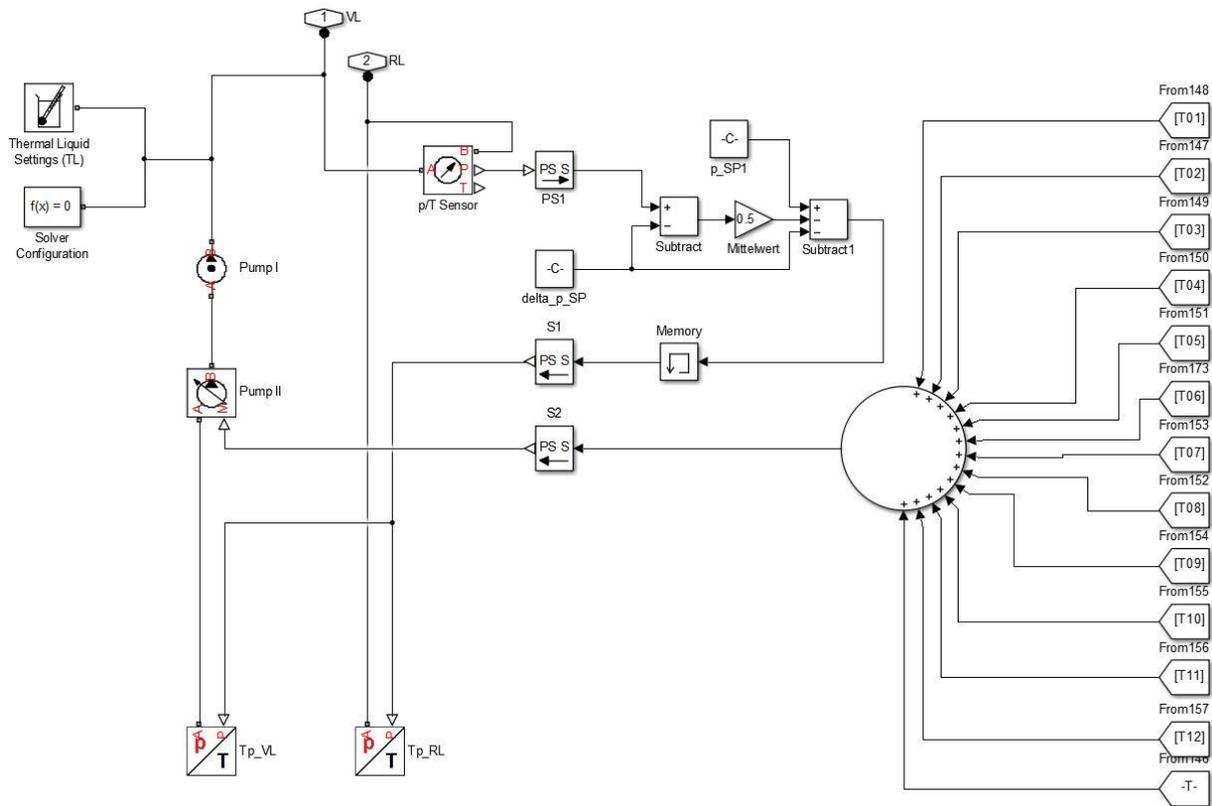


Abbildung 4.4: Submodell *System* des Simscape-Modells

Das Wasser kommt mit einer definierten und im Block Tp_VL (unten links) eingestellten Temperatur aus dem Wärmetauscher. Die beiden Blöcke Tp_VL und Tp_RL modellieren Ein- und Ausgang des Wärmetauschers, welcher als Wärmequelle des Fernwärmenetzes fungiert. Der Vorlaufdruck nach Pumpe (vgl. auch Abbildung 3.6 in Kap.3.4.2) wird vom Modell so berechnet, dass sich beim SP der geforderte Druck im Vorlauf einstellt. Die Berechnung des Rücklaufdruckes (Pumpeneingangsdruck) erfolgt durch die Blöcke im rechten Bereich des Subsystems *System*. Dabei gelten folgende Beziehungen:

$$\Delta p_{VL} = p_{PA} - p_{SP1} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$$\Delta p_{RL} = p_{SP2} - p_{PE} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

$$\Delta p_{SP} = p_{SP1} - p_{SP2} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

$$\Delta p_P = p_{PA} - p_{PE} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

$$p_{PE} = p_{SP1} - \Delta p_{SP} - \Delta p_{RL} \quad (\text{Gl. 4.5})$$

unter der Annahme $\Delta p_{VL} \approx \Delta p_{RL}$ folgt für Δp_{RL} :

$$\Delta p_{RL} = \frac{p_{PA} - p_{PE} - \Delta p_{SP}}{2} = \frac{\Delta p_P - \Delta p_{SP}}{2} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Die Differenz aus Vor- und Rücklaufdruck am Heizwerk Δp_P (entsprechend dem Pumpenausgangs- und -eingangsdruck) wird durch den Sensor *p/T-Sensor* abgegriffen (Gl. 4.4) und mit Hilfe der (Gl. 4.6) der Druckverlust im Rücklauf bestimmt. Zusätzlich wird dann durch (Gl. 4.5) der Pumpeneingangsdruck p_{PE} bestimmt. Dieser wird dann in den Wärmetauscherschnittstellen Tp_{VL} und Tp_{RL} als (zeitlich variabler) Parameter vorgegeben.

Da beim ersten Iterationsschritt noch keine Informationen über Druckverluste in den Leitungen vorliegen, muss im Block Memory ein angemessener Startwert für den Pumpeneingangsdruck vorgegeben werden. Dieser beruht auf Erfahrungswerten und liegt hier im Simulationsbeispiel 40 mbar unter p_{SP2} .

Des Weiteren erfolgt im Subsystem (genannt *System* im Simscape-Modell) die Vorgabe des Massenstroms. Dieser setzt sich aus der Summe aller Einzelmassenströme der Verbraucher zusammen. Im rechten Bereich von Abbildung 4.4 ist ersichtlich, wie die Massenströme übergeben und summiert werden. Dabei ist noch zu erwähnen, dass jeder von einem der Cluster 1-13 kommenden *From*-Blöcke sich wiederum aus der Summe der einzelnen Verbraucher in einem Cluster zusammensetzt.

4.2.2. Cluster

Um die Übersichtlichkeit auch im Rahmen der Modellierung in Simscape zu wahren, wurden die Verbraucher den Clustern T01-T13 zugewiesen. Vgl. auch Tabelle 4.1 in Kap. 4.1.2. Hier wird beispielhaft ein Cluster (*T09*) betrachtet.

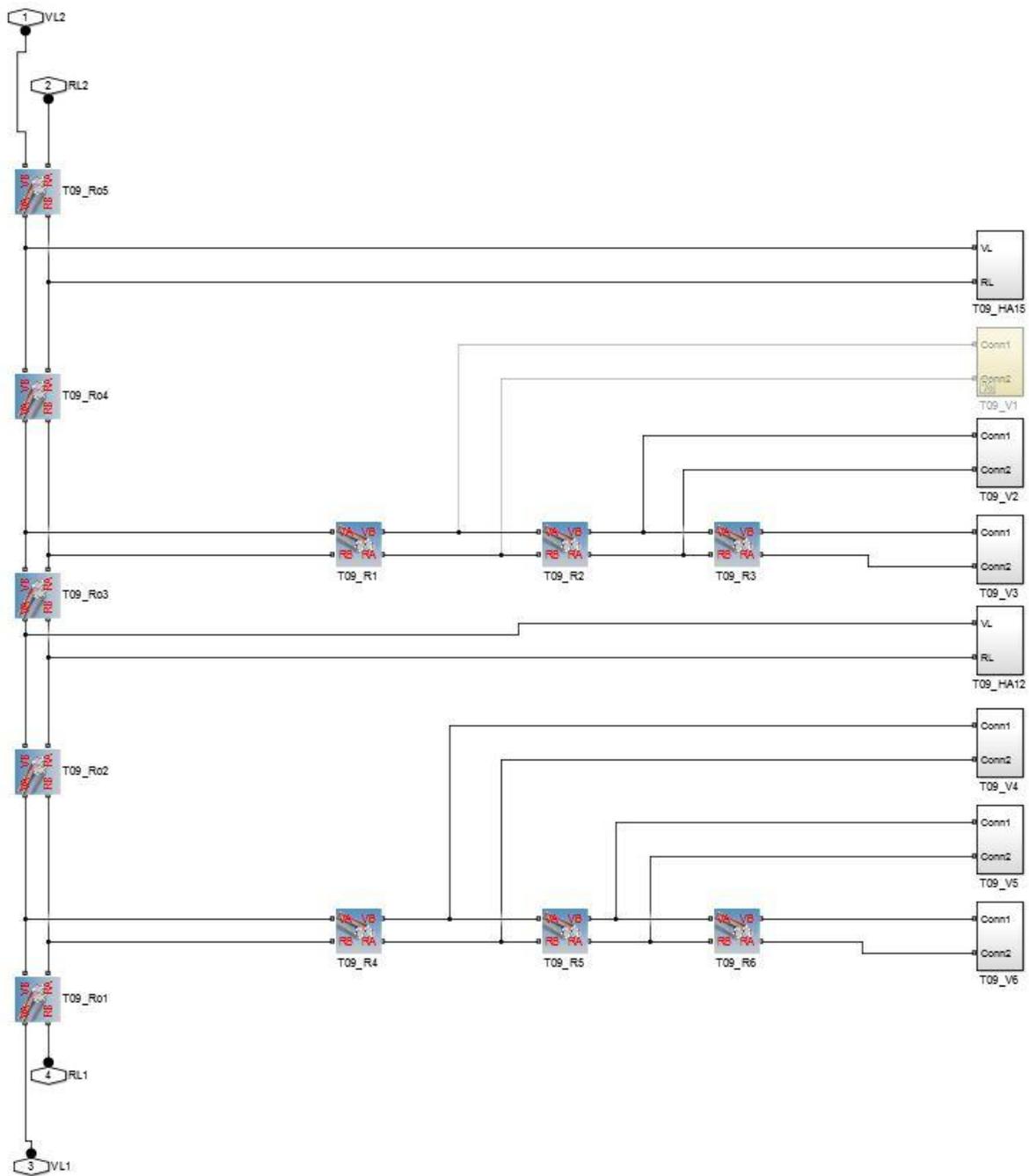


Abbildung 4.5: Subsystem des Clusters *T09* im Simscape-Modell

Die hier Verwendeten Blöcke sind das Rohrmodell (Kap.3.4.1) *DIHE_Tube* und die Subsysteme *Verbraucher* im rechten Bereich. Die Ein- und Ausgänge der Cluster-Blöcke sind die Knoten VL1, RL1 und VL2, RL2. Das Wasser kommt von VL1 und fließt in Richtung VL2.

Die Rohre im Vertikalstrang sind die Rohre der Hauptleitung, während die hier horizontal abzweigenden Rohre die Ergebnisrohre der Transformation sind.

Die Verbraucher, welche hier über kein Rohr verfügen sind die nicht transformierten Verbraucher, also jene Verbraucher, die einzeln am Hauptstrang angeschlossen sind. Alle anderen Verbraucher sind äquivalente Verbraucher, welche durch die Transformation ermittelt wurden.

Anmerkung: Der Verbraucher *T09_VI* ist hier aus der Simulation auskommentiert, da bei dieser Transformationsgruppe nur zwei Verbraucher aggregiert wurden. Die Verbraucherfunktion dieses Verbrauchers ist $\dot{Q}_V(t) = 0$.

4.2.3. Verbraucher

Die Verbrauchermodelle des Simscape-Netzes setzen sich aus zwei Gruppen zusammen: Erstens aus originalen Verbrauchern, welche im Rahmen der Netztransformation nicht vereinfacht wurden und zweitens aus transformierten Verbrauchern, welche transformiert wurden und deren Verbraucherfunktion sich folglich aus einer gewichteten Summe der aggregierten Verbraucher zusammensetzt. Beide Verbraucherarten unterscheiden sich nur durch ein Hausanschlussrohr, welches bei ersteren genannten vorkommt und bei letzteren im Modell, wegen der Transformationsvorgehensweise nicht modelliert wird (siehe auch Leitfaden zur Netzaggregation, Anhang B).

4.2.3.1. originaler Verbraucher

Abbildung 2.3 zeigt das Modell des originalen Verbrauchers *T09_HA12*:

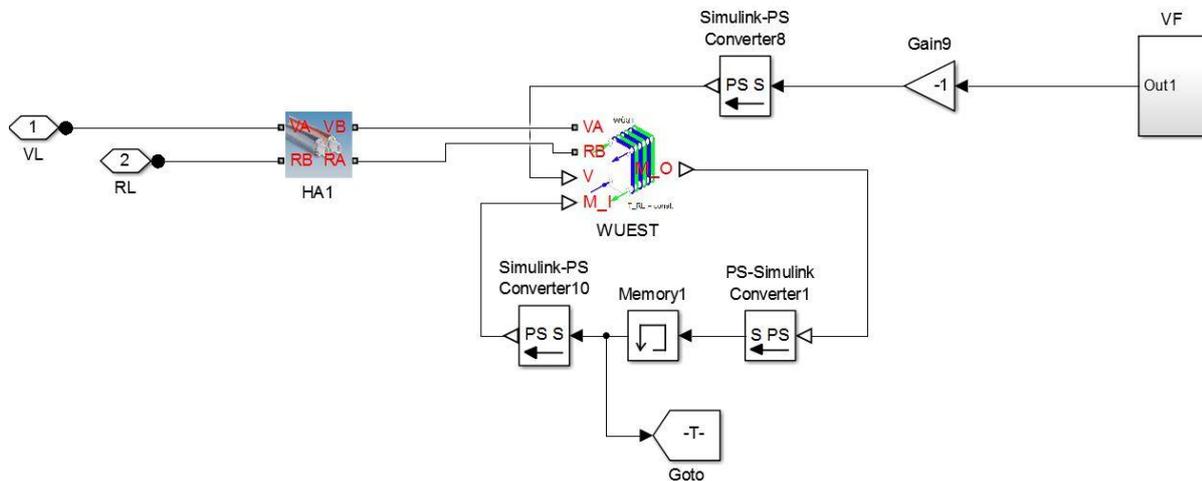


Abbildung 4.6: Simscape-Modell eines Fernwärmeanschlusses (Verbraucher)

Das Rohrelement *HA1* ist die Stichleitung vom Hauptstrang zur WÜST des Verbrauchers. Es unterscheidet sich nicht von den Rohren in Abschnitt 4.2.2.

Der Block *WUEST* ist die Wärmeübergabestation des betrachteten Verbrauchers (Kap. 3.4.3). Der Block *VF* (Verbraucherfunktion) beinhaltet den Block *from Workspace*, die Schnittstelle der Verbraucherfunktion. Diese muss invertiert werden (*Gain9*), da die Leistung dem Netz abgenommen wird. Der im Block *WUEST* berechnete erforderliche Massenstrom zur Erfüllung der Regelstrategie (konstante Rücklauftemperatur, bzw. konstante Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf) wird über den *Goto*-Block zum Subsystem *System* übergeben (Kap. 4.2.1).

Da beim ersten Iterationsschritt noch keine Informationen über erforderlichen Massenstrom vorliegen (dieser wird ja im Block *WUEST* berechnet), muss der Startwert des Massenstromes extern ermittelt und über den *Memory1*-Block eingelesen werden (Kap. 4.3.2.6).

Das Verbraucher Subsystem wird über die Knoten *VL* und *RL* an die Hauptleitung angeschlossen.

4.2.3.2. transformierter Verbraucher

Der transformierte Verbraucher unterscheidet sich vom originalen Verbraucher nur durch das Fehlen der Stichleitung (*HAI* in Abbildung 4.6). Abbildung 4.7 zeigt den transformierten Verbraucher *T09_V4*:

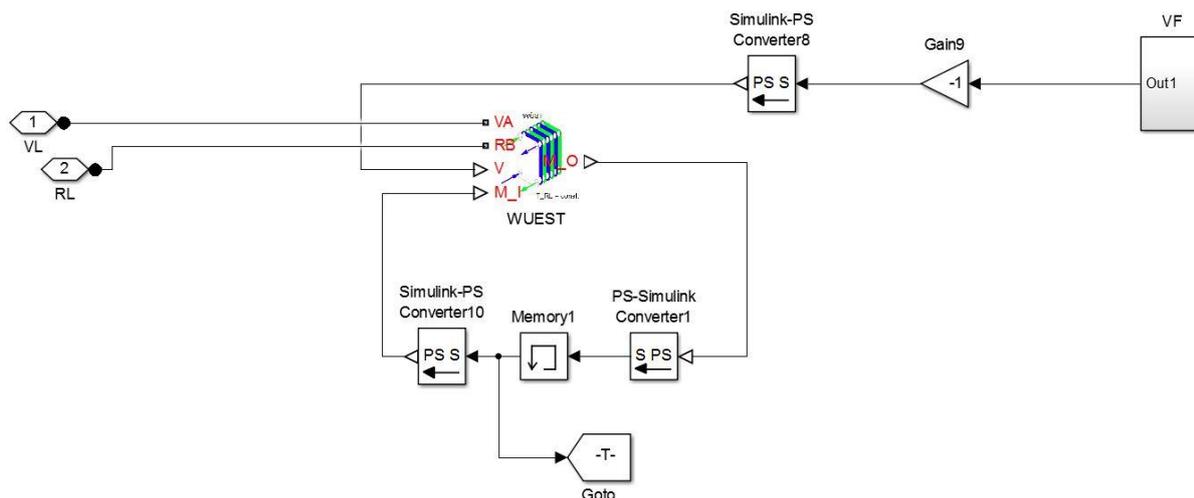


Abbildung 4.7: Simscape-Modell eines vereinfachten Verbrauchers

Die Erklärungen der Blöcke entsprechen jenen in Kap.4.2.3.1

4.2.4. Vermaschung eines Teilbereiches des Netzes

Aufgrund der Tatsache, dass es beim betrachteten Fernwärmenetz in Zukunft zu baulichen Erweiterungen kommen könnte und dadurch die Versorgungssicherheit der Kunden noch wichtiger wird, wird hier auch die Möglichkeit einer Vermaschung des Netzes untersucht (Simulationsergebnisse: Kap. 5.3.4).

Die Abbildung 4.8 des Modells in Simscape zeigt, wo der Einbau eines zusätzlichen Rohrelements angenommen wurde.

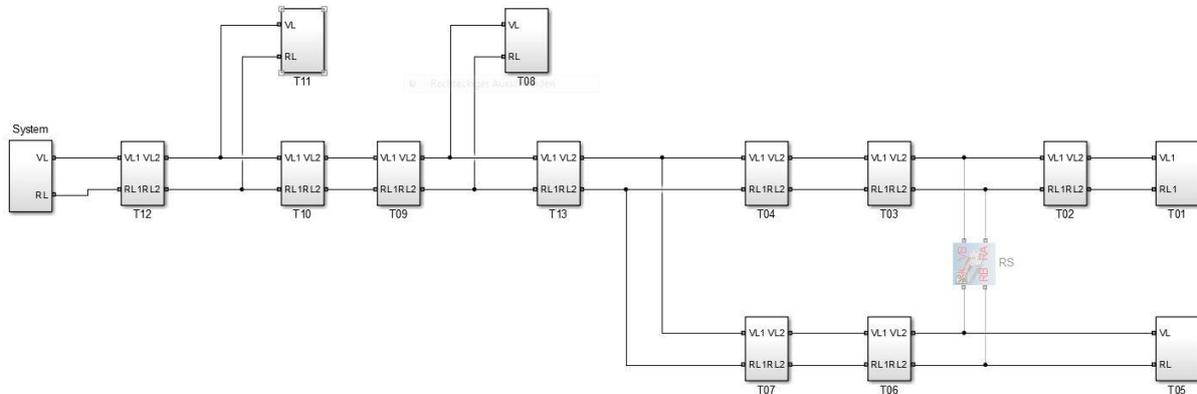


Abbildung 4.8: Lokalisierung des Rohrelements zur Vermaschung des Netzes im Simscape-Modell

Das zusätzliche Rohrelement wird zwischen den Clustern T03-T02 und T05-T06 eingebaut. Das restliche Netz ändert sich nicht. Im Netzplan wurde die Vermaschung des Netzes folgendermaßen angenommen (Abbildung 4.9):

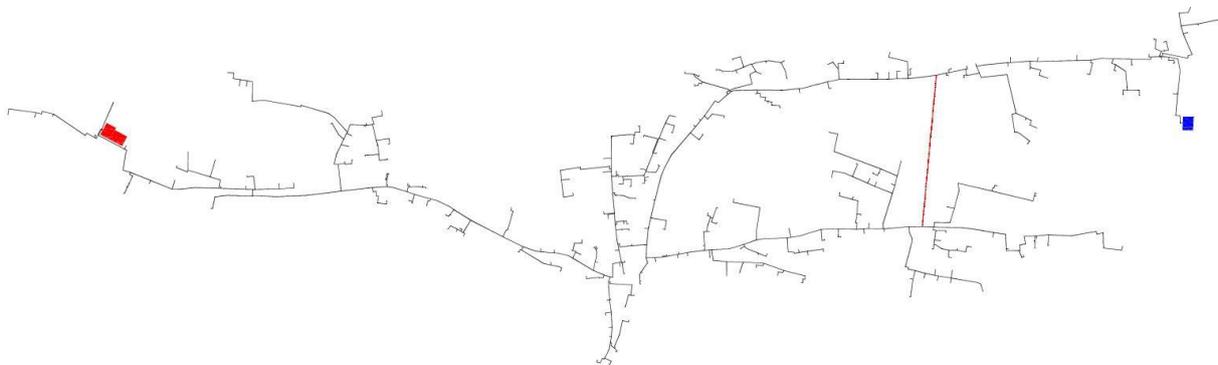


Abbildung 4.9: Vermaschtes Fernwärmenetz Großarl. Rot: HW, blau: SP, rote Linie: zusätzliches Rohr

Die rote Linie im rechten Bildbereich zeigt das zur Erzeugung der Masche zusätzlich nötige Rohrelement.

4.3. Simulation

Die in dieser Arbeit durchgeführte Fernwärmenetzsimulation gliedert sich in zwei Teilbereiche: Einem stationären Anfangsbereich (in den folgenden Simulationen 10 Stunden), bei dem die Verbraucherkurve über die Zeit konstant gehalten wird und der eigentlichen dynamischen Netzsimulation, wo die zeitlich variablen Leistungsentnahmen der Verbraucher schlagend werden.

Der stationäre Teil hat den Zweck, dass alle Variablen der Netzkomponenten (insbesondere Anfangstemperaturen der Rohre und Wärmeübergabestationen) konvergieren und die dynamische Simulation sodann direkt im Anschluss mit den sich real einstellenden Anfangswerten durchgeführt werden kann. Die stationäre Vorlaufzeit kann individuell vom Benutzer eingestellt werden. Wirkt sich jedoch nicht stark auf die Simulationsdauer aus. Die Verbraucherkurven haben im Allgemeinen das folgende Aussehen (Abbildung 4.10):

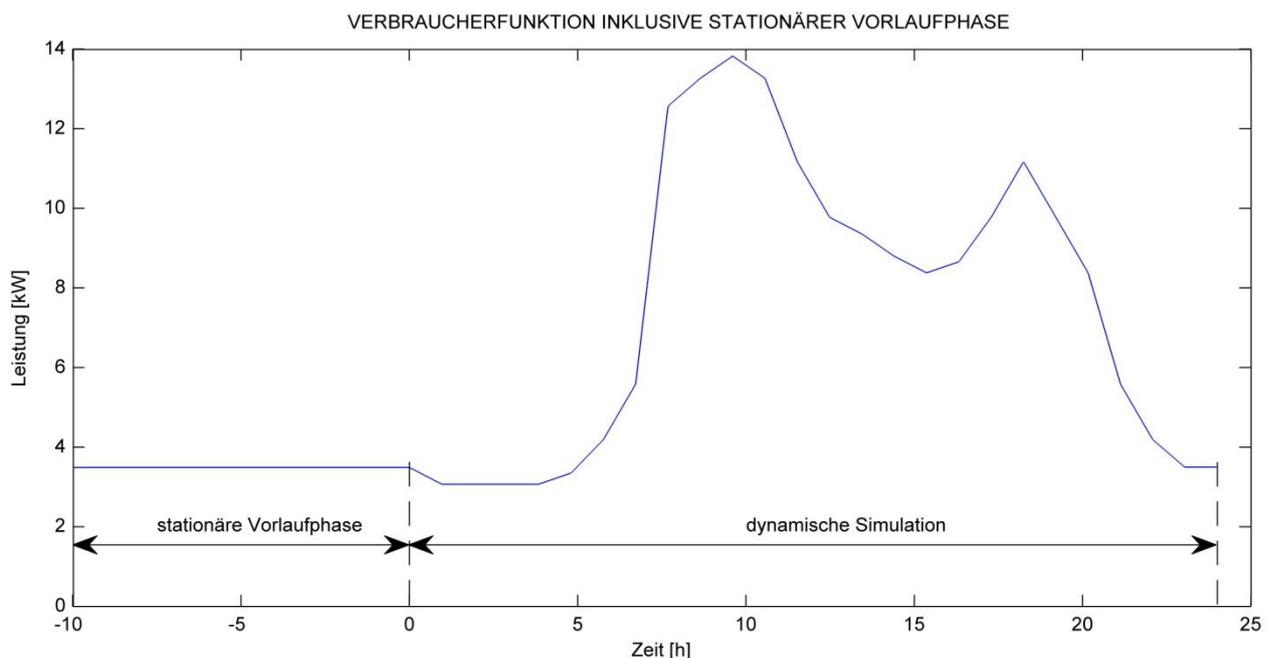


Abbildung 4.10: In der Simulation verwendete Verbraucherkurve

Anmerkung: Wir im Folgenden von Energie- oder Arbeitsgrößen gesprochen, versteht sich darunter die Fläche des dynamischen Teiles der Verbraucherkurve, bzw. das entsprechende zeitliche Integral des dynamischen Teils der jeweiligen Größen.

Die Vorgehensweise bei der Netzsimulation gliedert sich in folgende Einzelschritte:

1. Ermittlung der Verbrauchskurven
2. Netztransformation
3. Ermittlung der vereinfachten Verbrauchskurven
4. Determinierung der finalen Verbrauchskurven inkl. stationärer Vorlaufphase
5. Einlesen der Rohrgeometrien
6. Ermittlung der Startwerte für die Massenströme in den WÜSTen
7. Netzsimulation
8. Anpassen des Temperaturfeldes im Netz
9. Ermittlung des benötigten Kessel- und Pumpenleistungs- und Massenstromverlaufes, sowie Netzwirkungsgrad
10. Schlechtpunktverbraucher: Informationen
11. Druck- und Temperaturfeld im Netz

Die Schritte 1 bis 6 bilden das Simulations-Preprocessing (Kap.4.3.2) und die Schritte 8 bis 11 das Simulations-Postprocessing (Kap 4.3.4)

In den folgenden Kapiteln werden alle Einzelschritte der Netzsimulation erläutert, die erforderlichen Files angegeben und Zeitangaben über die jeweiligen Dauern gegeben. (Rechner: Intel i3, 2,3GHz, 8GB RAM, HD: 320GB 2,5“) Hierbei wird davon ausgegangen, dass jeder Schritt ausgeführt werden muss. Durch die Sicherung der ermittelten Parameter für einzelne Monate geht jedoch ein erheblicher Zeitgewinn einher. So kann im Rahmen einer Bereits durchgeführten Netztransformation für einen Monat auf die Schritte 2 und 5 verzichtet werden. Diese beiden Schritte (Netztransformation und Einlesen der Rohrgeometrien) sind aufgrund der relativ langsamen Matlab-Befehle *xlsread* bzw. *xlswrite* sehr langwierig und müssen nur einmal für jeden Monat durchgeführt werden. Die sich daraus ergebenden Files *Geometrien_XX.m* und *Gross_TRAFO_XX.xlsx* (*XX* ist der Platzhalter für die Monatsnummer) werden gespeichert damit in einer folgenden Simulation darauf zugegriffen werden kann.

4.3.1. Inputparameter

Diese Parameter, zu finden im Workspace *WS* können vom Benutzer innerhalb bestimmter Grenzen vorgegeben werden und dienen zur Analyse der Auswirkungen von systembestimmenden Randbedingungen auf das System. Es sind dies die folgenden:

- Vorlaufdruck am Schlechtpunkt (p_{SPI}): Dies ist der einstellbare Druck in *bar* am *HA17* des Clusters *TO1*. Im Rahmen der Schlechtpunktregelung (vgl. Kap.3.4.2) wurde diese Größe als einstellbare Randbedingung gewählt.
- Druckdifferenz am Schlechtpunkt (Δp_{SP}): Um die ordnungsgemäße Funktion der Anlagenarmaturen am Schlechtpunkt-Verbraucher sicherzustellen, wird diese Größe ebenfalls vom Benutzer vorgegeben.
- Vorlauftemperatur (T_{VL}): Dies ist die Vorlauftemperatur ab Heizwerk in *K* und zugleich die maximale Systemtemperatur. Die Siedetemperatur beim gewählten Druck beträgt $T_s^{p=6bar} = 158,8^\circ C$. Der Sicherheitsabstand zwischen maximaler Systemtemperatur und Siedetemperatur ist ausreichend groß.
- Gewünschte Rücklauftemperatur (T_{RL}): Dies ist die Regelgröße in *K*, wonach die WÜSTen der einzelnen Hausanschlüsse den primärseitigen Wassermassenstrom regeln.
- Simulationsdatum (*Date*): Hier wird das zu simulierende Tagesdatum als String in der Form *tt.mm* oder *tt/mm* eingegeben.
- Tagesmitteltemperatur (T_{mittel_Tag}): Wird für die Ermittlung der Hotel-Verbrauchsfunktionen (in $^\circ C$) benötigt (Vgl. Kap.3.4.2.2)
- Rohrrauigkeit (R_{Tube}): Absolute Rohrrauigkeit in *m*. Laut Herstellerkatalog der Rohre [13] wurde in den folgenden Simulationen ein Wert von 20 μm gewählt.
- Option für stationäre Simulation (VB_{const}): Beim Wert von 1 wird eine stationäre Simulation des Systems mit den Startwerten der Leistungen der einzelnen Hausanschlüsse durchgeführt. Beim Wert von 0 wird die reguläre dynamische Simulation wie hier beschrieben durchgeführt.

- Leistungskontrolle (*Kontrolle*): Dies ist eine Kontrollvariable und hilft bei der Überprüfung, ob die Transformation richtig ausgeführt wurde. Dies geschieht über die Leistungskontrolle (Vgl. Kap. 4.3.2.3)
- Ausgeführte Transformationen (*Trafo_done*): Dieser Vektor enthält als Elemente alle Monatsnummern, deren Transformation bereits ausgeführt wurde. Im Sinne einer Netzsimulation mit möglichst hohem Automatisierungsgrad erkennt das Programm, ob es die Netztransformation nochmals ausführen soll oder nicht.

Bei den Ausdrücken in Klammer handelt es sich um die Variablennamen im Matlab Workspace *WS*.

Die letzteren drei genannten Parameter (*VB_const*, *Kontrolle* und *Trafo_done*) sind hier der Vollständigkeit halber angeführt. Diese bilden keine Systemparameter sondern sind lediglich Simulationsoptionen oder haben lediglich Kontrollcharakter.

4.3.2. Preprocessing

Bevor die eigentliche Netzsimulation durchgeführt werden kann, müssen die Leistungsverläufe der einzelnen Verbraucher ermittelt, die Netztransformation bei Bedarf durchgeführt und die sich daraus ergebenden Netzgeometrien und neuen Leistungsverläufe eingelesen, bzw. ermittelt werden. All dies geschieht im Rahmen des Simulations-Preprocessings.

4.3.2.1. Ermittlung der Leistungsverläufe

Erforderliche Files:

- *update_Verbraucherfunktionen.m*
- *Energiemengen_Hausverbraucher.mat*
- *Verlaufe_allgemein.mat*
- *Verbrauchskurve_Hotel_Fläche.mat*
- *linregmatrix.mat*
- *Powervector.m*
- *Regression_Hotels.mat*
- *Standardverlauefe.mat*

Output:

- Verlauf_real
- Energiemengen im Sheet *Hausanschlüsse* in *Gross_TRAFO.xlsx*

Benötigte Zeit: ca. 1 Minute

Ausgehend von den 4 Standardverläufen (Abbildung 3.8) wurden für die 12 Netzcluster und den Verbraucher *HA51 (T13)*, der wegen der Netztopologie keinem Cluster zugeordnet werden konnte, insgesamt 13 Matrizen erstellt, die jeweils die Verbraucherkurven der einzelnen Hausanschlüsse enthalten (*Verlaufe_allgemein.mat*). Der qualitative Verlauf der Verbraucherfunktionen wurde bei den Einzelverbrauchern zufällig aus den 4 Standardverläufen gewählt (*Standardverlauefe.mat*). Die Verbraucherkurve für die Hotelanschlüsse erfolgt durch „Abschneiden“ der 3D-Fläche (*Verbrauchskurve_Hotel_Fläche.mat*) am ausgewählten Datum. (siehe Kap. 3.4.2.2). Die quantitative Anpassung der Verbraucherfunktionen erfolgt bei den Hausanschlüssen mithilfe des (im Workspace *WS*) gespeicherten Datums (*Energiemengen_Hausverbraucher.mat*) und bei den Hotels zusätzlich noch über eine lineare Regression (*Regression_Hotels.mat*) mithilfe der Außentemperaturvorhersage (ebenfalls zu finden im File *WS*).

Die Verbrauchskurven sind in Form von Timeseries-Objekten abgebildet mit jeweils 864 Elementen, also diskretisiert in Zeitintervallen von 100 Sekunden.

Die Tabelle 1 im Anhang A enthält die Verbraucherdaten mit Verbrauchernummer laut Plan, Cluster-Hausanschlussnummer und Energiemenge in *kWh*.

Die Energiemengen werden anschließend von Matlab auch ins Excel-Transformationsfile *Gross_TRAFO* übertragen, da die im Folgenden ausgeführte Netztransformation von diesen Energiemengen und daraus berechneten Leistungsgrößen abhängt.

Anmerkung: Bei der Erstellung der Timeseries-Objekte ist darauf zu achten, dass die Anzahl der Datenpunkte (in diesem Fall wurden 864 Elemente gewählt) ein ganzzahliger Anteil der zu simulierenden Dauer beträgt, da es sonst im Schritt 4 (*Anhängen der stationären Vorlaufphase*) zu Problemen kommen könnte.

4.3.2.2. Netztransformation

Erforderliche Files:

- *Gross_TRAFO.xlsx*
- *Netzvereinfachung.m*
 - *TRAFO_T02.m-Trafo_T12.m*
 - *MethodeA.m*
 - *MethodeB.m*
 - *Bedingung.m*
 - *VereinfachungKnoten.m*
 - *Verzweigung.m*

Output:

- *Rohrgeometrien in Gross_TRAFO.xlsx*
- *Verteilungsfaktoren für die Verbraucherfunktionen in Gross_TRAFO.xlsx*

Benötigte Zeit: ca. 171 Minuten

Durch das Ausführen von *Netzvereinfachung.m* wird das Fernwärmenetz transformiert, also die Anzahl der an den Seitenästen angeschlossenen Verbraucher sowie die Anzahl der Rohrelemente der Seitenäste reduziert. Matlab liest alle dafür notwendigen Geometriedaten aus dem File *Gross_TRAFO.xlsx* ein und gibt die Ergebnisse wieder in ebendiese Datei aus. Details wie man die Excel-Tabelle mit den richtigen Daten füttert, finden sich im Leitfaden zur Netzvereinfachung (Anhang B).

Das Ausmaß der Netzvereinfachung gibt Abbildung 4.2 wieder. Es wurden in dieser Simulation alle Abzweigungen vom Haupt-Netz in Y-Form vereinfacht. Insgesamt wurden 234 Verbraucher zu 161 Verbrauchern zusammengefasst. Die Anzahl der Rohrelemente reduzierte sich von anfänglich 475 auf 251.

Es ergeben sich bedingt durch die Netzform zwei unterschiedliche Cluster-Arten: Gruppe I: Bei den Clustern 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10 und 12 wurden nur einzelne Verbrauchergruppen zusammengefasst, während bei allen anderen (Gruppe II, Cluster 5, 8, 9 und 11) alle Verbraucher zu 3 äquivalenten Verbrauchern zusammengefasst wurden. Der erste Cluster gehört hierbei bedingt durch die Regelstrategie *Schlechtpunktregelung* zur erst genannten Gruppe.

Untersuchungen haben gezeigt, dass der Fehler der Druck- und Temperaturverläufe zwischen originalem und transformiertem Netz zu groß wird, wenn der Schlechtpunkt in eine Verbrauchergruppe mit aufgenommen und transformiert wird. Daher wird der Hauptstrang in dieser Simulation vom HW startend bis zum Schlechtpunkt nicht verändert. Wohl aber Verbrauchergruppen, die sich in einer Abzweigung vom Hauptstrang abzweigen.

Das Ergebnis der Netztransformation bilden die neuen Geometrien, die im Excel-File abgespeichert werden. Da die Transformation von den Energieentnahmen im Netz abhängt, diese jedoch modellbedingt nur schwach innerhalb eines Monats schwanken, empfiehlt es sich die Transformation für jeden Monat eines Jahres einmal durchzuführen. Der Output, die Rohrgeometrien und die Verteilungsfaktoren für die Verbraucherkategorien der vereinfachten Verbraucher werden in den folgenden Schritten 5 und 3 benötigt.

4.3.2.3. Ermittlung der Leistungsverläufe der vereinfachten Verbraucher

Erforderliche Files:

- *get_Vereinfachte_Verlaeufe.m*
- *VTrafo.m*
- *Verlaufskontrolle.m*
- *Gross_TRAFO.xlsx*

Output:

- *Verlauf_v.mat*

Benötigte Zeit: ca. 8 Minuten

Das m-File *get_Vereinfachte_Verlaeufe.m* ermittelt die Verbraucherkategorien für die in der Netztransformation ermittelten vereinfachten Verbraucher. Diese sind eine gewichtete Summe der einzelnen Verbrauchsfunktionen der zusammengefassten Verbrauchergruppe. Das File liest die Gewichtungsfaktoren als Matrix und die Vektorindizes als Vektor vom Excel-File ein, die Funktion

VTrafo.m bildet dann die gewichtete Summe der einzelnen Timeseries-Objekte. Diese so ermittelten Verläufe werden dann als *Verlauf_v.mat* im Ordner *Verbraucherfunktionen* abgespeichert.

Die Funktion *Verlaufskontrolle.m* kontrolliert anschließend, ob die Summe der Energieentnahmen (für einen Tag) der einzelnen (originalen) Verbraucher gleich der Summe der transformierten Verbraucher ist. Diese Kontrollmatrix wird im Workspace *WS* abgespeichert und hat (idealerweise) die folgende Form:

Wert 1 bedeutet wahr, Wert 0 falsch und Wert 100 bedeutet, dass die (n,k)-te Verbrauchergruppe in diesem Cluster nicht existiert. Wobei die n-te Zeile den n-ten Cluster widerspiegelt, und die k-te Spalte die k-te Verbrauchergruppe, welche zusammengefasst wurde. Tabelle 4.1 zeigt, welche Verbraucher (Hausanschlussnummer lt.Cluster) im Rahmen der Netztransformation zusammengefasst wurden.

4.3.2.4. Determinierung der finalen Leistungsverläufe inkl. stationärer Vorlaufphase

Erforderliche Files:

- *Add_Stationaere_Vorlaufphase.m*
- *VLstatdyn.m*

Output:

- *Verlauf_real_sd.mat*
- *Verlauf_v_sd.mat*

Benötigte Zeit: ca. 1 Minute

Der letzte Schritt bei der Aufbereitung der Verbraucherfunktionen bildet das Anhängen der stationären Vorlaufphase an die Verbraucherfunktionen. Der Startwert der Timeseries-Objekte der Workspaces *Verlauf_real.mat* und *Verlauf_v.mat* (ermittelt in Schritt 1 bzw. 3) wird hergenommen und für eine definierte Zeit konstant gehalten (hier 10 Stunden). Die Dauer der stationären Vorlaufphase kann in der Funktion *Add_Stationaere_Vorlaufphase.m* eingestellt werden. *VLstatdyn.m* hängt die Vorlaufphase an jedes Element der Matrizen *Verlauf_Matrix_T01* bis *Verlauf_Matrix_T12* und *Verlauf_Matrix_T01_v* bis *Verlauf_Matrix_T12_v* an und kreiert ein neues Timeseries-Objekt. Die daraus entstehenden Matrizen werden unter *Verlauf_real_sd.mat* und *Verlauf_v_sd.mat* im Ordner *Verbraucherfunktionen* abgespeichert.

4.3.2.5. Einlesen der Rohrgeometrien

Erforderliche Files:

- *Geometrien.m*
- *Gross_TRAFO.xlsx*

Output:

- *Geometrien_XX.mat*

Benötigte Zeit: ca. 24 Minuten

Sollte die Transformation noch nicht für den aktuellen Monat durchgeführt worden sein, werden die Rohrgeometrien vom Excel-File *Gross_TRAFO.xlsx* in den Workspace geladen. Dies geschieht über den Aufruf von *Geometrien.m*. Die Geometrien werden für die zwei Clustergruppen auf unterschiedliche Art und Weise eingelesen. Clustergruppe I verfügt teilweise noch über ursprüngliche Rohrgeometrien. Daher werden hier Geometrien von ursprünglichen Hausanschlüssen (z.B. *T12_d_HA*), von Hauptrohren (z.B. *T12_d_R*) und von vereinfachten (transformierten) Rohren (z.B. *T12_d_R_V*) eingelesen. Bei den zur Clustergruppe II gehörenden Clustern werden nur vereinfachte Rohre, also die letzteren genannten eingelesen. Die Geometrien werden in Vektoren abgespeichert, da dies das Einlesen im Simscape-Modell später erleichtert. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die jeweils eingelesenen Geometrien (hier Transformationsschritt 1, Cluster *T01*):

Tabelle 4.3: Zur Transformation erforderliche Inputdaten

Name	Länge [m]	Durchmesser [m]	s_st [m]	s_iso [m]	Zeta	Leistung [W]
T01_HA10	9,63	0,025	0,0023	0,02515	1	861,56
T01_HA11	41,35	0,025	0,0023	0,02515	1	11342,74
T01_HA13	57,42	0,032	0,0026	0,0308	2,65	2240,59
T01_HA12	2,92	0,025	0,0023	0,02515	1	4521,51

Anmerkung: Der zusätzliche Druckverlustbeiwert ζ wurde hier folgendermaßen berechnet: Rohreinlaufwiderstände: $\zeta_{EL} = 1$, 45°-Bögen: $\zeta_{B45^\circ} = 0,4$ und 90°-Bögen $\zeta_{B90^\circ} = 1,25$. Der Zetawert setzt sich aus diesen drei Elementen zusammen.

Gleichzeitig werden die Geometriedaten unter dem Namen *Geometrien_XX.mat* (mit XX für den betreffenden Monat) im Ordner *Modell* abgespeichert, um die Geschwindigkeit des Preprocessings in einer folgenden Simulation zu erhöhen.

4.3.2.6. Ermittlung der Startwerte der Massenströme in den Wärmeübergabestationen

Erforderliche Files:

- *Get_P_initial.m*
- *Startwerte.m*

Output:

- *TXX_startwerte*

Benötigte Zeit: weniger als eine Minute

Da die Massenströme in der Simulation in Abhängigkeit von der Vor- und Rücklauftemperatur ermittelt werden und diese im ersten Simulationsschritt noch nicht vorliegen, werden die Startwerte der Massenströme im Simscape-Modell mithilfe von Memory-Blöcken von außen vorgegeben. Die Startwerte werden mithilfe folgender (Gl. 4.7) bestimmt:

$$\dot{m}_{0,i} = \frac{\dot{Q}_{1,i}}{c_p \cdot (\vartheta_{VL,1,i} - \vartheta_{RL,1,i})}$$

(Gl. 4.7)

$\dot{m}_{0,i}$... Startwert des Massenstroms des Verbrauchers i

$\dot{Q}_{1,i}$... Leistungsentnahme im ersten Berechnungsschritt des Verbrauchers i

$\vartheta_{VL,1,i}$, $\vartheta_{RL,1,i}$... Vor- bzw. Rücklauftemperatur im ersten Berechnungsschritt des Verbrauchers i

Get_P_initail.m ermittelt die Anfangsleistung der einzelnen Verbraucher und *Startwerte.m* den jeweiligen Anfangsmassenstrom. Bei der Angabe der Elemente der Verbraucherfunktionen in *Startwerte.m* sind werden bei Elementen der Clustergruppe I der Vektor der vereinfachten Verläufe vor den Elementen der ursprünglichen Verbrauchergruppe angegeben. Für den Cluster *T01* ergibt sich so beispielsweise folgende Eingabe:

```
T01_P_start = get_P_initial([Verlauf_Matrix_T01_v Verlauf_Matrix_T01(1)
Verlauf_Matrix_T01(2) Verlauf_Matrix_T01(6) Verlauf_Matrix_T01(7)
Verlauf_Matrix_T01(14) Verlauf_Matrix_T01(15) Verlauf_Matrix_T01(16)
Verlauf_Matrix_T01(17)]);
```

Verlauf_Matrix_T01_v ist in diesem Fall ein Vektor mit den 9 Elementen der vereinfachten Verbrauchsfunktionen. Der Vektor *T01_P_start* enthält somit 17 Elemente.

Die Syntax für *Startwerte.m* sieht folgendermaßen aus:

```
T01_startwerte = get_startwerte([T01_T_VL_R T01_T_VL_HA], [T01_T_RL_R T01_T_RL_HA],  
T01_P_start);
```

Der Vektor `[T01_T_VL_R T01_T_VL_HA]` besteht aus den Vorlauftemperaturen der vereinfachten Verbraucher und den originalen Hausanschlüssen. Diese Temperaturen (Vor- und Rücklauf) werden später in Schritt 8 durch das sich im Betrieb einstellende Temperaturfeld ersetzt und dadurch die Konvergenzzeit in der stationären Vorlaufphase verkürzt.

4.3.3. Netzsimulation

Nachdem die Netztransformation durchgeführt, die Verbrauchskurven ermittelt, bzw. adjustiert, die neuen Geometrien eingelesen und die Startwerte der Massenströme ermittelt wurden, werden noch die Workspaces *TEMP.mat* (Anfangstemperaturfeld), *WS.mat* (benutzerdefinierte Simulationsparameter) und die Verläufe *Verlauf_real_sd.mat* und *Verlauf_v_sd.mat* geladen. Im Anschluss kann dann die Simulation durchgeführt werden.

Das Kompilieren und Einlesen der Input-Daten benötigt ca. 6 Minuten, die transiente Initialisierung ca. 13 Minuten und die transiente Lösung des Gleichungssystems ca. 10. Minuten. Insgesamt benötigt die Netzsimulation also ca. 29. Minuten. Demzufolge wirkt sich die Reduktion der stationären Vorlaufphase nur auf den letzteren genannten Schritt aus. Der Zeitgewinn bei einer stationären Vorlaufphase von nur 4 Stunden (statt 10) beträgt also weniger als 2 Minuten.

Nachdem die Simulation durchgeführt wurde, erfolgt nun das Post-Processing. Ausgehend vom erstellten Simscape-Logging-Objekt *SPR*, welches die zeitliche Entwicklung sämtlicher Variablen im System beinhaltet, wird nun das Temperaturfeld im Netz für eine nachfolgende Simulation adjustiert, die Leistungskontrolle durchgeführt, erforderliche Kessel- und Pumpenleistungsverläufe ermittelt sowie der Netzwirkungsgrad für den dynamischen Simulationshorizont errechnet.

Benötigte Zeit: ca. 29 Minuten

4.3.4. Postprocessing

Das Simulations-Postprocessing dient erstens der Verbesserung der Inputparameter für jede folgende Simulation (Anpassen des Temperaturfeldes) und zweitens zur Visualisierung der Simulationsergebnisse.

4.3.4.1. Anpassen des Temperaturfeldes im Netz

Erforderliche Files:

- *Starttemperaturen.m*
- *get_T_initial_T01 - get_T_initial_T12*

Output:

- *T01_T_VL- T12_T_VL*
- *T01_T_RL- T12_T_RL*

Benötigte Zeit: ca. 18 Minuten

Nach der Simulation werden die letzten sich einstellenden Temperaturen im Netz in den Temperaturvektoren abgespeichert. Datenquelle bildet hierbei das bei der Simulation erstellte Simscape-Logging-Element *SPR*. Die Anfangstemperaturen der Rohrelemente bildet hierbei der Mittelwert aus Rohreintritts- und –austrittstemperatur. Auch die Starttemperaturen der WÜSTen werden ermittelt.

Die Syntax für das Cluster *T01* sieht folgendermaßen aus:

```
[T01_T_VL, T01_T_RL, T01_T_VL_HA, T01_T_RL_HA, T01_T_VL_R, T01_T_RL_R] =
get_T_initial_T01
```

Der Vektor der Temperaturen setzt sich aus den Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der WÜSTen der Rohre (*T01_T_VL_R, T01_T_RL_R*), der ursprünglichen Hausanschlüsse (*T01_T_VL_HA, T01_T_RL_HA*) und der vereinfachten Hausanschlüsse (*T01_T_VL, T01_T_RL*) zusammen.

Die Funktion *get_T_initial_T01* greift auf die Variablen der Rohre zu, deren Anfangstemperatur ermittelt werden soll.

Die Temperaturen werden im Workspace *TEMP* im Ordner *Modell* abgespeichert und stehen somit für die nächste Simulation zur Verfügung.

4.3.4.2. Heizwerk: Informationen

Erforderliche Files:

- *SPR* (Simscape-Logging-Objekt)
- *HW_info.m*

Output:

Diagramme *ERFORDERLICHE LEISTUNGEN*, *SPEZ.PUMPENSTROMBEDARF*, *DRUCKVERLAUF* und *MASSENSTROMVERLAUF*

Benötigte Zeit: ca. 2 Minuten

Dieses m-File erstellt die oben genannten Diagramme für die dynamische Simulation. Der Teil der stationären Vorlaufphase wird weggeschnitten. Die Leistungsverläufe der einzelnen Verbraucher werden aus dem *SPR*-Objekt jeder einzelnen WÜST ausgelesen und summiert:

$$\dot{Q}_{VB,ges}(t) = \sum_{\text{Verbraucher}} \dot{Q}_{VB,i}(t)$$

(Gl. 4.8)

Der Verlauf der Kesselleistung wird folgendermaßen berechnet:

$$\dot{Q}_K(t) = c_{P,W} \cdot \dot{m}_{W,ges}(t) \cdot (\vartheta_{VL,HW}(t) - \vartheta_{RL,HW}(t))$$

(Gl. 4.9)

wobei

$\dot{m}_{W,ges}(t)$... Gesamtmassenstromverlauf ab Heizwerk

$\vartheta_{VL,HW}(t)$... Vorlauftemperaturverlauf ab Heizwerk (nach Pumpe)

$\vartheta_{RL,HW}(t)$... Rücklauftemperaturverlauf ins Heizwerk (vor "Kessel")

Die Netzverluste ergeben sich anschließend aus der Differenz Kesselleistung minus Verbraucherleistung.

Pumpenleistungsbedarf:

$$P_P(t) = \frac{\rho_{m,W} \cdot g \cdot \dot{V}_W(t) \cdot H_A(t)}{\eta_P}$$

(Gl. 4.10)

$P_P(t)$... Pumpenleistungsbedarf an der Welle

$\dot{V}_W(t)$... gesamter Wasservolumenstromverlauf ab Heizwerk

$H_A(t)$... Förderhöhe

η_P ... Pumpenwirkungsgrad

mit

$$H_A(t) = H_g(t) + \frac{(p_{P,A}(t) - p_{P,E}(t))}{\rho_W \cdot g} + \frac{(v_{P,A}^2(t) - v_{P,E}^2(t))}{2g} + \sum H_V(t)$$

(Gl. 4.11)

ergibt sich unter Vernachlässigung geodätischen Förderhöhe, der Mediumgeschwindigkeitsdifferenz am Pumpenein- bzw. -austritt und der Druckhöhenverluste bedingt durch Einbauarmaturen

$$P_P(t) = \frac{\dot{m}_{W,ges}(t) \cdot (p_{P,A}(t) - p_{P,E}(t))}{\rho_W \cdot \eta_P}$$

(Gl. 4.12)

Für den Pumpenwirkungsgrad wurde hier 0,5 angenommen.

Zusätzlich werden im Workspace die Key-Performance Indikatoren Pumpenarbeit, aggregierte Arbeit der Verbraucher und Kesselarbeit. Es sind dies die zeitlichen Integrale der o.g. Verläufe der Leistungsgrößen Pumpenleistung, Verbraucherleistung und Kesselleistung:

$$E_{VB} = \int_t \dot{Q}_{VB,ges}(t) dt \dots \text{von den Verbrauchern entnommene Energiemenge}$$

$$E_K = \int_t \dot{Q}_K(t) dt \dots \text{vom Kessel bereitgestellte Energiemenge}$$

$$E_P = \int_t P_P(t) dt \dots \text{verbrauchte Pumpenenergiemenge}$$

Der Netzwirkungsgrad berechnet sich dann folgendermaßen:

$$\eta_N = \frac{E_{VB}}{E_K + E_P}$$

(Gl. 4.13)

4.3.4.3. Schlechtpunktverbraucher: Informationen

Erforderliche Files:

- *SPR* (Simscape-Logging-Objekt)
- *SP_info.m*

Output:

- Diagramme *DELTA p*, *DELTA T*, *VENTILSTELLUNG* sowie *VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATUR*

Benötigte Zeit: weniger als eine Minute

Für den Schlechtpunkt (Verbraucher T01_HA17) werden an der WÜST die Druckdifferenz und die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ermittelt. Des Weiteren wird der Verlauf der Ventilstellung (welche hier als Flächenverhältnis A/A_{Max} definiert ist) des SP ermittelt. Auch die Absolutwerte der Vor- und Rücklauftemperatur werden in einem Diagramm visualisiert.

4.3.4.4. Druck- und Temperaturfeld im Netz

Erforderliche Files:

- *SPR* (Simscape-Logging-Objekt)
- *pT_Diagram.m*

Output:

- Diagramme *DRUCKVERLAUF* und *TEMPERATURVERLAUF VON HW BIS SP*

Benötigte Zeit: weniger als eine Minute

Durch den Aufruf von *pT_Diagram(Zeitpunkt)* wird das Druck- und Temperaturfeld des Netzes visualisiert. Diese enthalten den Vorlauf und Rücklaufdruck, sowie die Vor- und Rücklauftemperatur des Netzes am HW-Austritt, am SP und an den vorlaufseitigen Clusterausgängen der Cluster T12, T10, T09, T13, T04, T03, T02.

5. Simulationsergebnisse

5.1. Netzvereinfachung

Die in Kapitel 3.6.2 beschriebene Aggregation des Fernwärmenetzes wurde beispielhaft an einem 17 Verbraucher umfassenden Teilnetz angewandt. Die folgende Abbildung 5.1 zeigt das Simscape-Modell des Ausgangsnetzes, welches anschließend durch die in Kap.4.1 entwickelte und beschriebene Methode der Netzaggregation vereinfacht wurde:

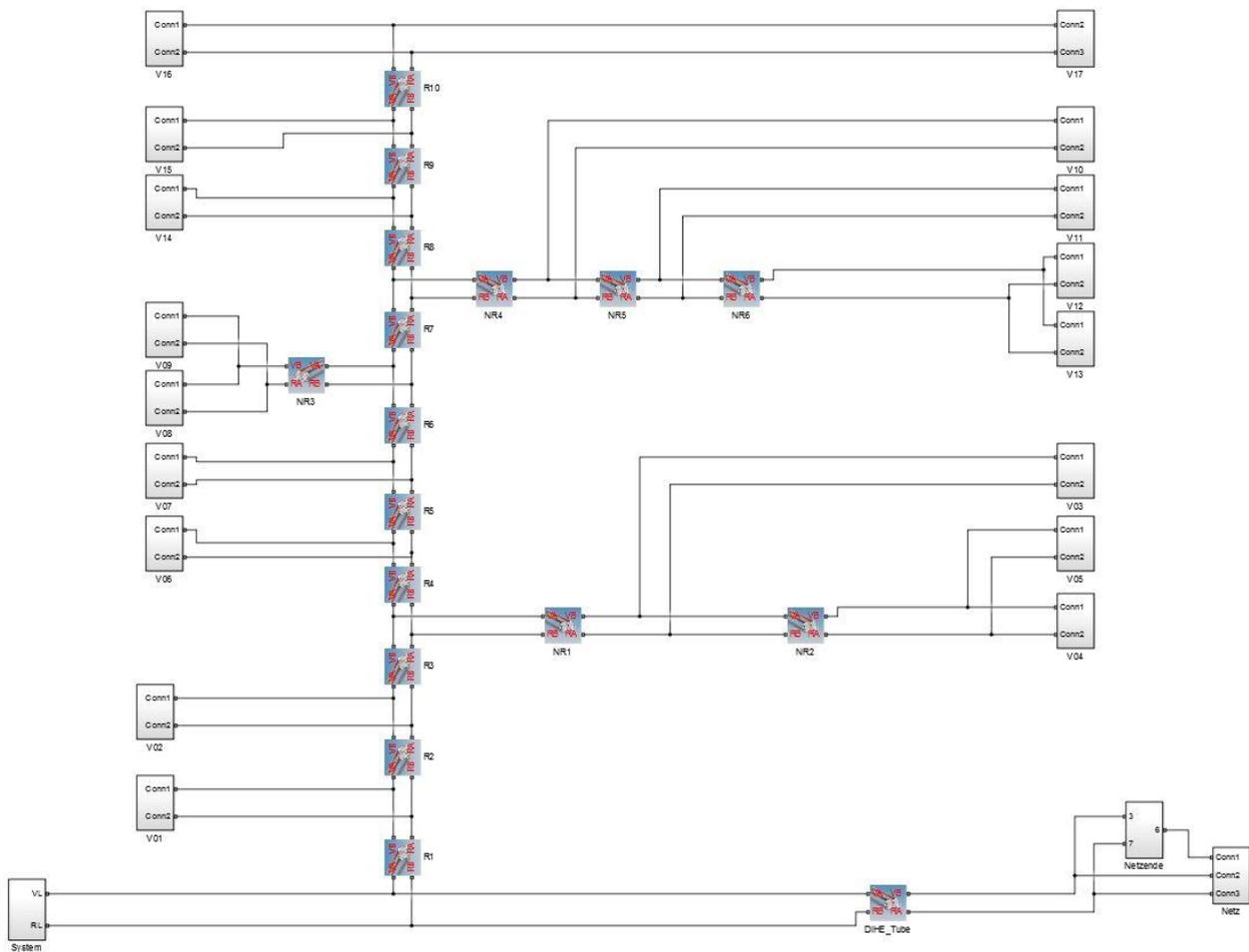


Abbildung 5.1: Zur Validierung der Netztransformation gewähltes Simscape - Teilmodell

Im unteren Bildbereich sind das Heizwerk (System) und das restliche Netz, symbolisiert durch die Blöcke *DIHE_Tube* und *Netz* ersichtlich.

Das 17-Verbrauchermodell wurde zu einem 3-Verbrauchermodell vereinfacht (Abbildung 5.2), wobei die Regelstrategie konstante Rücklauftemperatur (320K) nicht verändert wurde.

Die Abbildung 5.2 zeigt die drei äquivalenten Verbraucher mit zugehörigen Rohrelementen, sowie das unveränderte Netzteilstück im unteren Teil.

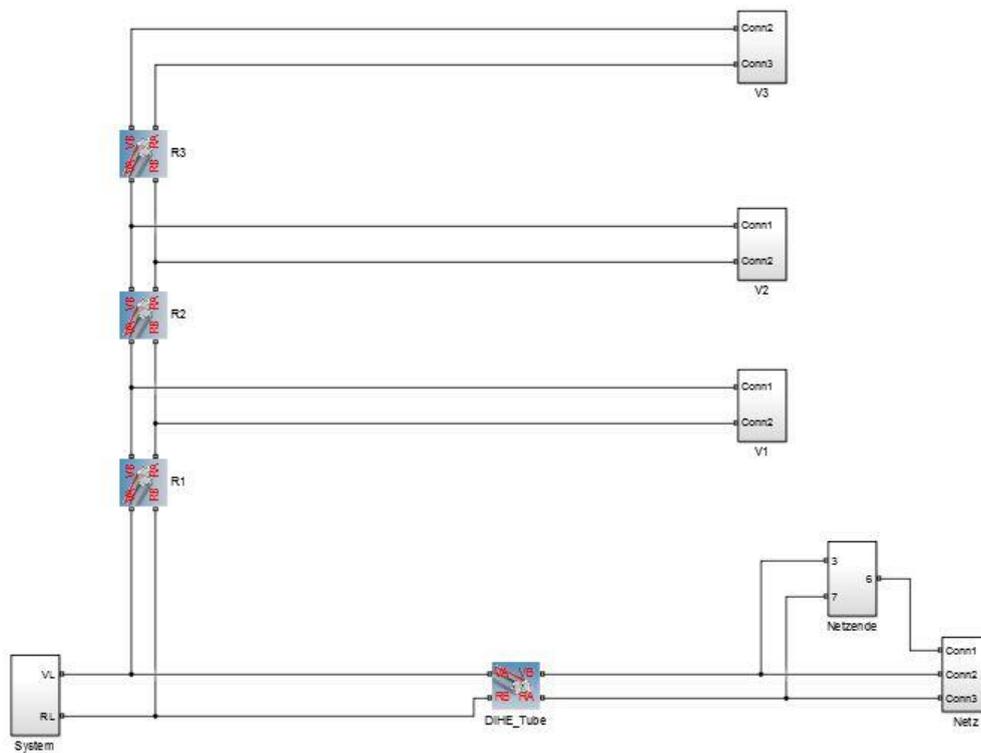


Abbildung 5.2: Vereinfachte Verbraucher, Simscape-Modell

Mit der Forderung die Transformation anhand von sich ändernden Verbrauchermassenstromverhältnissen (vgl. Kap.3.6.2) zu validieren, wurden den 17 Verbrauchern jeweils einer der 4 Standardmassenströme (siehe auch Abbildung 3.8) zufällig zugewiesen.

Die folgende Tabelle 5.1 enthält die Tagesenergieentnahmen und Typ der Verbraucherfunktionen der einzelnen 17 Hausverbraucher sowie die vereinfachten drei Verläufe der Verbraucher nach Durchführung der Netztransformation (Abbildung 5.3). Zusätzlich visualisiert Abbildung 2.3 die Verbraucherfunktionen der vereinfachten Verbraucher V01, V02 und V03, welche gewichtete Summen der Verbraucherfunktionen HA01-HA17 sind.

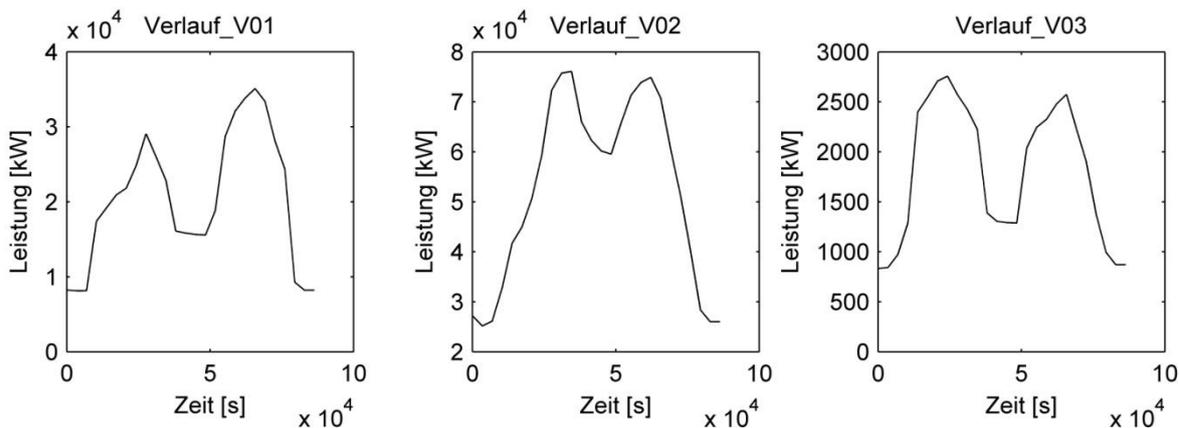


Abbildung 5.3: Leistungsverläufe der vereinfachten Verbraucher V01, V02, V03

Tabelle 5.1: zusammengefasste Verbraucher mit Tagesenergieentnahmen

Verbraucher	Verlauf	Energieentnahme [kWh]
V1	C	467,84
V2	A	116,87
V3	B	124,68
V4	D	43,39
V5	C	108,29
V6	C	97,16
V7	A	163,06
V8	B	72,90
V9	C	15,68
V10	C	20,68
V11	B	272,23
V12	B	108,52
V13	D	53,77
V14	A	26,03
V15	A	22,19
V16	D	105,58
V17	D	14,32
Summe		1.833,19
Vereinfachte Verläufe		
V1		500,86
V2		1.288,30
V3		44,04
Summe		1.833,20

Im Zuge der Validierung der Netztransformation hat sich gezeigt, dass die Qualität der Ergebnisse stark von den Leistungsentnahmen der nachfolgenden Verbraucher abhängen. Im Folgenden wurde daher bei der Validierung angenommen, dass sich das zu validierende Teilsystem an unterschiedlichen Orten des Netzes befindet. Als quantitatives Maß für die Lokalisierung des zu validierenden Systems wird das Verhältnis der Energieentnahmen des zu validierenden Teilsystems zu den Energieentnahmen aller nachfolgenden Verbraucher herangezogen:

$$\varphi = \frac{E_{TS}}{E_F}$$

(Gl. 5.1)

wobei $E_{TS} = \sum E_i$, i sind alle Verbraucher des betrachteten (zu aggregierenden) Teilsystems und $E_F = \sum E_j$ j sind alle nachfolgenden Verbraucher, in den Abbildung 5.1 und 5.2 dargestellt durch den Verbraucher *Netz*

Die Ergebnisse der Simulation werden für $\varphi = 0,06$ detailliert dargestellt. Anschließend erfolgt noch die Fehlerentwicklung bei der Variation von φ .

5.1.1. Vergleich Originalmodell - vereinfachtes Modell

Als Vergleichsgröße zwischen Originalnetz und vereinfachtem Netz dienen hier:

- Die Differenz aus Vor- und Rücklauftemperatur sowie des Druckes in der Vor-Rücklaufleitung jeweils am Eingang des ersten Rohres des Systems (*Rohr R1*)
- Der Vergleich der erforderlichen Kessel- und Pumpenstromleistungsverläufe des Originalmodells und vereinfachten Modells.

Den Verlauf der Differenz aus Vorlauf- und Rücklaufftemperatur am vorlaufseitigen Rohreintritt des Rohres R1 samt Fehler (Vergleich aggregiertes Netz zu Ursprungsnetz) zeigt die folgende Abbildung 5.4:

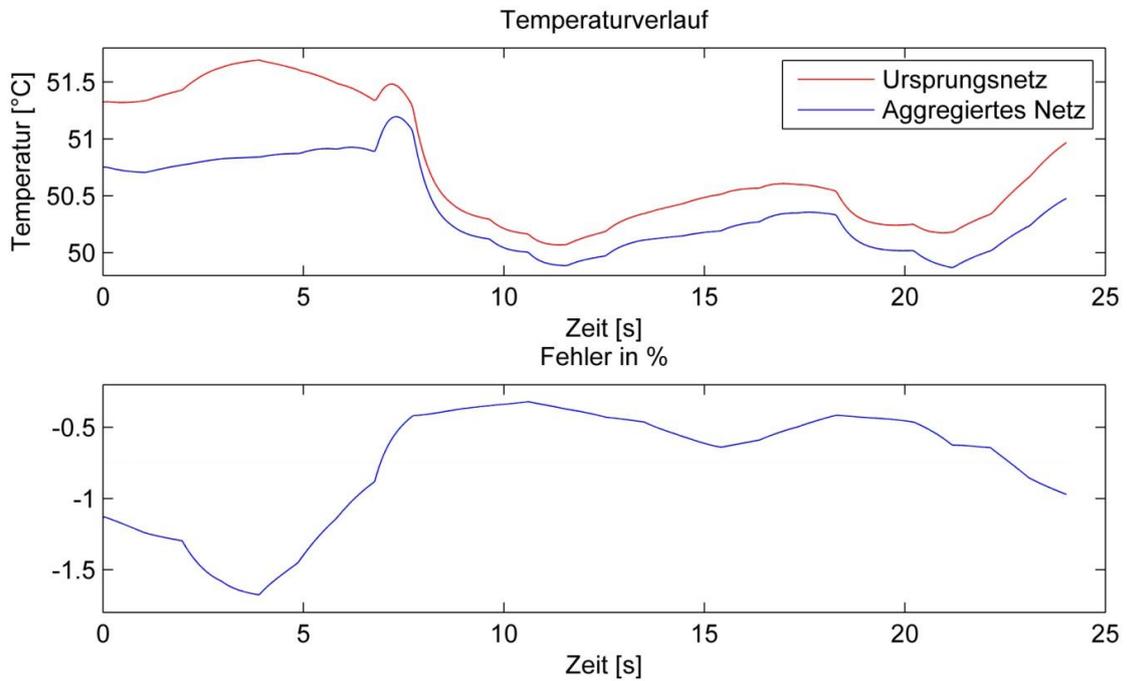


Abbildung 5.4: Vergleich Temperaturerzeugung Ursprungsnetz und aggregiertes Netz

Die Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf am Rohr R1 samt Fehler zeigt die folgende Abbildung 5.5:

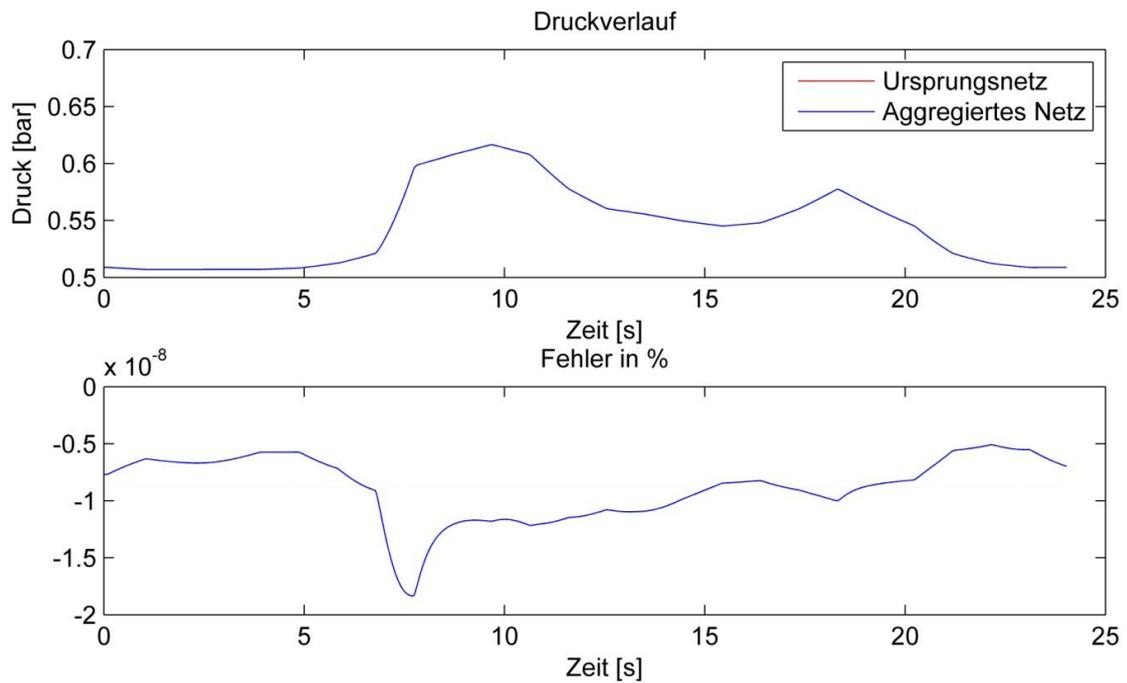


Abbildung 5.5: Vergleich Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf

Die Differenz in der erforderlichen Kesselleistung samt Fehler zeigt die folgende Abbildung 5.6:

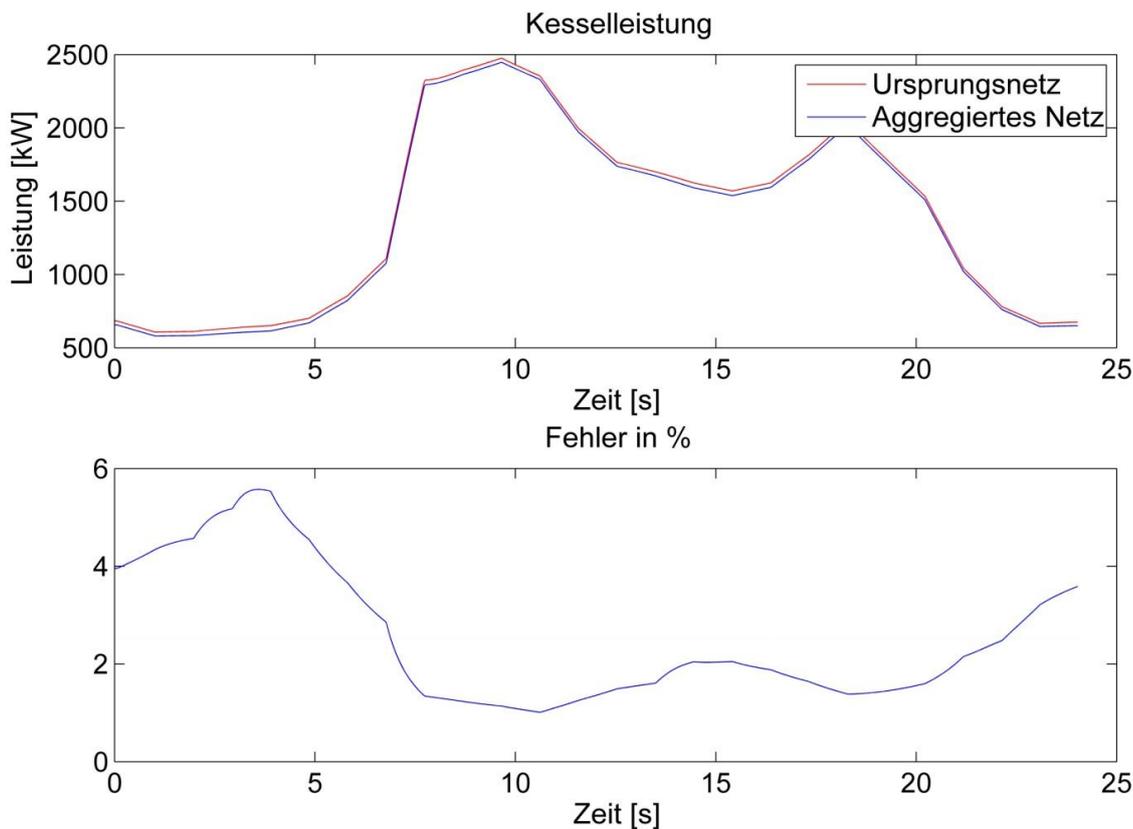


Abbildung 5.6: Vergleich der erforderlichen Kesselleistungen

Die Differenz in der erforderlichen Pumpenleistung samt Fehler zeigt die folgende Abbildung 5.7:

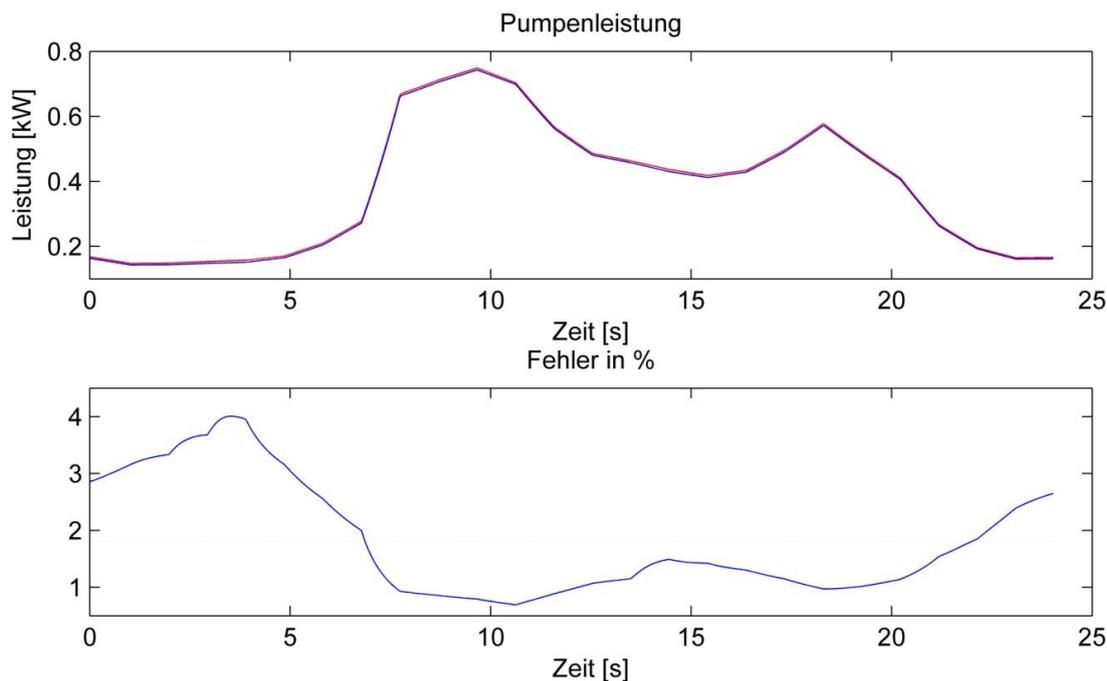


Abbildung 5.7: Vergleich der erforderlichen Pumpenleistungen

5.1.2. Fehlerentwicklung

Durch die Variation von ϕ , also des Verhältnisses der Tagesenergieentnahmen der zusammengefassten Verbraucher zu jenen der im Netz folgenden Verbraucher, wurde die Fehlerentwicklung beobachtet. Dadurch kann der systematische Fehler, welcher durch die Netztransformation hervorgerufen wird abgeschätzt werden.

Im Folgenden wird nur der Fehler in der Temperaturdifferenz betrachtet, da der Fehler der Drücke auch bei $\phi = 1$ in der Größenordnung 10^{-8} liegt und dadurch vernachlässigt werden kann.

Die Abbildung 5.8 zeigt die Entwicklung der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf vom vereinfachten Modell in Bezug auf das Originalmodell:

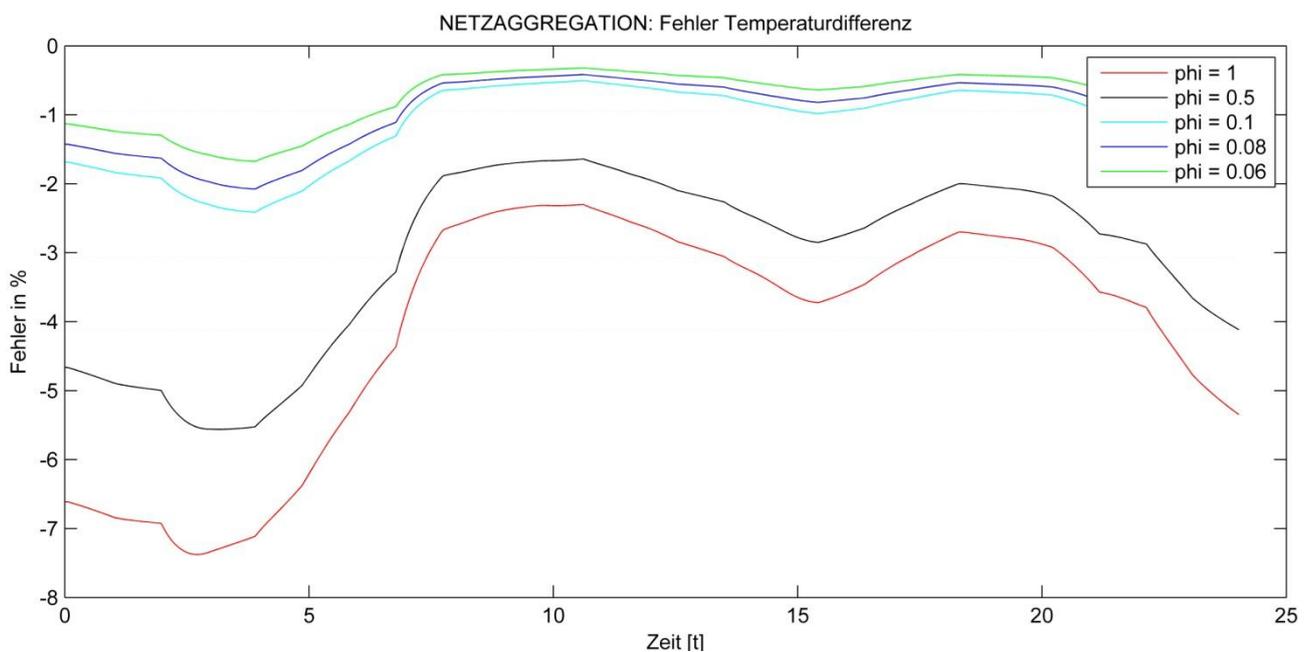


Abbildung 5.8: Entwicklung des Fehlers der Temperaturdifferenz für geändertes ϕ

Fehlerentwicklung der erforderlichen Kesselleistung im HW:

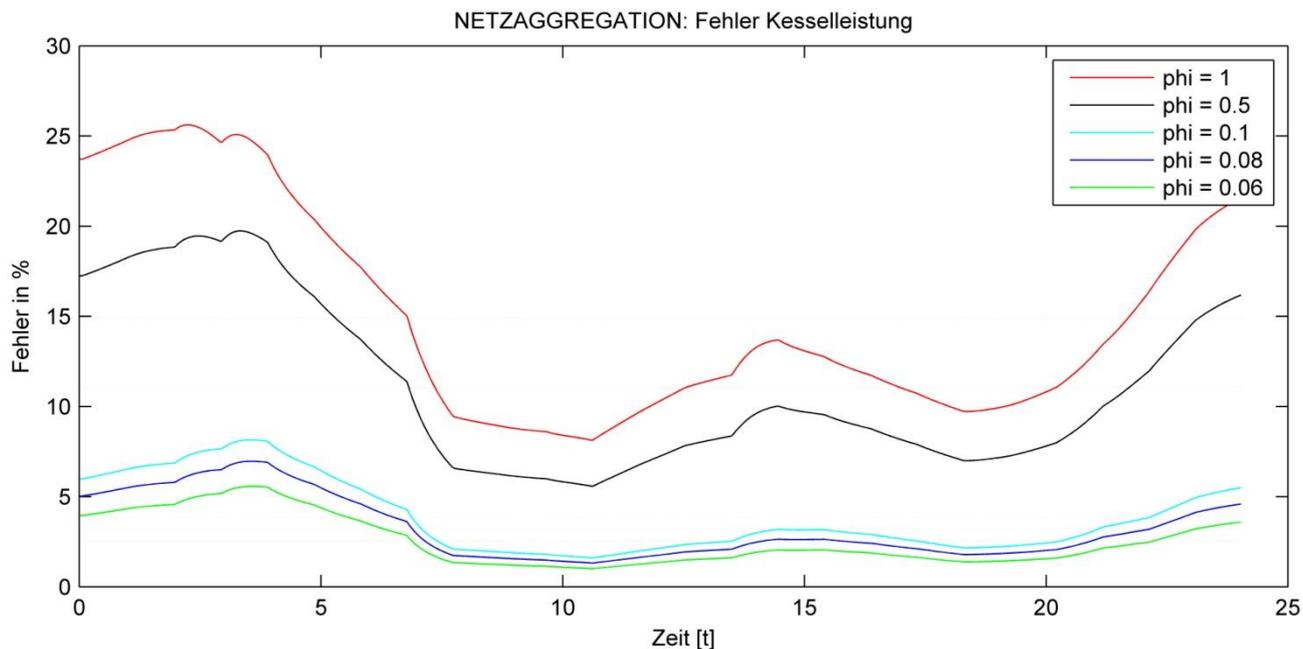


Abbildung 5.9: Entwicklung des Fehlers der Kesselleistung für geändertes ϕ

Fehlerentwicklung der erforderlichen Pumpenleistung im HW:

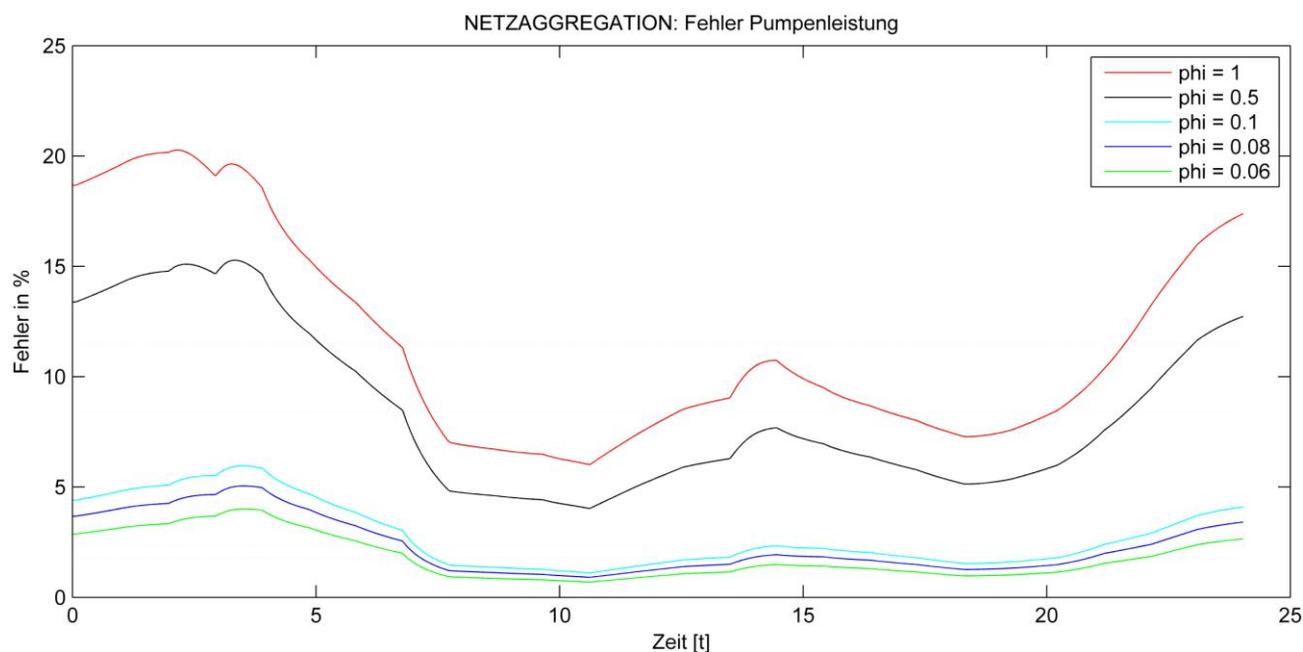


Abbildung 5.10: Entwicklung des Fehlers der Pumpenleistung für geändertes ϕ

5.2. Untersuchung der Netz-Zeitkonstante

Bedingt durch die relativ kleinen Fließgeschwindigkeiten in den Netzrohren dauert es relativ lange, bis sich eine heizwerkseitige Temperaturänderung am letzten Verbraucher bemerkbar macht. Diese Tatsache wurde in diesem Abschnitt untersucht. Mit den Parametern des Referenzfalles (Kap. 5.3.1) wurde die Auswirkung einer Sprungfunktion in der Vorlauftemperatur ab Heizwerk auf die Vorlauftemperatur am SP untersucht. Die Sprungantwort des SP zeigt Abbildung 5.11:

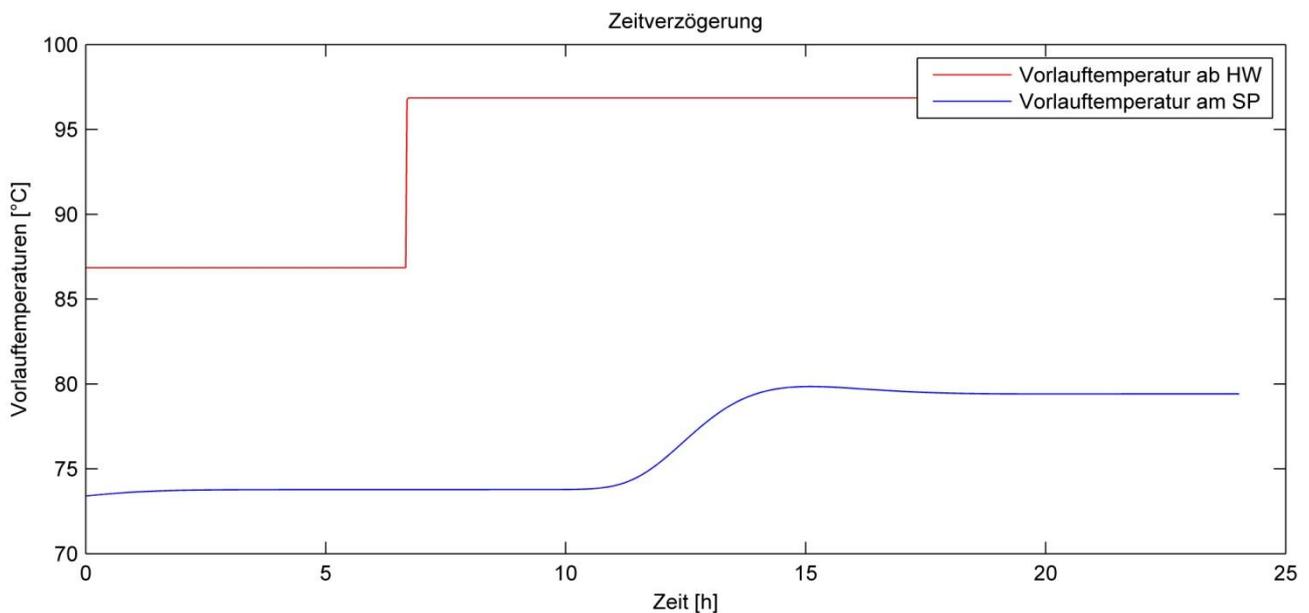


Abbildung 5.11: Vorlauftemperaturen ab HW und am SP

Die Zeitverzögerung liegt bei ca.4 Stunden.

Bei einer möglichen Kesselregelung mit Regelgröße Vorlauftemperatur am SP muss diese Zeitkonstante berücksichtigt werden.

5.3. Szenarienanalyse

Im Folgenden werden die Auswirkungen geänderter Inputparameter wie Vor- und Rücklauftemperatur sowie die Vermaschung des Netzes im hinteren Abschnitt untersucht.

Dargestellt werden folgende Simulationsergebnisse:

- Tagesarbeiten über den simulierten Zeitraum: aggregierte Verbraucherarbeit, Kesselarbeit, Netzverluste, Pumpenarbeit sowie Wirkungsgrad
- Leistungsverläufe: Kesselleistung, aggregierte Verbraucherleistung, Pumpenleistung, Netzverluste
- Massenstrombedarf
- Temperatur- und Druckfeld im Netz

5.3.1. Referenzfall

Dieses Szenario stellt den Referenzfall dar. Die in Kap. 5.3.5 folgenden Vergleiche und Diskussionen beziehen sich auf dieses Szenario

- Randbedingungen

Tabelle 5.2: Randbedingungen Referenzfall

Vorlauftemperatur	370	K
Rücklauftemperatur	320	K
Mitteltemperatur Tag	10	°C
Erdreichtemperatur	8	°C
Simulationsdatum	01. Okt	
Vorlaufdruck SP	6	bar
Differenzdruck SP	0,5	bar
Netzart	unvermascht	

- Tagesarbeiten und Wirkungsgrad

Tabelle 5.3: Ergebnisse Referenzfall

Pumpenarbeit	9,746	kWh
Kesselarbeit	14,154	MWh
Verbraucherarbeit	11,517	MWh
Netzverluste	2,638	MWh
% an Kesselarbeit	18,64%	
Wirkungsgrad	81,31%	

- Leistungsverläufe

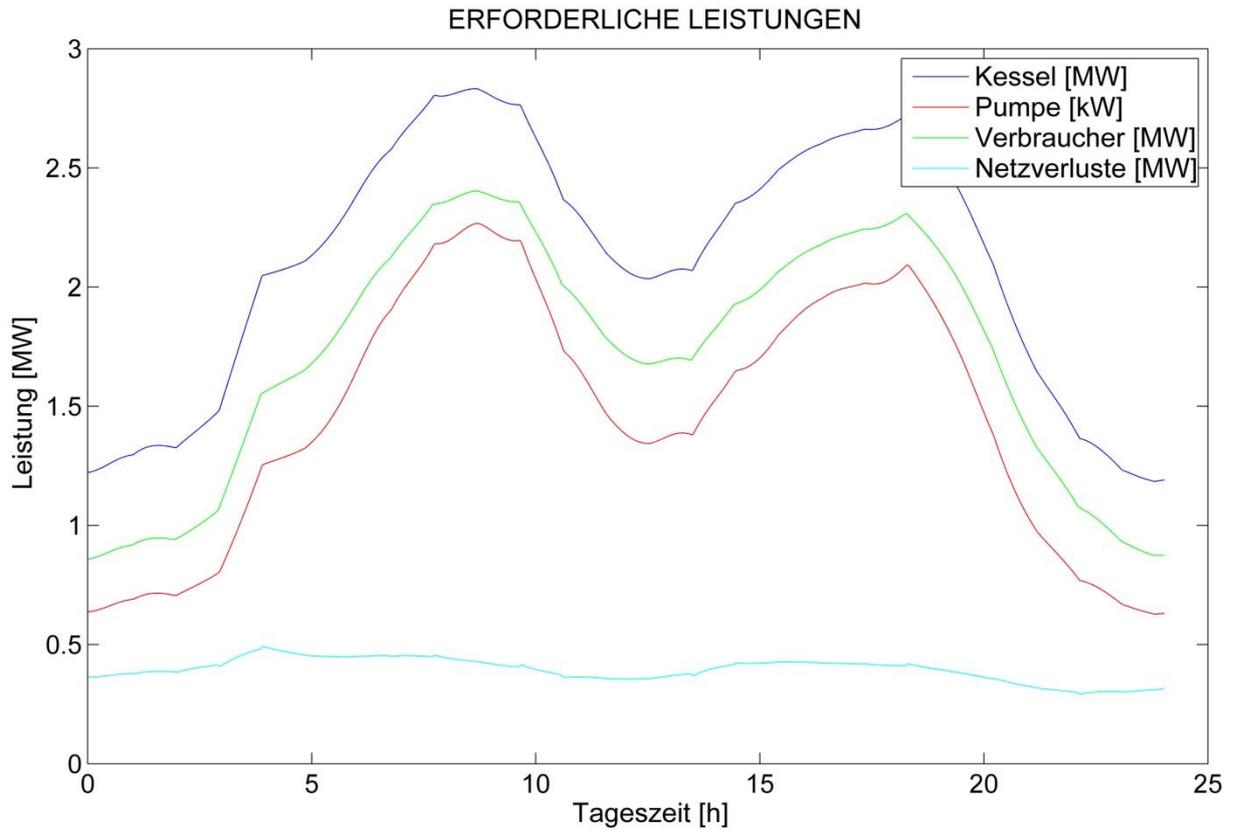


Abbildung 5.12: Leistungsverläufe Referenzfall

- Massenstrombedarf:

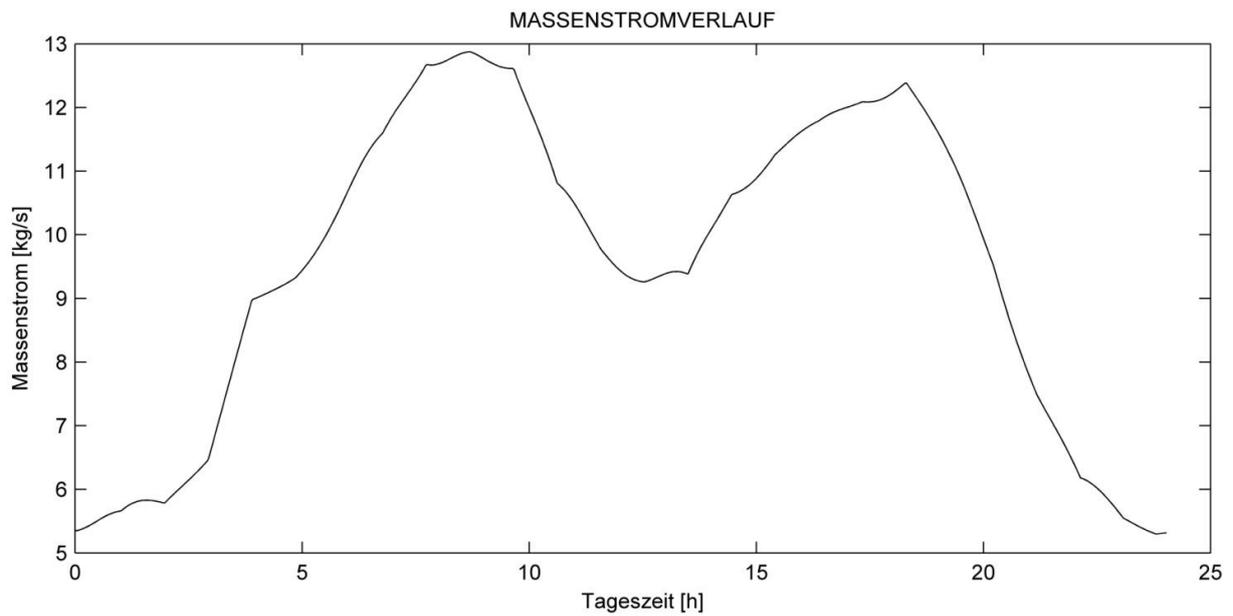


Abbildung 5.13: Massenstromverlauf Referenzfall

- Temperatur- und Druckfeld

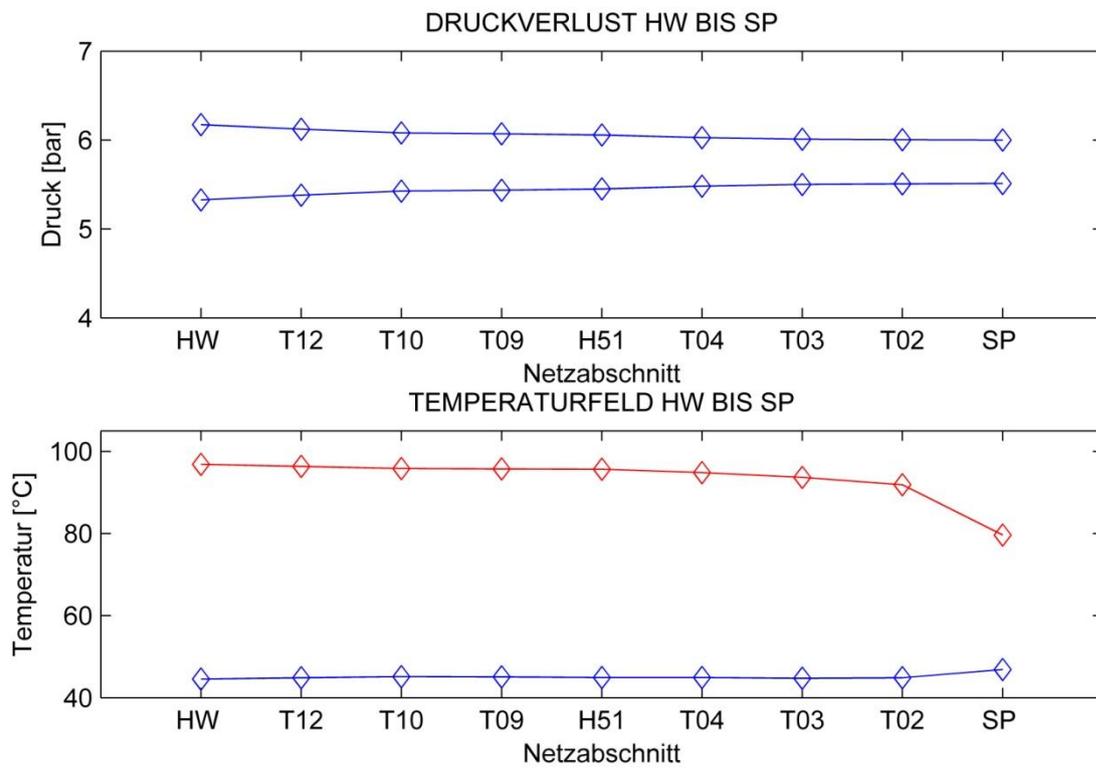


Abbildung 5.14: Druck- und Temperaturfeld Referenzfall

5.3.2. Szenario 1

Untersuchung der Auswirkung einer Rücklauf temperaturanhebung von 10K im Netz.

- Randbedingungen

Tabelle 5.4: Randbedingungen Szenario 1

Vorlauf temperatur	370	K
Rücklauf temperatur	330	K
Mitteltemperatur Tag	10	°C
Erdreichtemperatur	8	°C
Simulationsdatum	01. Okt	
Vorlaufdruck SP	6	bar
Differenzdruck SP	0,5	bar
Netzart	unvermascht	

- Tagesarbeiten und Wirkungsgrad

Tabelle 5.5: Ergebnisse Szenario 1

Pumpenarbeit	14,274	kWh
Kesselarbeit	14,420	MWh
Verbraucherarbeit	11,517	MWh
Netzverluste	2,903	MWh
% an Kesselarbeit	20,13%	
Wirkungsgrad	79,79%	

- Leistungsverläufe

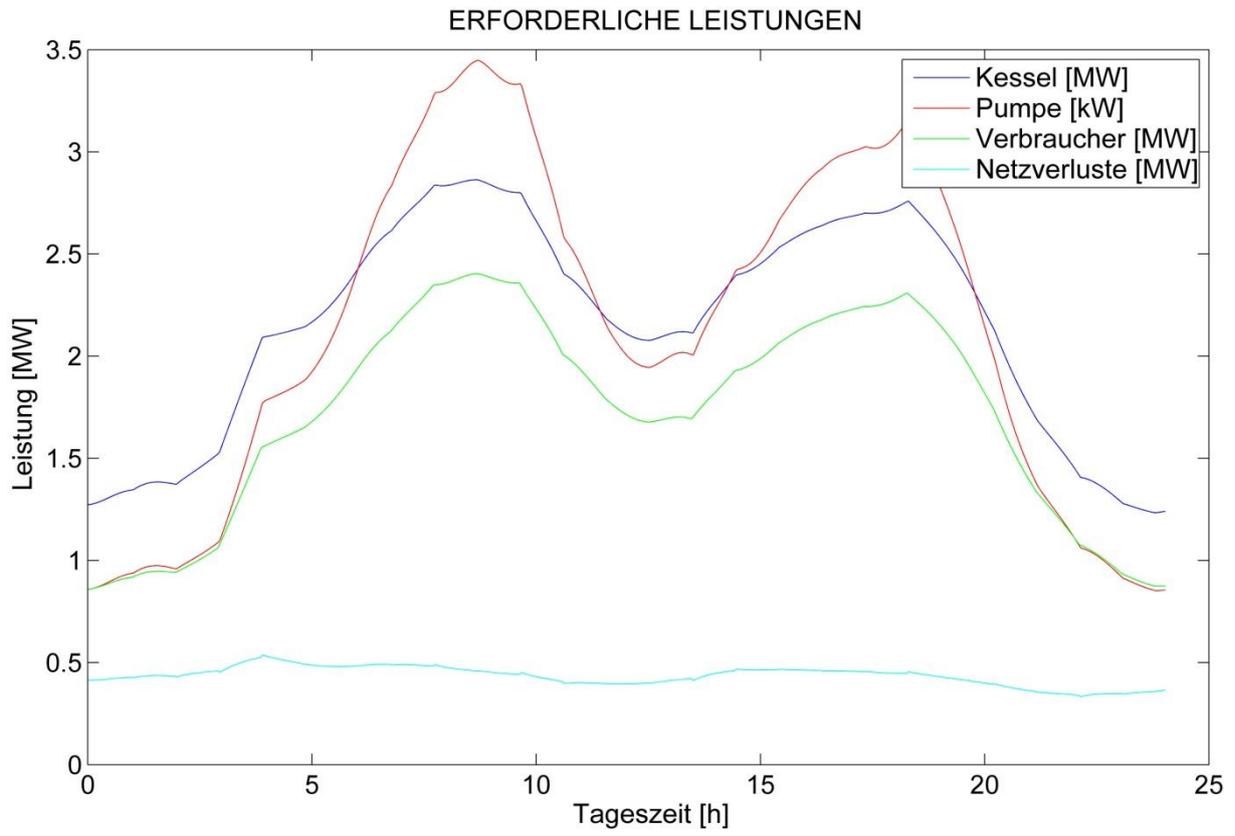


Abbildung 5.15: Leistungsverläufe Szenario 1

- Massenstrombedarf

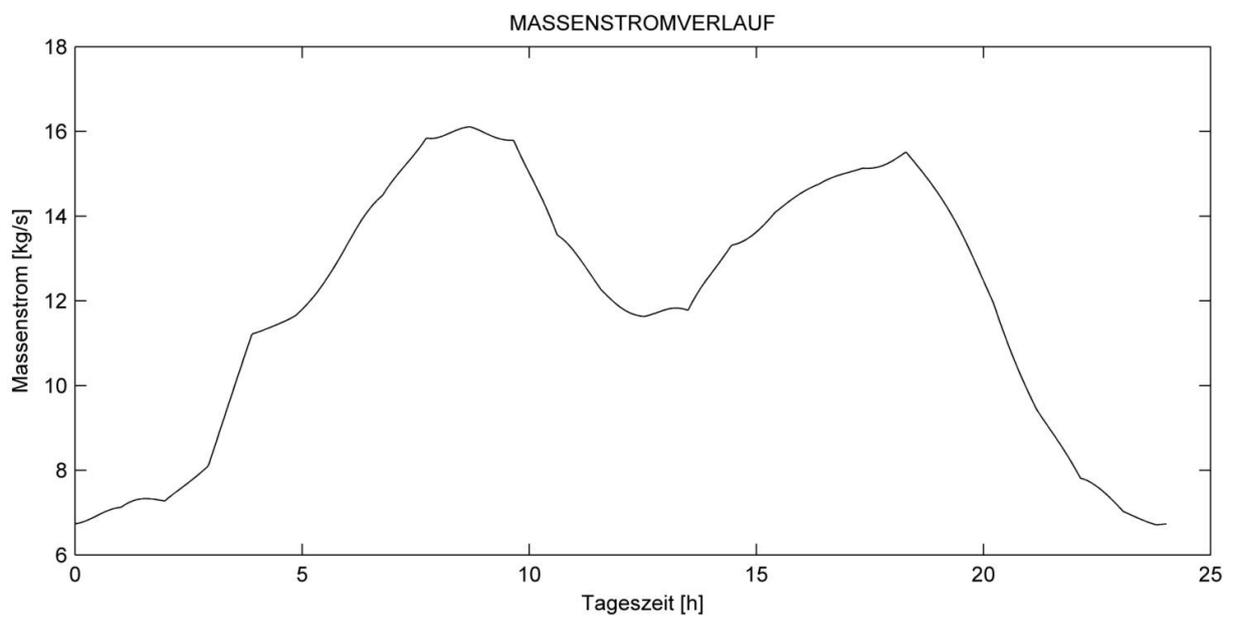


Abbildung 5.16: Massenstromverlauf Szenario 1

- Temperatur- und Druckfeld

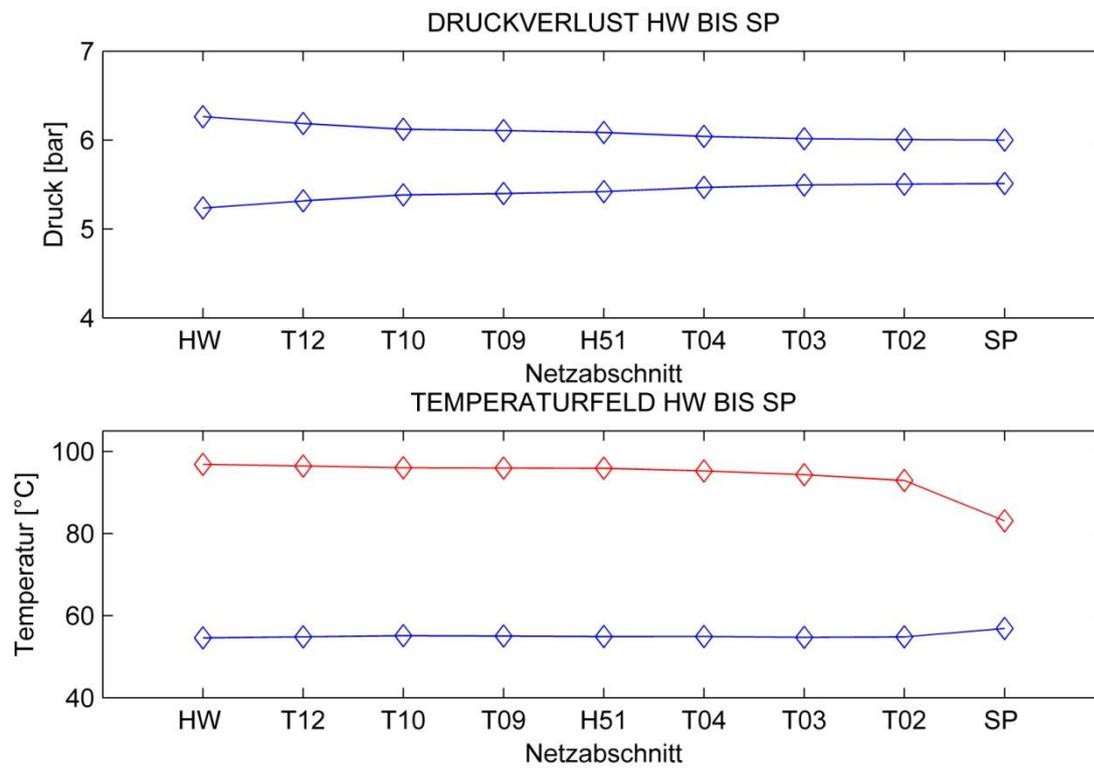


Abbildung 5.17: Druck- und Temperaturfeld Szenario 1

5.3.3. Szenario 2

Untersuchung der Vorlauftemperatursenkung um 10K im Netz.

- Randbedingungen:

Tabelle 5.6: Randbedingungen Szenario 2

Vorlauftemperatur	360	K
Rücklauftemperatur	320	K
Mitteltemperatur Tag	10	°C
Erdreichtemperatur	8	°C
Simulationsdatum	01. Okt	
Vorlaufdruck SP	6	bar
Differenzdruck SP	0,5	bar
Netzart	unvermascht	

- Tagesarbeiten und Wirkungsgrad

Tabelle 5.7: Ergebnisse Szenario 2

Pumpenarbeit	13,910	kWh
Kesselarbeit	13,987	MWh
Verbraucherarbeit	11,517	MWh
Netzverluste	2,471	MWh
% an Kesselarbeit	17,66%	
Wirkungsgrad	82,25%	

- Leistungsverläufe

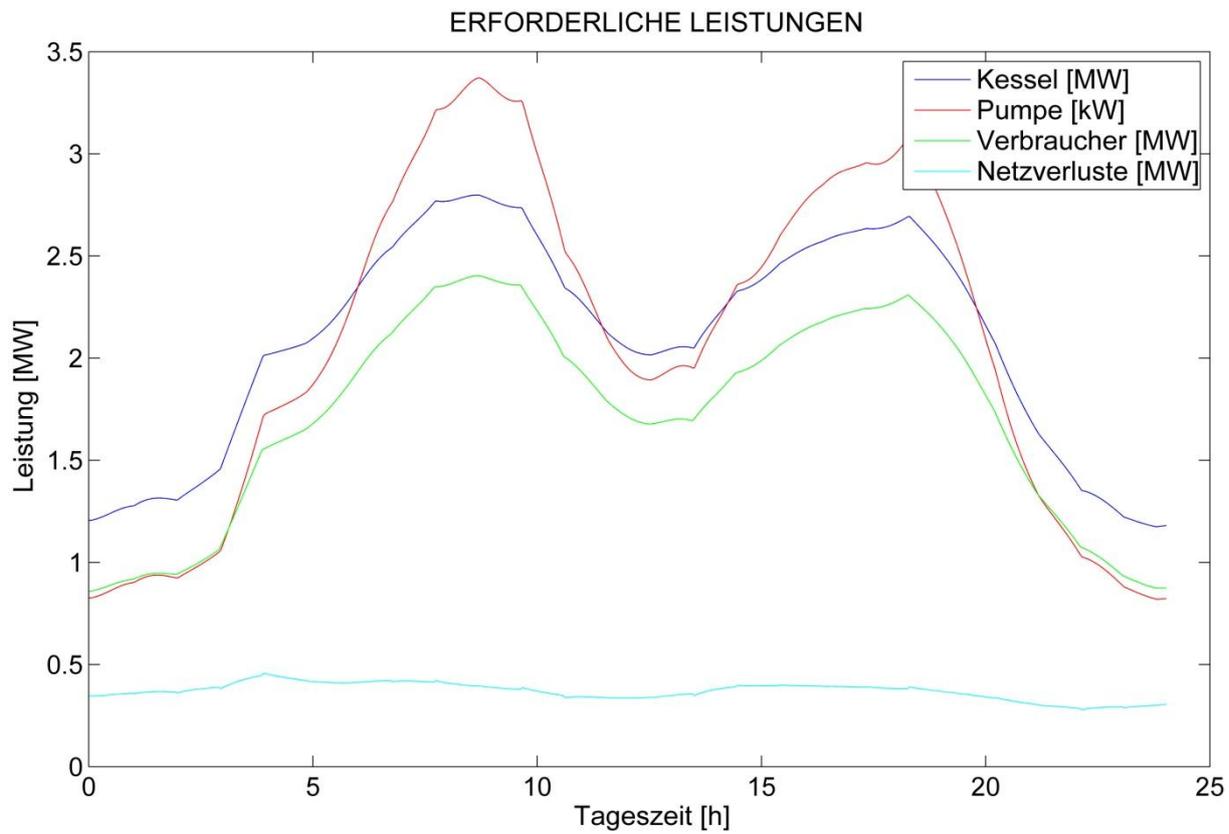


Abbildung 5.18: Leistungsverläufe Szenario 2

- Massenstrombedarf

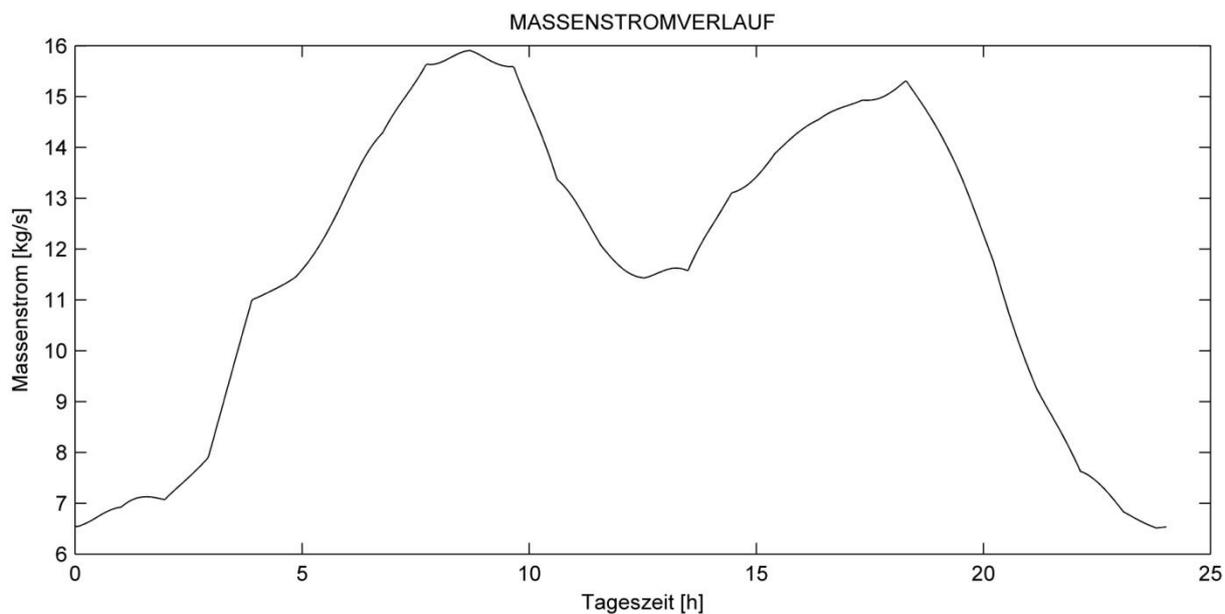


Abbildung 5.19: Massenstromverlauf Szenario 2

- Temperatur- und Druckfeld

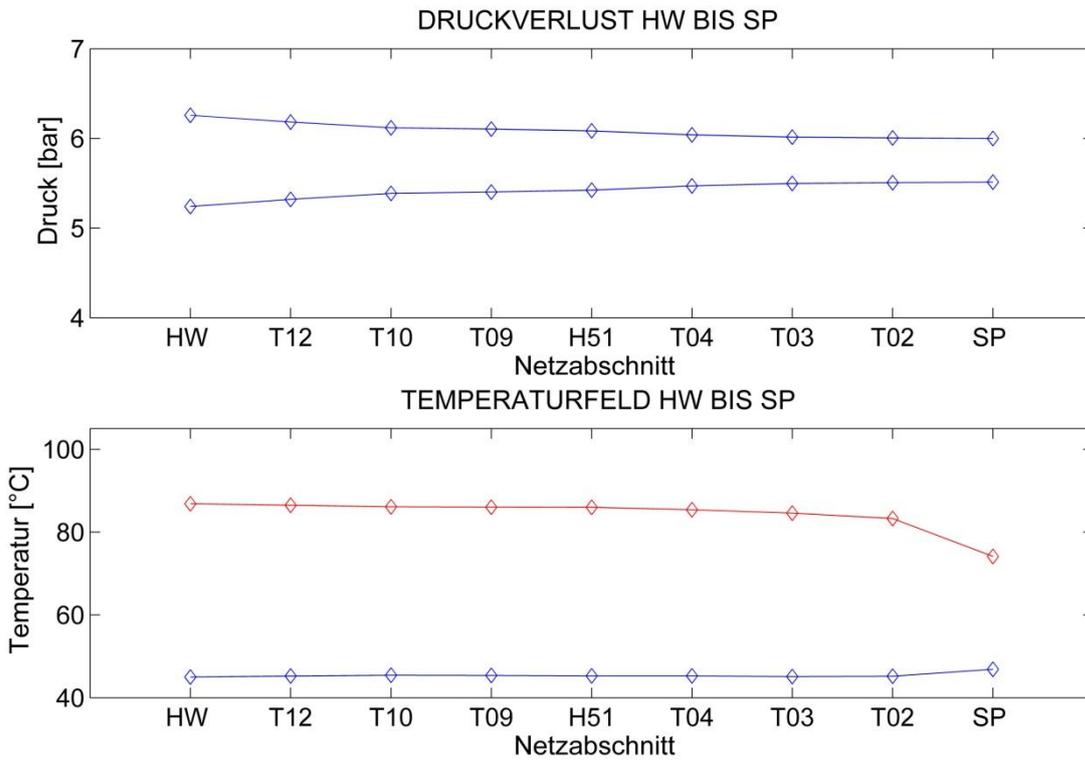


Abbildung 5.20: Druck- und Temperaturfeld Szenario 2

5.3.4. Szenario 3

Untersuchung der Vermaschung eines Teilbereichs des Netzes. (Vgl. Kap. 4.2.4)

- Randbedingungen

Tabelle 5.8: Randbedingungen Szenario 3

Vorlauftemperatur	370	K
Rücklauftemperatur	320	K
Mitteltemperatur Tag	10	°C
Erdreichtemperatur	8	°C
Simulationsdatum	01. Okt	
Vorlaufdruck SP	6	bar
Differenzdruck SP	0,5	bar
Netzart	vermascht	

- Tagesarbeiten und Wirkungsgrad

Tabelle 5.9: Ergebnisse Szenario 3

Pumpenarbeit	9,940	kWh
Kesselarbeit	14,239	MWh
Verbraucherarbeit	11,517	MWh
Netzverluste	2,722	MWh
% an Kesselarbeit	19,12%	
Wirkungsgrad	80,82%	

- Leistungsverläufe

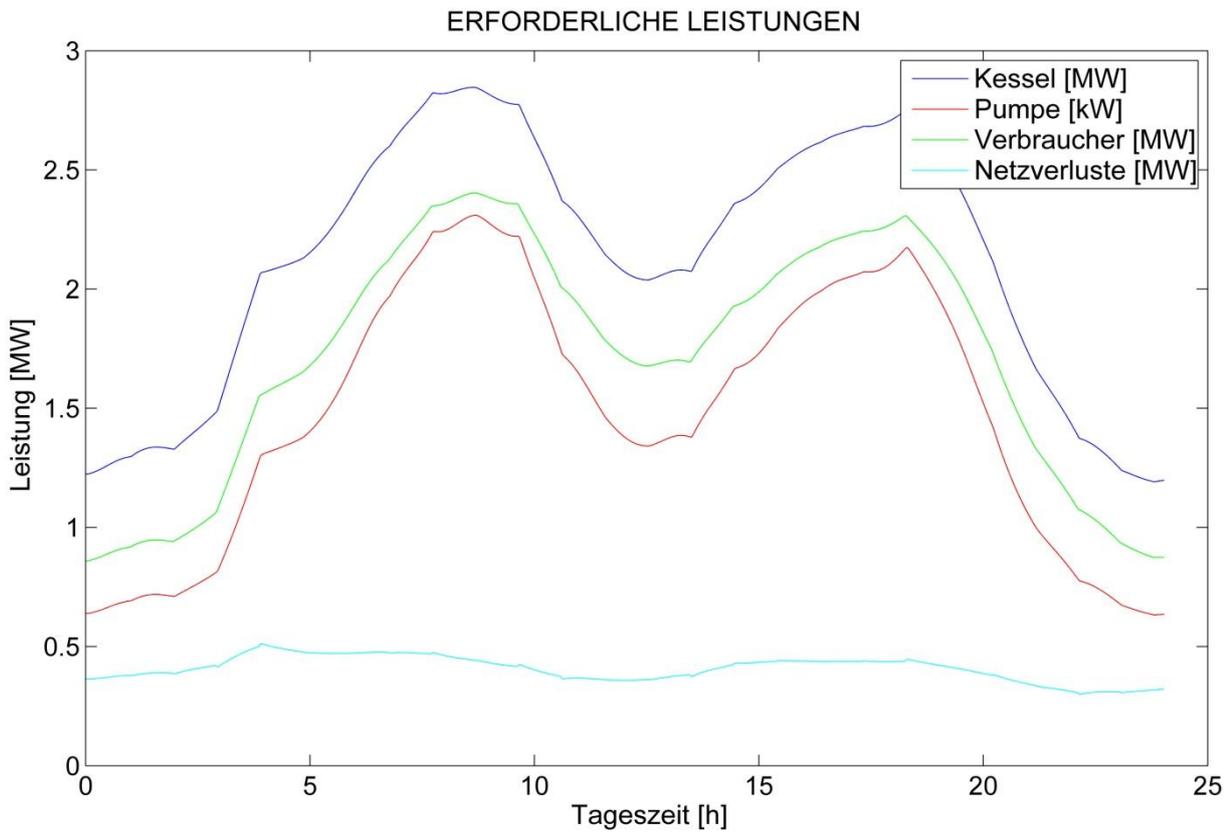


Abbildung 5.21: Leistungsverläufe Szenario 3

- Massenstrombedarf

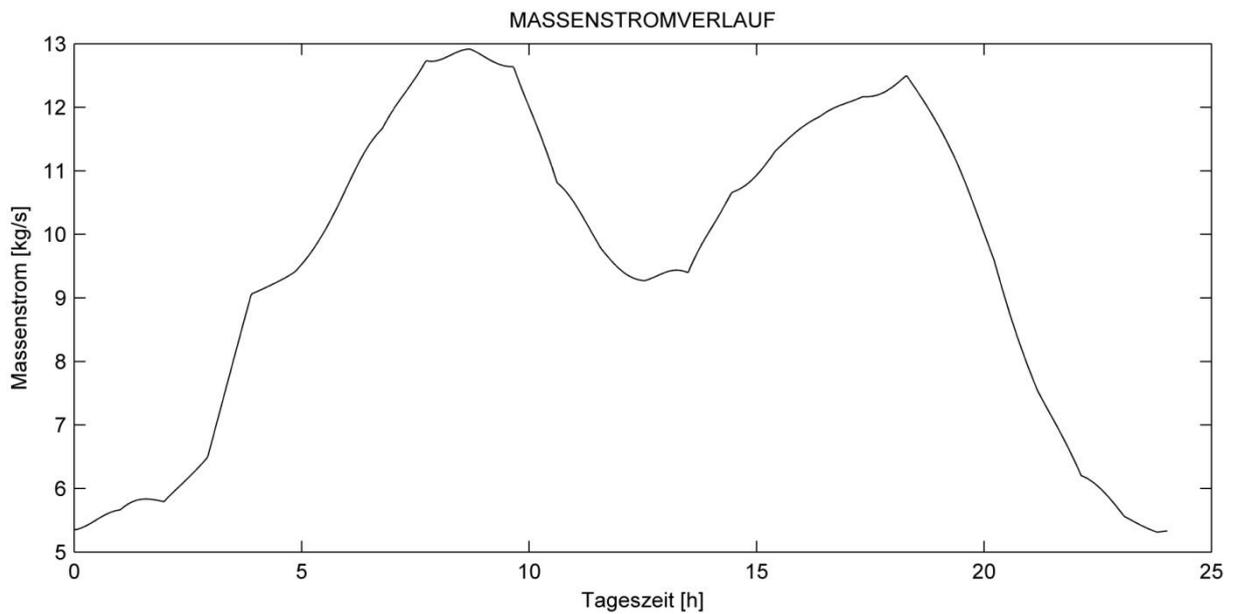


Abbildung 5.22: Massenstromverlauf Szenario 3

- Temperatur- und Druckfeld

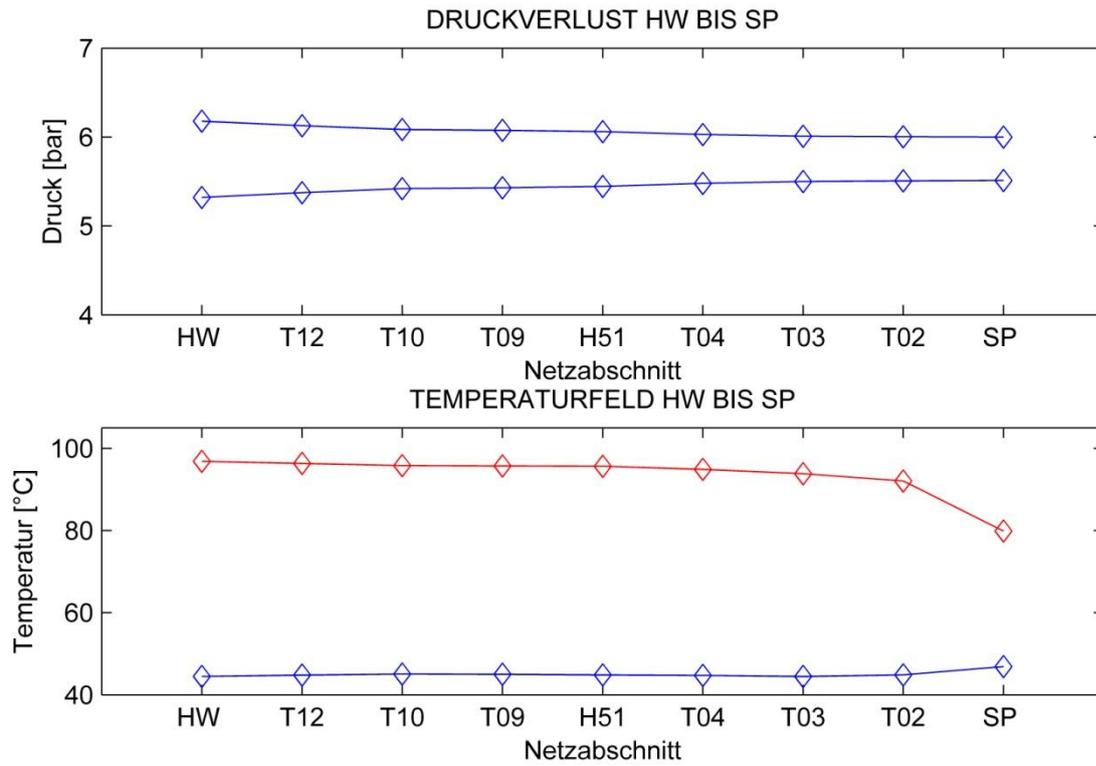


Abbildung 5.23: Druck- und Temperaturfeld Szenario 3

Von Interesse als Entscheidungsgrundlage für die Dimensionierung der Vermaschungsleitung ist deren Massenstrom (Abbildung 5.24):

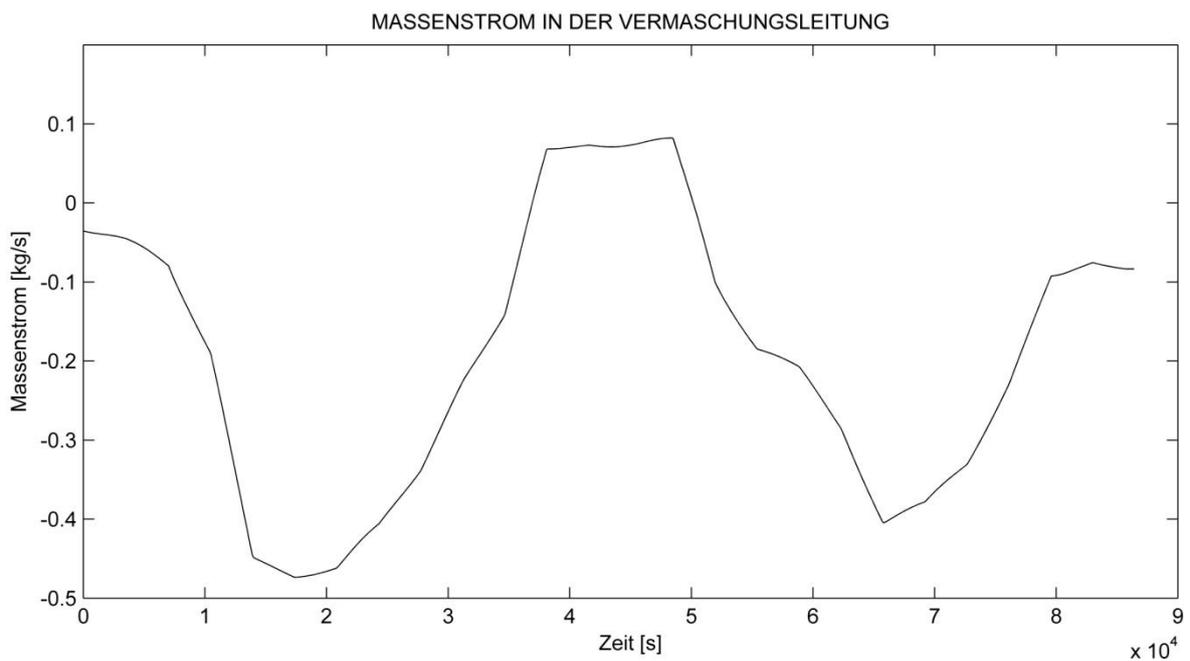


Abbildung 5.24: Massenstrom in der Vermaschungsleitung

5.3.5. Szenario 4

Senkung der Vor- und Rücklauftemperatur um jeweils 5K.

- Randbedingungen

Tabelle 5.10: Randbedingungen Szenario 4

Vorlauftemperatur	365	K
Rücklauftemperatur	315	K
Mitteltemperatur Tag	10	°C
Erdreichtemperatur	8	°C
Simulationsdatum	01. Okt	
Vorlaufdruck SP	6	bar
Differenzdruck SP	0,5	bar
Netzart	unvermascht	

- Tagesarbeiten und Wirkungsgrad

Tabelle 5.11: Ergebnisse Szenario 4

Pumpenarbeit	9,635	kWh
Kesselarbeit	13,938	MWh
Verbraucherarbeit	11,517	MWh
Netzverluste	2,421	MWh
% an Kesselarbeit	17,37%	
Wirkungsgrad	82,57%	

- Leistungverläufe

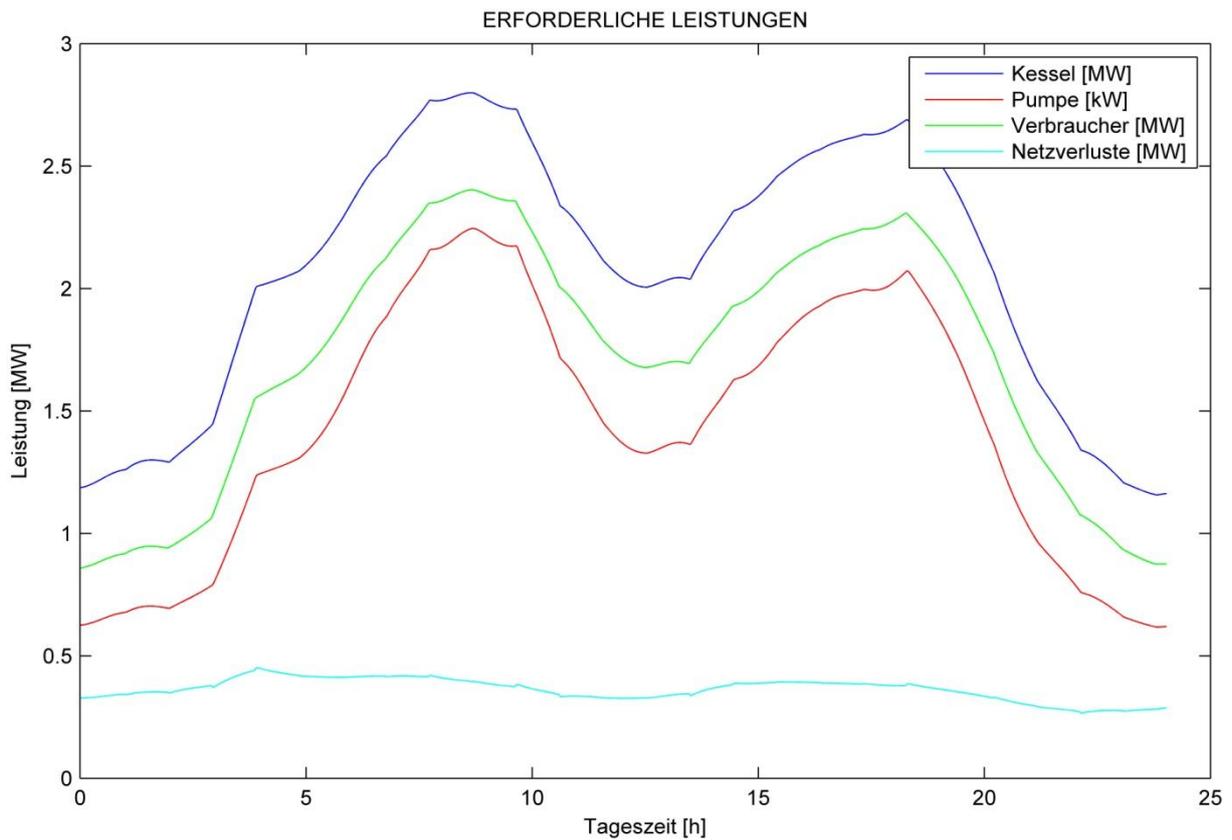


Abbildung 5.25: Leistungsverläufe Szenario 4

- Massenstrombedarf

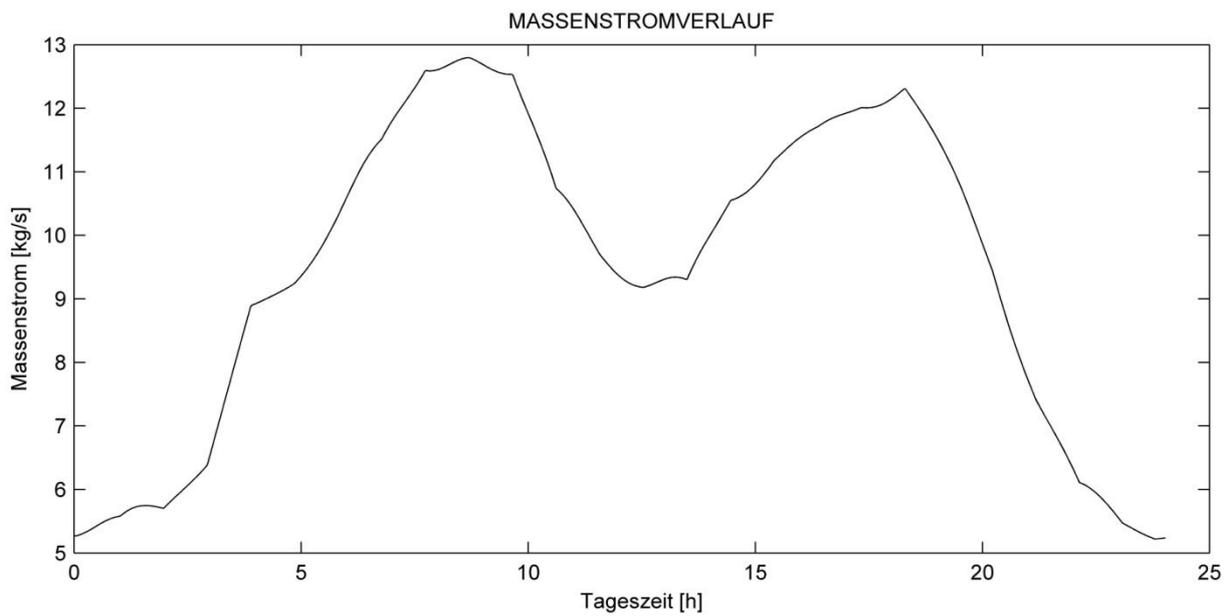


Abbildung 5.26: Massenstromverlauf Szenario 4

- Temperatur- und Druckfeld

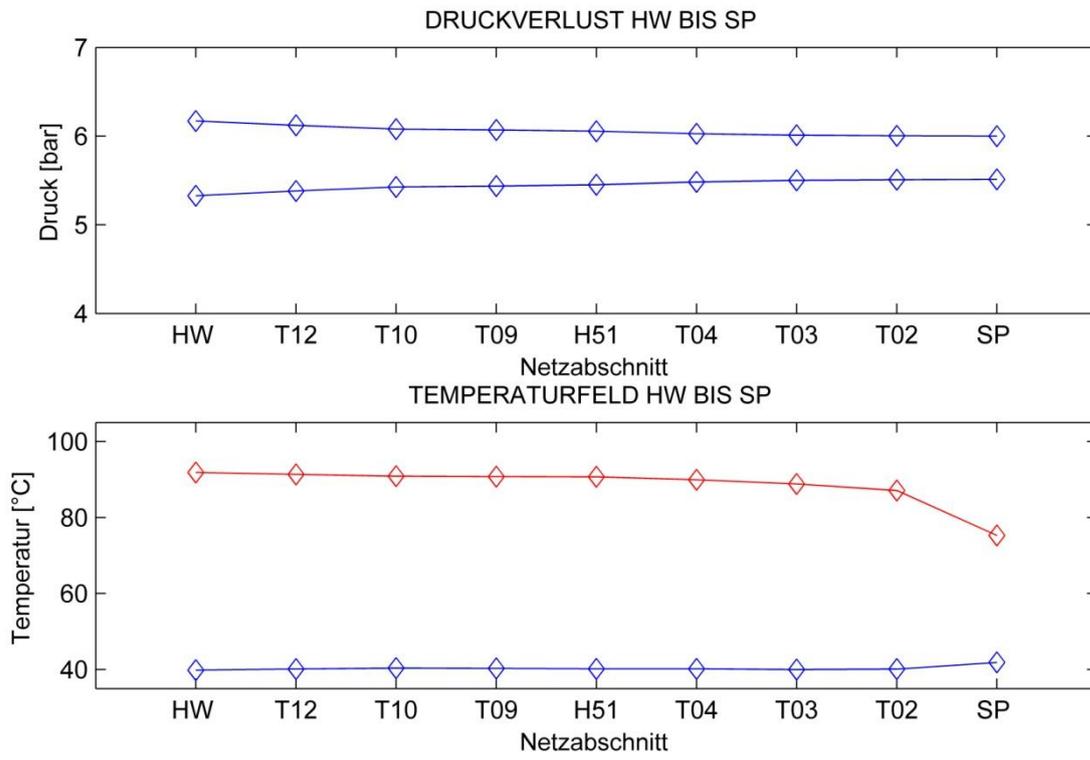


Abbildung 5.27: Druck- und Temperaturfeld Szenario 4

5.3.6. Vergleich

Die folgenden Graphen enthalten den Vergleich der vorher ermittelten Verläufe:

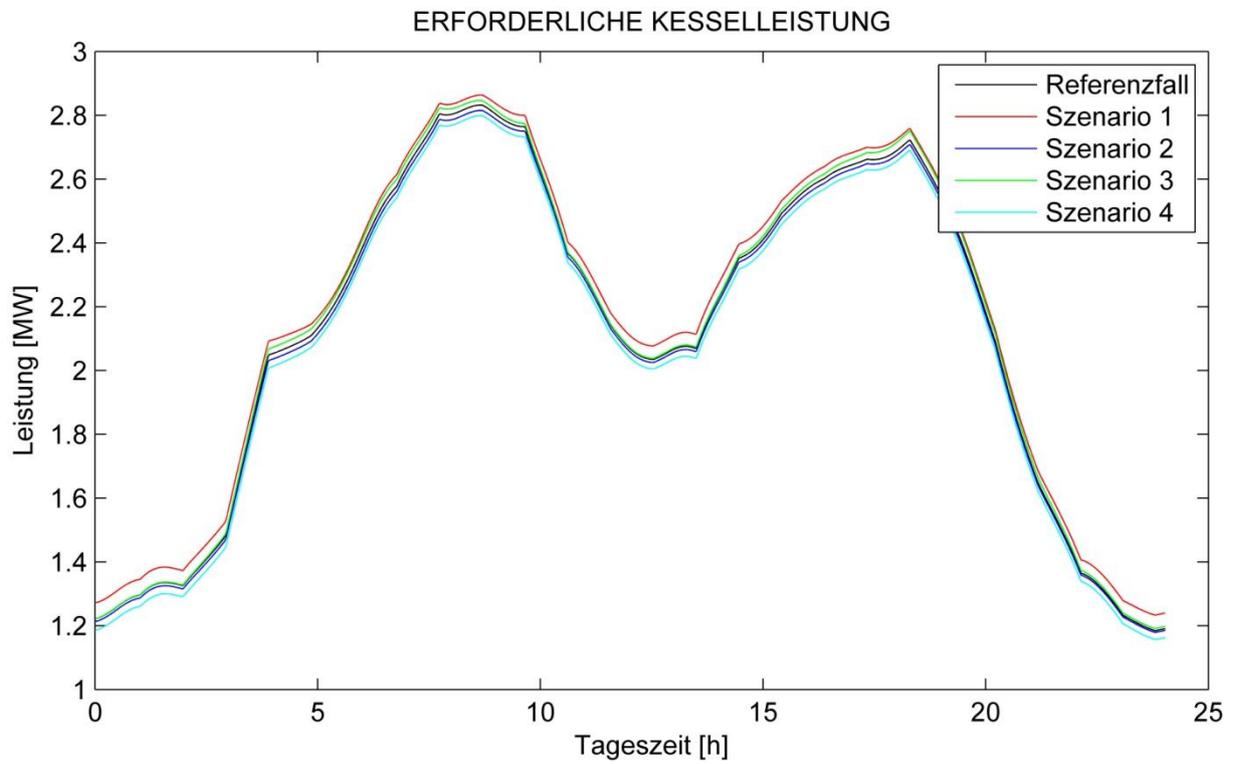


Abbildung 5.28: Vergleich der Kesselleistungsverläufe

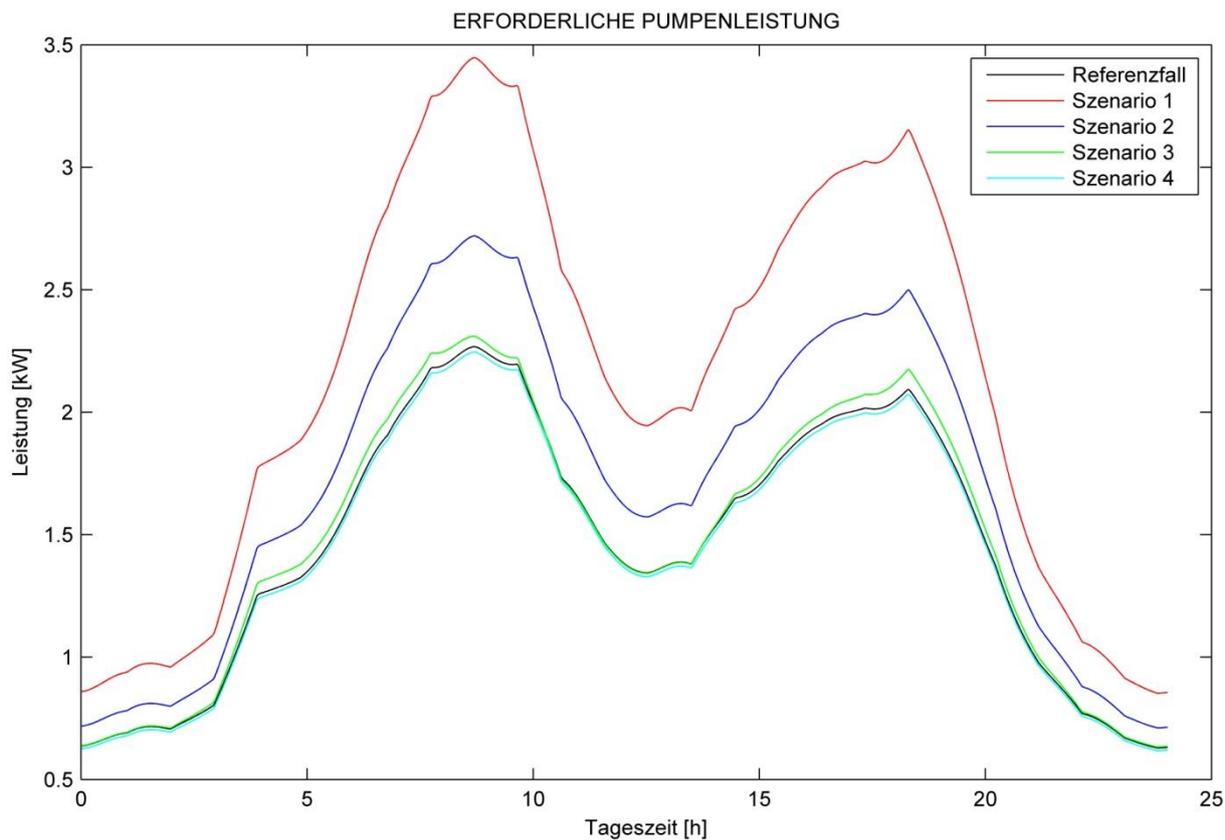


Abbildung 5.30: Vergleich der Pumpenleistungsverläufe

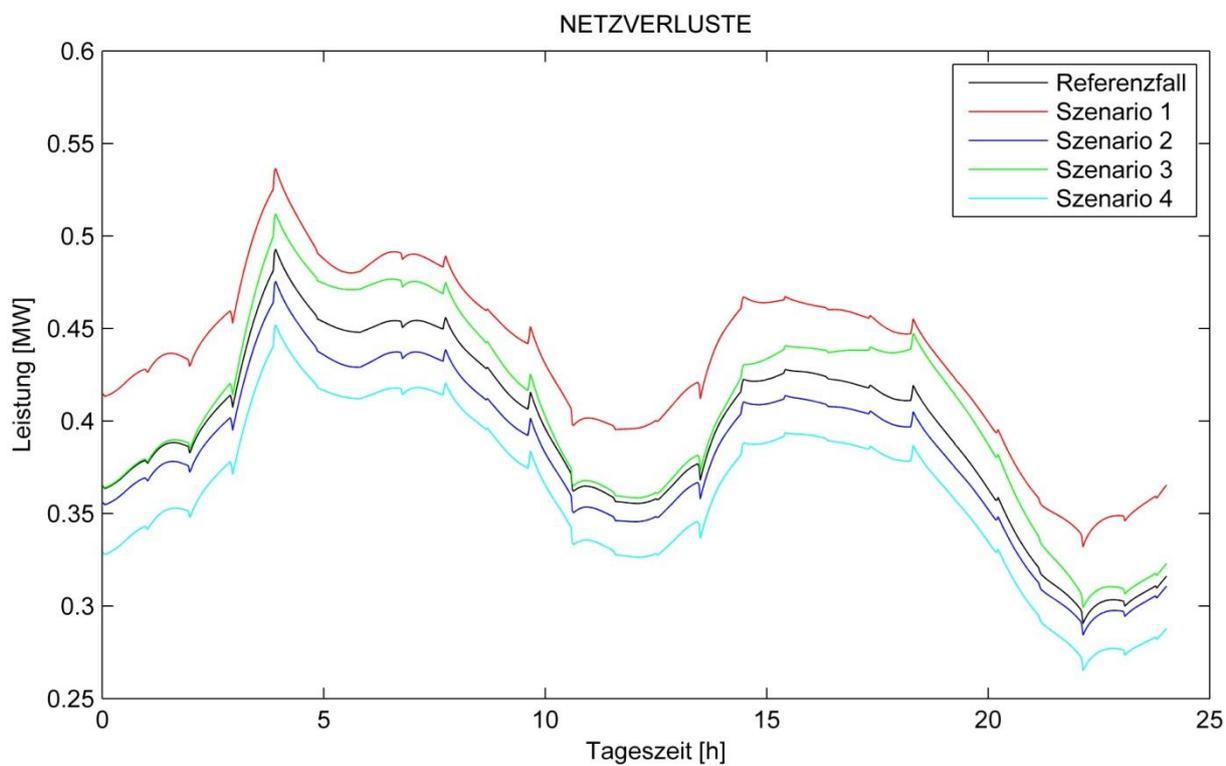


Abbildung 5.29: Vergleich der Netzverluste

Abschließend noch die Zusammenfassung der HW-Daten mit den jeweiligen Veränderungen zum Referenzfall:

Tabelle 5.12: Vergleich der Ergebnisse

		RF	SZ1		SZ2		SZ3		SZ4	
				+/- RF		+/- RF		+/- RF		+/- RF
Pumpenarbeit	kWh	9,75	14,27	31,72%	13,91	29,93%	9,94	1,95%	9,63	-1,16%
Kesselarbeit	MWh	14,15	14,42	1,84%	13,99	-1,19%	14,24	0,59%	13,94	-1,56%
VB-Arbeit	MWh	11,52	11,52	0,00%	11,52	0,00%	11,52	0,00%	11,52	0,00%
Netzverluste	MWh	2,64	2,90	9,15%	2,47	-6,76%	2,72	3,11%	2,42	-8,96%
%Kesselarbeit		18,64%	20,13%	1,50%	17,66%	-0,97%	19,12%	0,48%	17,37%	-1,27%
Wirkungsgrad		81,31%	79,79%	-1,52%	82,25%	0,95%	80,82%	-0,48%	82,57%	1,27%

Szenario 1: Anhebung Rücklauf-temperatur um 10K

Szenario 2: Senkung Vorlauf-temperatur um 10K

Szenario 3: Ver-maschung eines Teilnetzes

Szenario 4: Senkung der Rücklauf- und Vorlauf-temperatur um jeweils 5 K.

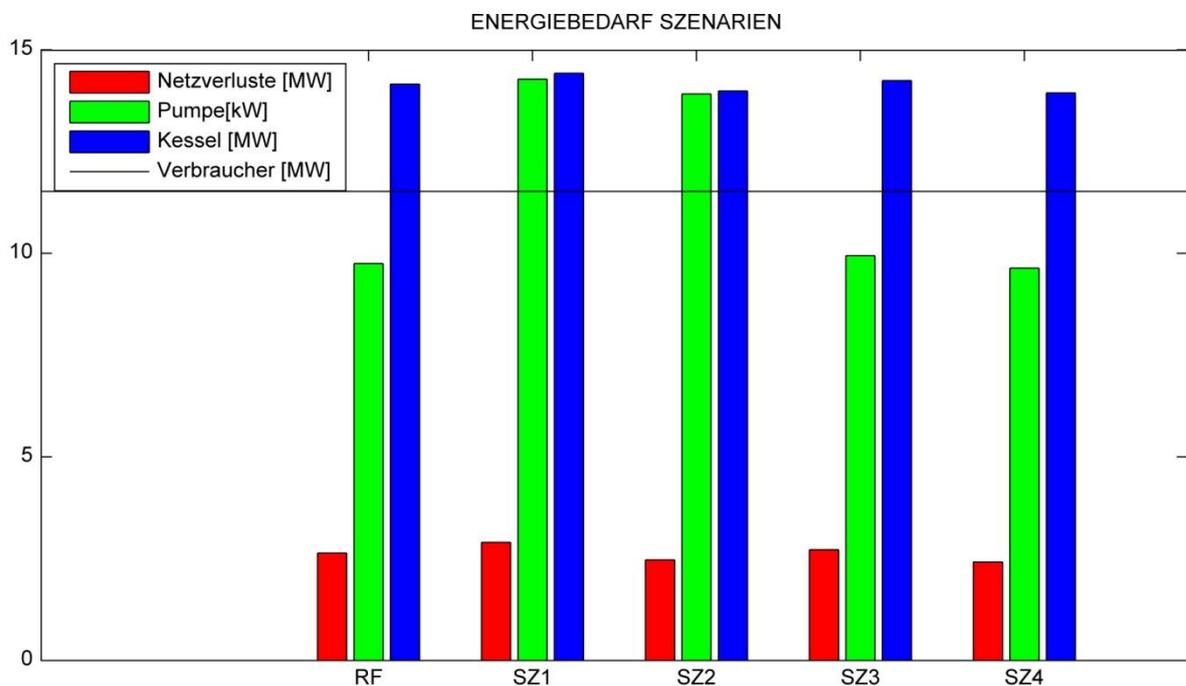


Abbildung 5.31: Balkendiagramm Szenarienvergleich

6. Diskussion

6.1. Netzvereinfachung

Wie die Untersuchungen in Kap.4.1 und 5.1 zeigen, liefert die Simulation mit dem vereinfachten Netz umso genauere Ergebnisse, je näher die zusammengefasste Verbrauchergruppe dem Heizwerk ist. Für $\varphi = 0.1$ können mit Fehlern im Temperaturverlauf von ca. 1% schon relativ genaue Simulationen durchgeführt werden. Auch liegt der Fehler bei der Kessel- und Pumpenleistung im Bereich 2-3%, was bei Wirkungsgradbetrachtungen des Gesamtsystems noch verkraftbar ist.

6.2. Simulation

Obwohl die Simulationsergebnisse noch nicht anhand realer Betriebsdaten überprüft werden konnten, kann man festhalten, dass sich das entwickelte Modell gut zum relativen Vergleich des Betriebsverhaltens bei geänderten Parametern von Fernwärmenetzen eignet. Anhand von Änderungen der Betriebsdaten können Aussagen über die Änderungen von Wirkungsgraden, Leistungen und Verlusten getroffen werden.

Die Analyse der Änderungen der Ergebnisse der Szenarien 1, 2 und 3 in Bezug auf den Referenzfall folgt:

- Szenario1:

Die Kesselleistung bei Szenario 1 wird um ca. 100kW an der Ordinate nach oben verschoben. Die Temperaturspreizung am Verbraucheranschluss sinkt durch die erhöhte Rücklaufemperatur. Die von den Verbrauchern benötigte Leistung muss durch einen erhöhten Wassermassenstrom wettgemacht werden. Deshalb steigt die benötigte Pumpenleistung um 31,7% an, was sich wiederum in erhöhten Netzverlusten manifestiert. Aufgrund der annähernd quadratischen Abhängigkeit des Druckverlustes im Rohr vom Massenstrom (Gl. 6.1) kommt es beim Vergleich der Pumpenleistungsverläufe nicht zu einer vertikalen Verschiebung der beiden Kurven, sondern zu einer differenzabhängigen Streckung der beiden Verläufe.

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} = \xi \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{\dot{V}^2 \cdot \rho}{2 \cdot A_i^2} = \xi \cdot \frac{8\dot{m}^2 \cdot l}{\rho \cdot d_i^5 \cdot \pi^2} \rightarrow \Delta p \sim \dot{m}^2$$

(Gl. 6.1)

Durch die höheren Massenströme und die damit verbundenen höheren Geschwindigkeiten in den Rohren steigen auch die Netzverluste an (plus 9,15% im Vergleich zum Referenzfall).

Insgesamt sinkt der Wirkungsgrad über die simulierte Zeit um 1,522%.

- Szenario 2:

Auch bei diesem Szenario wird die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf vermindert, mit dem Unterschied, dass nicht die Rücklaufemperatur angehoben, sondern die Vorlaufemperatur um 10K gesenkt wird. Die erforderliche Kessellarbeit sinkt im Vergleich zum Referenzfall um 1,19%. Die erforderliche Pumpenarbeit um die Leistungsfunktionen der Verbraucher befriedigen zu können steigt wegen der kleineren Temperaturspreizung auch hier um 29,93% an.

Die Netzverluste sinken bei einer um 10K niedrigeren Vorlaufemperatur um 6,76%. Der Grund hierfür ist in die geringere Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Wassertemperatur und dem daraus resultierenden kleineren Wärmestrom über die Mantelflächen der Rohre.

Die gesunkene erforderliche Kesselleistung und die kleineren Netzverluste schaffen es, den erhöhten Pumpenstrombedarf über zu kompensieren. Daraus resultiert ein höherer Netzwirkungsgrad von 82,25%, was einer Steigerung von 0,95% gegenüber dem Referenzfall darstellt.

- Szenario 3:

Bei der Teilvermaschung des Netzes kann der Weg, den das Wassers auf dem Weg vom Heizwerk zum Verbraucher zurücklegt nicht von vorne herein vorausgesagt werden. Verbraucher am oberen Strang können jetzt auch vom unteren Strang und des zusätzlichen Rohres (Abbildung 4.9) mit Heißwasser versorgt werden. Je nach sich einstellenden Druckverhältnissen im Rohrnetz beziehen die nach der Ringleitung kommenden Verbraucher das Heißwasser von ihrem Strang oder vom jeweils anderen über die Ringleitung (siehe auch Abbildung 5.24). Der Verlauf der erforderlichen Pumpenleistung hat daher im Vergleich zum Referenzfall einen (auch entlang er Abszisse) verzerrten Verlauf. Grundsätzlich wird aber beobachtet, dass Maxima im betrachteten Pumpenleistungsverlauf gestreckt und das Minimum im Vergleich zum Referenzfall gestaucht werden. Insgesamt erhöht sich die Pumpenarbeit um 1,95%.

Die Netzverluste steigen wegen der zusätzlichen Rohrleitung um 3,11% auf 19,12% der Kesselleistung an.

Auch die im Kessel zur Verfügung zu stellende Energiemenge steigt um 0,59% an. Dies resultiert schließlich in einem Wirkungsgrad von 80,82%, was einer Wirkungsgradeinbuße von 0,48% entspricht. Dies ist ein vergleichsweise geringer Preis, der für eine erhöhte Versorgungssicherheit gezahlt werden muss.

- Szenario 4:

Wird das gesamte Temperaturniveau der Fernwärmeversorgung (also Vor- und Rücklauftemperatur) um 5K abgesenkt, hat dies signifikante Auswirkungen auf den HW-Betrieb. So sinken die Netzverluste aufgrund der kleineren Temperaturdifferenz vom Wasser zum Erdreich um 8,96%. Auch sinken die Pumpenarbeit (-1,16%) und die Kesselarbeit (-1,56%). Dies macht sich in einem Wirkungsgradzuwachs von 1,27% bemerkbar, der nunmehr 82,57% beträgt. Limitierend bei der Vor- und Rücklauftemperaturabsenkung sind die Prozesswärmeabnehmer (z.B. Industriebetriebe), welche für verfahrenstechnische Anlagen ein bestimmtes Temperaturniveau benötigen.

6.3. Weiterführende Betrachtungen

Im Rahmen der Entwicklung des Modells in Simscape hat sich herausgestellt, dass die Modellbildung in einigen Bereichen noch verfeinert werden sollte. Der diesbezügliche Bedarf besteht insbesondere in den folgenden Punkten:

6.3.1. Transformation

Durch die Anpassung der Regelstrategie, etwa der eingestellten (konstanten) Rücklauftemperatur bei den transformierten Verbrauchern, ggf. auch variable Rücklauftemperatur könnten die Fehler in den Temperaturspreizungen noch verringert und somit auch die Auswirkungen auf den Wirkungsgrad des Netzes reduziert werden. Dafür sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig.

Auch müsste noch detailliert eruiert werden, wie sich die Anzahl der Verbraucher in einer zu zusammenfassenden Verbrauchergruppe auf den Fehler (auch in Abhängigkeit von φ) auswirkt.

Ein weiterer interessanter Punkt bei der Netzvereinfachung ist in der Tatsache begründet, dass durch ebendiese Netzinformation verloren geht. Viele Rohrelemente und Verbraucher werden zu wenigeren zusammengefasst. Eine mögliche Rücktransformation, welche bei sich einstellenden Druck- und Temperaturverhältnissen in einem Netzknoten des vereinfachten Modells ansetzt, könnte Aufschluss geben, welche Druck- und Temperaturverhältnisse sich im Betrieb des Netzes bei einem ursprünglichen Verbraucher eingestellt hätten, wäre das Netz nicht transformiert worden. Mithilfe der existierenden ursprünglichen Rohrgeometrien könnte die Rücktransformation durchgeführt werden.

6.3.2. Verbraucherkfunktionen

Inwiefern die Verwendung von Standardverläufen bei einer Netzsimulation ausreichend genaue Simulationsergebnisse liefert, ist fraglich. Jedoch wurde bei der Erstellung des Modells darauf geachtet, die Schnittstellen klar festzulegen. Daher ist es auch möglich das bestehende Modell mit anderen (genaueren, z.B. Messwerte von) Leistungsverläufen zu füttern. Auch die zusätzliche Vorgabe von Verbrauchermassenströmen (bei fehlender primärseitiger Temperaturregelung, wie sie hier im Modell angenommen wurde) ist möglich.

Um die Genauigkeit der Verbraucherinputdaten für die Simulation zu verbessern und die Simulation in weitere Folge zum Beispiel als Bedarfsoptimierungstool des Kessels und/oder der Pumpen einsetzen zu können, wären noch weiterführende Arbeiten, insbesondere der Betrachtung der Sekundärseite der Verbraucher notwendig. Damit könnten auch mögliche Speichereffekte wie sekundärseitig verbaute Pufferspeicher untersucht werden. Die Aufnahme und Variation der Pufferladezeiten in der Simulation wäre ein weiterer wichtiger Freiheitsgrad bei der Optimierung des Heizwerkbetriebs. Dabei könnte man sogar über tariflich geförderte Speicherladezeiten zur betriebswissenschaftlichen Optimierung nachdenken.

6.3.3. Heizwerkseitige Komponenten

Auch die detaillierte Modellierung eines Wärmetauschers im Heizwerk würde die Simulationsergebnisse wahrscheinlich näher an real erzielte Werte bringen. Bei einem detaillierten Wärmetauschermodell könnten dann die Systemgrenzen erweitert und beispielsweise auch der Kessel mit in die Simulation aufgenommen werden. Auch reale Vorlauftemperaturschwankungen, wie sie im realen Betrieb auftreten könnten, wären dann auf die Simulation übertragbar.

Mögliche Elemente im Heizwerk, die Rückkopplungseffekte auf das Netz haben könnten, wie zum Beispiel eine Wärmepumpe, welche die Kesselabgase als Wärmequelle nutzt und die Temperatur im Rücklauf wieder auf das Temperaturniveau des Vorlaufs anhebt oder ein ORC-Prozess, wie er ja in der betrachteten Anlage implementiert ist könnten in einem Ausbau des Modells zusätzlich mit betrachtet werden.

Das in dieser Simulation verwendete vereinfachte Pumpenmodell ist für tiefgründige Betrachtungen der Pumpenenergie nur begrenzt geeignet. So wurde bei der Pumpe hier zum Beispiel ein konstanter Wirkungsgrad von 50% angenommen. Der reale Pumpenbetrieb, fernab vom Betriebspunkt ist jedoch mit erheblichen Wirkungsgradeinbußen verbunden, welche hier nicht modelliert wurden.

Auch wurde der Tatsache hier nicht Rechnung getragen, dass mit einer realen Pumpe nicht alle Druck/Massenstrom-Kombinationen realisiert werden können. Stillschweigend wurde in der Simulation davon ausgegangen, dass der ermittelte Pumpenleistungsbedarf die Menge der Schnittpunkte der Pumpenkennlinie mit der Anlagenkennlinie ist. Die Erweiterung des Modells durch eine fördermengen- und/oder druckdifferenzabhängige Pumpenwirkungsgradeinbuße könnte dem Abhilfe schaffen.

6.3.4. Simulationssoftware

Eines der Ziele bei der Durchführung dieser Arbeit war, die Eignung des Softwarepaketes Matlab/Simulink/Simscape zur Durchführung einer Fernwärmenetzmodellierung festzustellen.

Einschränkend wirkt sich bei Verwendung der Thermal-Liquid-Domäne in Simscape aus, dass die Maximaltemperatur von vorn herein auf 100°C und 50 bar beschränkt ist. Die in der Domäne gespeicherten Zustandsgrößen des Fluids Wasser beziehen sich auf einen fest definierten Bereich.

Durch die Möglichkeit auf den Quelltext der Standardkomponenten der Thermal-Liquid-Library zugreifen zu können, ist es relativ leicht möglich die Funktion der Blöcke abzuwandeln und dadurch Komponenten zu schaffen, welche für einen speziellen Anwendungsfall angemessen sind.

Die Modellierung eines einfachen Pumpenmodells war in Simscape am Anfang etwas schwierig, zumal dafür zwei Blöcke (Mass-Flow-Source sowie Pressure-Source) in Frage kamen. Erst durch die Serienschaltung dieser beiden Komponenten war die Modellierung eines einfachen Pumpenmodells möglich, welches jedoch noch weit entfernt ist vom Modell einer realen Pumpe.

Auch das Verdampfen bei plötzlicher Druckabsenkung (beispielsweise bei einem Leck) insbesondere bei Hochtemperaturfernwärmenetzen kann mit Simscape wegen des Fehlens der Phasenübergangsgleichungen (noch) nicht betrachtet werden. Zwar ist die Änderung des Temperaturbereiches der Domäne möglich, jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden. Wird über die Modellierung von Phasenübergangseffekten nachgedacht, müssen neue Komponenten geschaffen und die sie beschreibenden Gleichungen in den Quelltext übernommen werden.

Die sukzessive Erweiterung der hier erstellten Komponentenbibliothek DIHE_Components und der damit verbundene Know-how-Transfer kann bei der Entwicklung zukünftiger Modelle dazu beitragen den Grad der Modellbildung schrittweise zu verfeinern.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass Simscape eine geeignete Umgebung zur Modellierung von Fernwärmenetzen bietet. Auch die Signalverarbeitung mit Matlab und Simulink, welche weitreichend verbreitet sind, hilft insbesondere bei der Rohdatenaufbereitung und Simulationsdatennachbereitung.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Überblick bioEPCS	6
Abbildung 2.2: Fernheizwerk Großarl: Blockschaltbild (vereinfacht).....	8
Abbildung 2.3: Fernwärmenetz Großarl, rot: Heizwerk, blau: Schlechtpunktverbraucher.....	8
Abbildung 3.1: Simscape Standard-Komponentenbibliothek Thermal-liquid	16
Abbildung 3.2: Simscape Custom library DIHE_Components.....	18
Abbildung 3.3: Simscape-Modell eines Fernwärme-Rohrelements.....	20
Abbildung 3.4: Composite Component <i>DIHE_Tube</i>	22
Abbildung 3.5: Eingabefeld der Komponente <i>DIHE_Tube</i>	22
Abbildung 3.6: Druckverhältnisse im Netz. Oben: Druck in den Vorlaufrohren, unten: Druck in den Rücklaufrohren. Roter Kreis: Pumpe im HW, schwarze Kreise: Verbraucher im Netz	24
Abbildung 3.7: Fließschema einer Wärmeübergabestation (Primär- und Sekundärseite) mit Hauptkomponenten Plattenwärmetauscher, Kombiventil, Wärmemengenzähler und Absperrventilen	26
Abbildung 3.8: Standardverläufe Leistungsabnahme Ein- und Mehrfamilienhäuser	28
Abbildung 3.9: Leistungsentnahmen Hotel im Zeitraum Januar 2006.....	30
Abbildung 3.10: Jahresleistungsentnahme Hotel	31
Abbildung 3.11: Regressionsfläche des Jahresverbrauchs Hotel	32
Abbildung 3.12: Lineare Regression Außentemperatur/Energieentnahme	33
Abbildung 3.13: Simscape-Modell einer Wärmeübergabestation.....	34
Abbildung 3.14: Composite Component <i>WUEST_RT</i>	36
Abbildung 3.15: Eingabefeld der Komponente <i>WUEST_RT</i>	36
Abbildung 3.16: Composite Component <i>WUEST_RT_END</i>	37
Abbildung 3.17: Block <i>Tp_reservoir</i>	37
Abbildung 3.18: Vereinfachungsvariante I nach Larsen et.al	43
Abbildung 3.19: Vereinfachungsvariante II nach Larsen et.al	44
Abbildung 4.1: Einteilung des Fernwärmenetzes Großarl in Cluster. Rot: HW, blau: SP.....	46
Abbildung 4.2: Fernwärmenetz Großarl nach der Netzvereinfachung. Rot: HW, blau: SP.....	48
Abbildung 4.3: Simscape-Modell des Fernwärmenetzes Großarl.....	49
Abbildung 4.4: Submodell <i>System</i> des Simscape-Modells	50
Abbildung 4.5: Subsystem des Clusters <i>T09</i> im Simscape-Modell.....	52
Abbildung 4.6: Simscape-Modell eines Fernwärmeanschlusses (<i>Verbraucher</i>).....	54
Abbildung 4.7: Simscape-Modell eines vereinfachten Verbrauchers	55
Abbildung 4.8: Lokalisierung des Rohrelements zur Vermaschung des Netzes im Simscape-Modell	56
Abbildung 4.9: Vermaschtes Fernwärmenetz Großarl. Rot: HW, blau: SP, rote Linie: zusätzliches Rohr	56

Abbildung 4.10: In der Simulation verwendete Verbraucherfunktion	57
Abbildung 5.1: Zur Validierung der Netztransformation gewähltes Simscape - Teilmodell	72
Abbildung 5.2: Vereinfachte Verbraucher, Simscape-Modell	73
Abbildung 5.3: Leistungsverläufe der vereinfachten Verbraucher V01, V02, V03	74
Abbildung 5.4: Vergleich Temperaturspreizung Ursprungsnetz und aggregiertes Netz	76
Abbildung 5.5: Vergleich Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf	76
Abbildung 5.6: Vergleich der erforderlichen Kesselleistungen	77
Abbildung 5.7: Vergleich der erforderlichen Pumpenleistungen	77
Abbildung 5.8: Entwicklung des Fehlers der Temperaturdifferenz für geändertes φ	78
Abbildung 5.9: Entwicklung des Fehlers der Kesselleistung für geändertes φ	79
Abbildung 5.10: Entwicklung des Fehlers der Pumpenleistung für geändertes φ	79
Abbildung 5.11: Vorlauftemperaturen ab HW und am SP	80
Abbildung 5.12: Leistungsverläufe Referenzfall	83
Abbildung 5.13: Massenstromverlauf Referenzfall	83
Abbildung 5.14: Druck- und Temperaturfeld Referenzfall	84
Abbildung 5.15: Leistungsverläufe Szenario 1	86
Abbildung 5.16: Massenstromverlauf Szenario 1	86
Abbildung 5.17: Druck- und Temperaturfeld Szenario 1	87
Abbildung 5.18: Leistungsverläufe Szenario 2	89
Abbildung 5.19: Massenstromverlauf Szenario 2	89
Abbildung 5.20: Druck- und Temperaturfeld Szenario 2	90
Abbildung 5.21: Leistungsverläufe Szenario 3	92
Abbildung 5.22: Massenstromverlauf Szenario 3	92
Abbildung 5.23: Druck- und Temperaturfeld Szenario 3	93
Abbildung 5.24: Massenstrom in der Vermaschungsleitung	93
Abbildung 5.25: Leistungsverläufe Szenario 4	95
Abbildung 5.26: Massenstromverlauf Szenario 4	95
Abbildung 5.27: Druck- und Temperaturfeld Szenario 4	96
Abbildung 5.28: Vergleich der Kesselleistungsverläufe	97
Abbildung 5.29: Vergleich der Netzverluste	98
Abbildung 5.30: Vergleich der Pumpenleistungsverläufe	98
Abbildung 5.31: Balkendiagramm Szenarienvergleich	99

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Verlegte Rohre nach Rohrgeometrien Netz Großarl	9
Tabelle 2.2: Wärmeverluste Rohre nach Geometrien nach [14], Seite 53	10
Tabelle 3.1: aggregationsrelevante Konfigurations- daten, Betriebsparameter und Stoffdaten	42
Tabelle 4.1: Zusammengefasste Verbraucher nach Cluster	47
Tabelle 4.2: Anzahl Netzelemente vor und nach der Netztransformation.....	48
Tabelle 4.3: Zur Transformation erforderliche Inputdaten.....	65
Tabelle 5.1: zusammengefasste Verbraucher mit Tagesenergieentnahmen	74
Tabelle 5.2: Randbedingungen Referenzfall	82
Tabelle 5.3: Ergebnisse Referenzfall.....	82
Tabelle 5.4: Randbedingungen Szenario 1	85
Tabelle 5.5: Ergebnisse Szenario 1	85
Tabelle 5.6: Randbedingungen Szenario 2.....	88
Tabelle 5.7: Ergebnisse Szenario 2	88
Tabelle 5.8: Randbedingungen Szenario 3.....	91
Tabelle 5.9: Ergebnisse Szenario 3	91
Tabelle 5.10: Randbedingungen Szenario 4.....	94
Tabelle 5.11: Ergebnisse Szenario 4	94
Tabelle 5.12: Vergleich der Ergebnisse.....	99

9. Quellennachweis

- [1] “Fernwärme,” 2014. [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Fernw%C3%A4rme#cite_note-1.
- [2] RWE, “Das erste Geothermiekraftwerk der Welt,” 2014. [Online]. Available: <http://www.rwe.de/web/cms/de/363198/rwe-magazin/rwe-magazin-archiv/archiv-2010/ausgabe-1/strom-und-waerme-aus-der-erde/geothermie-wissen/>.
- [3] SVG(Schweizerische Vereinigung Geothermie), “Überblick,” 2014. [Online]. Available: http://www.geothermie.ch/index.php?p=keyfacts_thermalWater.
- [4] BSEnergy, “James Watt als Vorreiter,” 2014. [Online]. Available: <http://www.bs-energy.de/unternehmen/strom-waerme-wasser/unsere-fernwaerme/geschichte-der-fernwaerme/>.
- [5] Oujè-Bougoumou, “District Heating System,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ouje.ca/content/our-story/energy.php>.
- [6] FGW(Fachverband der Gas- und Waermeversorgungsunternehmen), “Versorgungsdichte,” 2014. [Online]. Available: https://www.gaswaerme.at/bfw/themen/index_html?uid=2737.
- [7] Recknagel, Sprenger, and Schramek, *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*, 76. Auflag. Oldenbourg Industrieverlag, 2012, p. 1908.
- [8] BINE, “Fernwärme-Dampfnetze auf Heißwasser umstellen,” 2014. [Online]. Available: <http://www.bine.info/service/veranstaltungen/veranstaltungshinweise/verknuepfte-inhalte/?artikel=256&typ=32>.
- [9] H. Li and S. Svendsen, “Energy and exergy analysis of low temperature district heating network,” *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 237–246, Sep. 2012.
- [10] P. S. Svendsen, “Performance of Low - Temperature District Heating Systems for Low - Energy Houses,” no. October, 2010.
- [11] K. Hakansson and F. W. Lohmann, *Handbuch der Fernwärme Praxis*, 2. Auflage. Essen: Vulkan, 1982, p. 863.
- [12] Voigt+WippIndustrialResearch, “bioEPCS Bericht Kick-off Meeting,” 2013.
- [13] Isoplus(R), “Starre Verbundsysteme.” p. 62, 2012.
- [14] A. Gassel, “Beiträge zur Berechnung solarthermischer und energieeffizienter Energiesysteme,” Technische Universität Dresden, 1996.
- [15] Bosy-Online, “Differenzdruckregler - Fernheizung,” 2014.
- [16] MathWorks, “Simscape Reference 3.” Natick, p. 465, 2010.
- [17] MathWorks, “Simscape Language Guide R 2013 b.” Natick, p. 251, 2013.
- [18] L. Arvastson, “Stochastic modelling and operational optimization in district-heating systems,” Lund, Sweden, 2001.

- [19] E. Dotzauer, "Simple model for prediction of loads in district-heating systems," *Appl. Energy*, vol. 73, no. 3–4, pp. 277–284, Nov. 2002.
- [20] A. Loewen, *Entwicklung eines Verfahrens zur Aggregation komplexer Fernwärmenetze*. Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT, 2001, p. 174.
- [21] H. Zhao, "Analysis, modelling and operational optimization of district heating systems," Denmark's Tekniske Univ., Lyngby, Denmark, 1995.
- [22] B. Bøhm, "Energy-economic Operation of Existing Distric Heating Networks," *Energy Res. Progr. Danish Minist. Energy*, vol. Report no., 1981.
- [23] H. V Larsen, B. Bøhm, and H. F. Ravn, "Equivalent Models for District Heating Systems," *Proc. 7th Int. Symp. Dist. Heat. Cool. Lund, Sweden*, no. 1323, 1999.

10. Anhang A

Tabelle A-1: Tagesenergieentnahmen Verbraucher Netz Großarl nach Clustern und Nummern nach Netz-Plan

Cluster	VB #	VB # lt. Plan	Tagesenergieentnahmen [kWh]											
			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
T01	1	141	1429,68	1164,25	1077,84	292,37	151,71	393,03	300,23	345,23	372,03	467,84	238,87	1083,81
T01	2	140	385,61	292,71	290,65	100,13	86,32	59,27	50,55	54,55	52,33	116,87	189,07	289,58
T01	3	142	377,39	509,04	408,84	93,53	57,94	36,50	77,23	76,45	103,60	124,68	149,90	568,06
T01	4	187	224,16	212,39	178,90	48,10	26,55	24,93	20,10	29,32	24,73	43,39	48,80	204,84
T01	5	165	490,94	410,14	377,87	114,63	91,74	72,17	71,19	71,87	82,50	108,29	136,70	442,42
T01	6	143	325,84	267,43	237,68	98,47	36,71	50,93	28,13	31,61	23,47	97,16	118,80	245,29
T01	7	144	384,06	285,32	261,10	137,67	68,65	90,87	22,19	26,77	40,40	163,06	210,90	334,71
T01	8	145	452,90	390,71	363,55	103,33	34,84	43,33	46,77	44,52	45,00	72,90	99,33	335,16
T01	9	216	147,32	105,00	85,16	8,23	8,90	9,87	7,00	8,42	7,80	15,68	64,77	106,16
T01	10	252	119,26	99,75	91,23	33,77	15,90	17,67	14,84	14,19	13,77	20,68	70,27	97,03
T01	11	271	600,74	449,71	424,71	249,97	167,26	136,90	70,26	83,39	123,37	272,23	409,13	523,74
T01	12	266	322,97	268,21	246,55	40,33	29,55	38,87	32,94	72,00	61,03	108,52	277,43	303,77
T01	13	255	126,65	92,46	76,52	39,17	25,42	18,37	5,45	6,84	15,03	53,77	72,33	110,19
T01	14	193	101,00	79,39	67,10	23,03	15,58	25,87	9,42	5,35	8,43	26,03	42,70	75,61
T01	15	221	99,19	76,54	67,32	31,87	9,84	6,40	10,03	7,74	7,33	22,19	57,20	88,10
T01	16	214	285,29	218,68	205,90	63,33	10,00	10,00	120,26	27,90	36,10	105,58	100,40	239,90
T01	17	186	256,06	229,89	203,06	35,93	11,45	13,43	10,45	8,90	8,07	14,32	47,80	150,65
T02	1	135	284,35	234,64	233,13	116,30	63,39	51,27	29,35	30,48	38,60	93,77	97,07	202,87
T02	2	136	222,74	169,50	156,52	52,20	26,39	27,50	17,81	18,84	18,50	49,19	43,10	135,42
T02	3	138	146,16	125,54	98,19	26,87	16,32	16,10	10,42	11,29	8,87	24,26	84,53	135,68
T02	4	137	876,68	711,93	625,06	207,07	112,06	195,07	155,35	154,58	196,97	238,65	224,30	583,00
T02	5	215	793,87	677,86	624,52	176,33	116,45	140,67	97,10	127,74	146,67	155,48	226,00	705,16

T02	6	146	228,48	198,14	202,77	99,67	64,77	63,80	33,61	30,35	31,77	130,61	129,10	220,81
T02	7	147	170,97	137,93	124,42	36,00	16,58	17,07	20,03	18,94	14,20	44,35	68,60	153,42
T02	8	183	121,77	102,14	90,65	45,63	25,13	27,67	19,94	18,35	17,10	51,23	63,17	110,58
T02	9	158	222,06	186,18	170,68	69,83	36,94	31,77	15,71	28,77	31,57	89,06	102,10	178,94
T02	10	184	260,68	219,68	195,94	82,60	34,42	24,70	21,00	22,39	17,90	103,58	118,77	201,58
T02	11	139	450,03	382,82	344,42	119,13	42,84	38,60	14,16	16,35	29,70	24,19	121,40	301,61
T02	12	270	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	29,35	11,40	32,00	10,00	10,00
T02	13	127a	600,74	449,71	424,71	249,97	167,26	136,90	70,26	83,39	123,37	272,23	409,13	523,74
T03	1	118	58,26	46,36	34,35	12,00	2,42	3,47	10,00	10,00	3,60	14,71	29,67	51,84
T03	2	119	98,06	75,96	77,87	56,20	28,48	30,10	6,35	6,39	6,37	42,87	72,73	95,52
T03	3	120	194,61	146,57	145,94	95,30	74,71	68,60	40,87	44,42	55,00	122,26	115,43	161,55
T03	4	124	138,45	108,50	101,71	60,63	37,84	29,03	11,87	14,42	22,00	66,84	76,47	121,39
T03	5	125	283,87	209,25	213,48	68,00	29,39	23,57	13,42	12,71	23,53	101,00	145,60	222,16
T03	6	224	185,74	142,75	145,87	46,03	36,19	31,57	9,06	15,42	13,00	49,03	62,63	161,74
T03	7	254	81,29	65,61	62,61	31,87	19,87	14,67	13,13	9,74	6,73	12,84	30,03	63,23
T03	8	126	2363,23	1991,43	1924,52	649,67	291,94	482,67	446,45	524,19	566,67	1427,10	623,67	2095,48
T03	9	175	88,84	74,86	66,10	33,77	7,68	9,63	3,65	4,23	7,80	46,94	47,13	70,26
T03	10	163	253,87	208,93	225,81	141,33	122,90	148,00	146,77	148,06	108,00	182,58	125,00	176,77
T03	11	127,128,129	503,48	439,82	416,45	173,70	61,90	50,20	4,81	4,71	18,53	157,52	255,33	382,06
T03	12	130	3243,55	2573,21	2490,32	1190,67	872,58	1051,33	551,94	652,90	920,67	1502,26	1279,33	2527,42
T03	13	131	441,84	351,00	331,90	121,40	48,19	52,90	19,58	26,29	60,37	171,87	199,07	363,65
T03	14	133	327,55	275,36	232,13	50,67	34,03	40,33	17,77	21,32	28,50	75,42	74,50	215,77
T03	15	134alt	2878,81	5684,18	3728,39	2502,00	2018,06	1887,67	1362,90	1237,42	1423,33	3468,39	3081,00	3890,65
T03	16	134neu	2878,81	5684,18	3728,39	2502,00	2018,06	1887,67	1362,90	1237,42	1423,33	3468,39	3081,00	3890,65
T04	1	222	234,35	177,46	144,26	82,97	49,90	41,10	18,10	21,35	31,70	107,06	148,83	209,32
T04	2	114,253	131,77	112,79	94,97	46,17	11,81	17,87	8,45	9,71	11,10	21,23	67,20	116,77
T04	3	115,116	255,81	221,18	204,45	102,13	59,94	53,40	25,16	12,39	42,70	137,06	208,23	273,13
T04	4	117	172,10	166,36	154,52	96,80	34,65	32,80	27,00	31,90	26,97	65,32	35,40	123,10
T04	5	196, 200	161,97	128,79	113,19	66,73	44,65	30,87	9,58	12,26	27,70	87,81	110,20	145,90
T04	6	153	79,52	58,07	58,45	27,20	14,45	11,53	3,19	0,23	9,37	27,35	42,87	58,52

T04	7	210, 211	1796,97	1430,46	1299,74	789,37	561,23	487,37	223,00	239,87	384,13	1016,61	1095,23	1440,48
T04	8	171	99,55	85,82	74,97	43,07	22,58	25,07	14,45	14,06	18,07	45,65	61,87	77,74
T04	9	123	313,55	250,89	212,55	64,77	1,65	6,93	0,48	4,06	7,53	52,29	117,93	228,87
T04	10	173	294,32	230,96	195,84	15,43	7,42	8,37	0,55	7,00	10,73	4,87	74,67	245,58
T04	11	260	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
T04	12	172	62,71	49,89	45,52	28,33	6,84	7,10	6,00	5,52	4,53	10,13	34,60	53,52
T04	13	238	240,32	182,25	184,65	114,43	88,71	58,23	16,42	26,48	56,60	183,48	174,73	181,77
T04	14	122	190,97	138,86	131,65	64,37	39,65	42,17	30,19	30,39	28,77	75,68	91,67	134,81
T04	15	121	155,74	114,00	113,90	53,57	39,84	30,77	18,61	19,97	21,30	68,52	77,70	133,10
T05	1	32	68,58	48,54	43,74	26,20	19,52	16,47	10,45	10,55	14,07	32,65	35,80	52,29
T05	2	103, 104	122,97	84,75	86,32	81,70	39,81	27,53	20,42	18,65	43,17	103,35	102,13	136,39
T05	3	107	95,84	93,11	79,19	30,50	16,32	17,03	14,00	12,81	15,63	36,48	35,83	81,06
T05	4	105	301,06	256,29	240,06	61,63	102,26	86,70	28,65	36,61	60,87	159,16	47,93	223,39
T05	5	106	137,52	107,64	104,23	59,17	28,48	26,63	16,55	15,45	13,37	66,58	69,77	118,45
T05	6	17, 108-112	144,26	115,82	97,13	45,63	8,81	5,40	10,00	10,00	10,00	24,94	58,47	119,52
T05	7	276, 269	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	265,74	156,37	173,39	150,00	150,00
T05	8	217	140,61	115,61	105,94	25,00	8,48	9,17	6,97	6,48	6,47	6,68	23,57	134,65
T05	9	179	180,65	151,93	324,26	160,73	75,55	74,17	91,26	113,19	41,87	12,65	66,43	134,00
T05	10	64	151,26	130,18	109,61	40,90	29,55	31,23	23,32	22,13	23,80	46,35	58,97	91,58
T05	11	162	315,58	245,25	229,16	130,53	74,71	68,30	37,55	36,45	48,00	146,45	147,13	266,45
T05	12	113	214,68	178,86	169,77	57,83	25,35	29,13	14,32	13,26	31,17	86,03	119,13	185,26
T05	13	198	137,26	109,79	111,94	65,00	25,55	5,63	6,00	8,23	8,00	71,55	87,83	124,68
T05	14	235	189,58	154,36	135,81	38,00	19,94	20,80	23,26	23,00	16,97	28,55	65,00	125,68
T05	15	188	131,48	94,68	100,00	53,57	15,03	8,77	7,55	7,39	8,03	14,16	28,43	110,65
T05	16	177, 178	133,00	109,86	104,58	61,37	42,26	33,40	13,35	16,48	30,27	75,16	91,77	118,68
T05	17	263	2601,94	2698,57	2366,45	749,33	1080,00	1143,00	869,68	999,03	1045,00	2151,61	1555,33	2482,58
T05	18	132	5202,58	5224,64	4987,10	1848,33	2494,19	2488,00	1762,26	1866,45	1840,67	3926,45	3936,00	4954,84
T06	1	92	190,00	4775,71	904,39	278,80	125,81	117,33	80,32	61,61	76,00	407,74	74,00	180,65
T06	2	95	62,97	53,89	47,81	25,07	9,77	10,63	9,74	9,23	7,83	13,97	40,10	63,71
T06	3	96	106,26	84,61	76,58	48,20	24,90	17,67	7,16	7,19	9,47	43,61	73,03	97,13

T06	4	152	136,84	107,36	99,32	37,67	19,81	20,73	17,19	16,55	15,07	28,87	76,40	116,81
T06	5	250	56,23	52,54	39,26	8,60	1,94	2,50	2,13	1,61	1,53	3,74	8,67	59,81
T06	6	97	218,32	144,64	179,39	33,43	10,45	13,80	14,13	12,97	10,30	18,65	13,90	114,97
T06	7	278	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
T06	8	174	1560,97	1230,00	1330,65	212,33	70,00	625,67	466,77	530,97	457,00	387,10	211,67	1278,71
T06	9	239	128,61	97,43	91,74	50,13	34,87	25,03	9,39	6,42	18,60	59,68	72,60	114,65
T06	10	15	153,68	105,96	121,90	73,43	14,65	10,00	10,00	10,00	26,63	69,84	131,87	131,61
T06	11	98	131,00	122,32	96,61	17,77	10,16	11,07	9,32	10,81	8,43	21,19	55,53	112,81
T06	12	99	224,97	170,79	158,55	84,83	59,58	59,53	37,77	34,13	40,40	91,16	115,00	167,13
T06	13	100	174,81	131,18	126,77	78,77	47,61	37,87	21,13	24,00	36,10	100,13	105,00	149,03
T06	14	101	641,29	179,64	702,90	1047,67	357,42	670,00	315,81	74,52	486,33	2464,52	781,00	611,29
T06	15	101a	4100,00	4107,14	3270,97	1546,67	816,13	920,00	496,77	541,94	393,33	190,32	2960,00	3812,90
T06	16	195	85,19	64,29	57,74	28,57	19,90	19,87	16,32	16,19	13,70	37,10	50,53	74,45
T06	17	251	72,42	55,25	39,87	20,63	10,71	10,23	5,03	4,58	4,30	23,52	40,63	66,35
T06	18	240	404,87	312,89	298,42	114,27	66,58	58,17	23,00	29,39	64,20	152,77	182,10	341,65
T06	19	241	180,58	143,11	125,32	63,20	24,71	43,50	23,03	12,81	21,33	31,29	10,00	64,87
T06	20	249	287,81	249,32	215,10	23,10	10,00	22,23	25,90	22,71	23,50	11,42	33,20	228,32
T06	21	248	183,39	153,79	144,35	81,67	36,71	41,53	25,16	24,77	38,60	115,16	119,53	162,19
T06	22	247	180,52	155,75	149,32	78,50	53,32	38,50	21,00	20,45	28,00	92,35	111,77	162,42
T06	23	242-246	868,61	690,89	619,90	239,83	152,48	123,47	74,71	95,58	115,07	281,19	319,30	687,58
T07	1	176	1140,32	908,21	924,52	295,33	243,23	308,67	196,77	208,39	231,00	352,58	394,33	1033,55
T07	2	264	53,71	49,00	39,74	28,73	20,16	22,77	15,81	14,94	19,93	51,84	34,47	48,77
T07	3	77	176,03	141,75	117,35	64,87	46,10	38,20	7,32	9,13	25,27	63,77	100,63	149,29
T07	4	78	272,32	232,50	200,10	113,90	81,42	60,13	17,52	16,55	44,40	145,58	150,80	215,26
T07	5	85	511,00	427,04	356,26	186,53	76,06	66,83	16,61	10,90	21,67	203,48	254,83	440,52
T07	6	79	655,29	503,79	462,94	117,23	41,19	48,70	27,87	35,42	73,37	114,16	259,03	527,90
T07	7	50	134,32	104,96	105,71	71,73	50,52	42,53	18,26	21,06	32,67	81,61	85,00	113,13
T07	8	80, 81	486,68	380,00	374,32	249,10	157,19	68,37	25,16	28,68	76,80	253,16	313,57	424,71
T07	9	151	251,48	193,57	154,29	79,93	40,52	43,70	31,84	33,13	28,33	97,97	134,80	207,84
T07	10	82	515,26	370,21	186,06	70,90	23,65	23,87	18,90	18,81	18,47	56,68	133,97	456,71

T07	11	83	283,74	225,79	219,61	86,47	36,23	59,40	40,58	36,45	38,13	130,03	75,07	225,52
T07	12	84	55,26	39,21	32,90	14,57	7,32	7,10	6,39	5,68	4,70	19,29	31,47	44,42
T07	13	155	207,03	175,71	164,39	51,73	21,39	38,23	20,06	25,52	30,50	91,52	103,53	169,42
T07	14	199	13,87	12,25	5,90	3,63	2,61	3,07	1,42	2,29	1,40	3,32	5,30	9,61
T07	15	234	1307,74	983,21	976,77	526,67	299,03	287,33	140,97	137,10	232,93	599,97	795,67	1194,19
T07	16	48, 87	964,16	747,43	683,90	336,63	206,90	209,60	141,81	132,03	170,33	599,23	618,67	792,87
T07	17	86	123,84	98,07	86,26	52,07	34,97	33,93	15,06	19,48	28,03	64,97	61,60	109,39
T07	18	88	129,39	100,25	86,77	40,60	24,74	16,60	4,39	3,19	11,63	8,74	42,20	104,48
T07	19	89	144,39	137,29	129,16	90,17	47,39	44,23	23,52	13,39	20,97	65,26	65,10	142,45
T07	20	90	169,39	129,25	110,61	63,10	32,71	27,83	21,77	22,23	20,80	49,42	55,57	127,61
T07	21	267	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	616,39	15,43	30,84	10,00	10,00
T07	22	218	140,71	110,36	103,19	66,67	34,10	28,53	15,65	14,03	26,67	84,97	76,40	119,87
T07	23	91	1430,00	1171,43	1088,39	226,67	106,13	253,00	150,32	153,87	224,00	338,39	377,00	1108,39
T07	24	228	105,35	82,68	76,03	41,83	24,32	19,97	9,87	9,94	18,67	59,19	49,67	84,61
T07	25	213	30,74	26,50	21,94	14,33	2,97	3,60	2,26	10,00	10,00	63,87	17,63	22,68
T07	26	170, 159	390,42	304,93	280,52	94,80	98,65	92,23	38,13	39,45	63,57	209,35	182,27	349,90
T07	27	94	406,35	298,21	342,35	205,00	126,42	111,30	58,29	66,58	90,73	224,81	236,93	333,32
T08	1	52	163,39	142,86	132,84	68,93	39,06	35,50	19,45	20,35	25,30	90,19	105,53	141,97
T08	2	53	185,52	203,36	162,81	64,73	45,74	35,90	12,00	16,10	27,73	92,68	112,80	162,61
T08	3	54	139,94	116,86	99,74	63,17	44,84	39,30	21,61	20,61	31,77	89,42	92,93	114,39
T08	4	102	111,03	93,04	76,42	37,63	13,32	16,90	8,97	3,90	7,30	35,06	71,63	98,52
T08	5	268	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	579,68	56,67	483,87	10,00	10,00
T08	6	55	1964,84	1522,86	1313,55	800,67	383,55	256,33	87,42	89,35	240,00	994,19	1336,67	1634,19
T08	7	229, 169	105,71	63,29	63,90	32,00	17,65	13,83	3,19	2,74	4,77	52,29	52,57	109,87
T08	8	57, 206	87,87	79,82	67,26	40,80	21,23	19,33	12,32	10,61	13,67	40,23	55,20	74,52
T08	9	60	793,65	649,11	559,42	218,43	123,94	139,33	73,35	66,39	152,70	283,94	384,30	657,00
T08	10	59	260,16	214,57	202,74	125,37	76,39	64,97	32,39	37,61	51,40	136,26	173,07	227,61
T08	11	208, 58	93,81	75,68	67,16	41,53	16,61	21,20	13,90	11,45	12,07	33,94	58,83	82,26
T08	12	70	81,94	66,32	55,65	28,70	10,55	11,53	9,45	8,55	11,77	43,81	54,73	71,84
T08	13	68	116,23	102,21	85,74	45,83	27,42	16,43	0,61	1,52	18,57	61,65	77,13	104,26

T08	14	71	91,81	77,36	70,77	38,07	18,94	16,30	10,39	10,03	8,47	50,16	60,57	86,32
T08	15	72	529,35	443,57	402,26	196,00	134,19	111,67	72,26	35,58	7,73	19,90	225,33	430,65
T08	16	66, 67	58,26	55,96	38,42	16,23	16,65	19,50	6,84	4,58	7,60	20,16	33,00	55,00
T08	17	73, 197	363,16	300,39	275,61	145,97	90,42	68,50	10,35	6,35	49,53	190,16	233,60	326,39
T08	18	148	210,97	177,04	176,35	114,43	77,97	54,33	17,77	16,42	45,57	138,00	150,13	161,06
T08	19	74	260,32	243,14	246,58	82,63	30,94	26,13	21,26	33,42	30,43	49,26	99,07	236,29
T08	20	75, 76	324,19	272,04	244,32	67,53	21,06	26,93	18,97	19,16	15,60	26,68	114,40	280,13
T08	21	56	2266,77	1848,57	1510,97	846,33	407,10	406,67	85,81	84,52	246,00	974,19	1540,67	1911,61
T08	22	62	465,16	431,79	371,29	183,00	143,23	133,00	84,84	83,87	74,33	220,00	230,67	378,39
T08	23	209	524,87	411,43	346,90	78,97	45,90	57,97	4,26	18,55	41,73	61,23	2,03	400,45
T08	24	281	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
T08	25	280	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
T08	26	61	1192,58	999,64	967,74	515,00	258,71	365,00	228,39	163,16	25,17	66,81	740,33	1039,03
T08	27	69	1757,10	1432,50	1433,23	1046,67	869,03	801,00	475,16	553,23	690,33	1458,06	1373,67	1527,10
T08	28	190, 191	710,23	593,14	515,65	320,33	215,29	175,30	89,48	29,81	147,63	379,06	442,33	666,61
T09	1	46	479,19	370,39	272,00	145,90	87,29	67,53	38,48	39,39	49,57	209,77	226,00	373,13
T09	2	47	166,35	139,79	130,87	90,37	69,23	49,40	0,90	14,39	45,47	119,58	120,37	150,42
T09	3	40	1585,16	1777,86	1626,13	555,70	767,71	760,33	587,10	531,61	500,33	1152,26	593,67	1640,65
T09	4	38, 39	116,68	97,32	100,00	65,77	34,10	45,13	24,81	23,48	22,10	68,23	84,67	103,10
T09	5	41	189,00	168,82	136,32	71,73	47,32	40,37	19,35	20,13	36,83	137,81	133,17	170,65
T09	6	42	180,58	154,64	140,16	66,07	47,16	38,97	17,90	21,84	36,07	102,52	89,50	155,84
T09	7	43	185,32	152,00	136,03	76,73	48,65	40,23	9,74	12,81	35,10	112,06	129,53	160,42
T09	8	233, 45	310,71	261,64	232,52	133,00	96,74	89,37	42,23	41,55	62,13	163,32	214,03	285,71
T09	9	154	167,58	139,89	124,74	67,87	35,94	37,40	17,10	16,87	23,20	93,87	123,93	147,48
T09	10	44	188,00	161,50	149,13	86,37	29,77	0,57	0,35	0,06	10,00	65,06	142,07	173,97
T09	11	185	167,77	149,64	105,74	18,43	4,00	19,97	0,52	10,00	16,00	23,58	41,60	140,45
T09	12	40	1586,16	1778,86	1627,13	556,70	768,71	761,33	588,10	532,61	501,33	1153,26	594,67	1641,65
T09	13	49	401,77	305,07	319,13	158,93	41,97	74,60	59,87	62,16	60,40	201,42	304,03	341,55
T09	14	161, 48	647,10	512,14	449,35	215,00	136,77	155,67	124,19	115,16	111,67	380,00	381,33	514,84
T09	15	168	993,55	284,64	740,32	450,67	293,87	288,67	199,68	191,29	181,47	56,00	658,00	854,19

T10	1	231	275,10	235,89	238,90	66,67	67,58	72,27	70,52	36,55	44,73	70,55	118,10	261,45
T10	2	16	97,65	87,54	76,00	18,47	0,35	0,20	0,45	2,90	2,17	5,68	35,50	67,10
T10	3	18	129,61	108,79	88,65	36,80	14,39	9,93	1,68	1,65	10,47	38,42	67,80	113,68
T10	4	19	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
T10	5	156	113,35	98,61	102,06	10,97	3,48	3,77	3,03	2,19	3,20	40,42	13,20	69,65
T10	6	150, 207	87,84	76,64	52,48	76,30	50,87	34,43	18,71	20,06	24,50	69,90	86,93	117,10
T10	7	20	195,65	186,61	151,42	21,20	17,74	21,07	23,87	25,81	13,27	21,23	19,67	124,55
T10	8	21	150,26	124,18	115,84	85,77	26,16	22,30	8,87	8,94	24,23	101,81	113,37	122,16
T10	9	22, 164	144,84	124,11	94,90	49,30	27,52	28,50	19,94	19,26	23,10	56,77	94,80	126,61
T10	10	23	117,48	91,18	82,16	45,90	5,90	7,37	4,23	4,10	3,30	16,29	71,40	105,03
T10	11	24	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
T10	12	201	112,77	95,75	96,61	45,60	14,61	15,27	0,58	0,26	4,47	56,10	82,67	104,00
T10	13	237	122,39	110,18	87,26	47,87	18,77	19,27	11,48	10,13	8,93	44,26	67,33	91,39
T10	14	202	121,48	102,14	92,65	46,30	13,81	17,23	12,58	11,39	10,93	19,74	80,37	110,58
T10	15	203	137,90	101,07	105,52	62,27	41,35	26,60	14,58	12,65	23,17	43,71	83,40	106,90
T10	16	205	240,87	213,04	181,48	53,57	34,55	45,07	47,48	48,52	33,73	55,19	47,07	166,16
T10	17	25	391,55	327,18	246,55	122,97	102,68	65,50	55,45	64,71	77,67	143,10	102,07	275,84
T10	18	204	270,16	215,71	178,77	91,77	13,48	12,87	11,19	8,45	8,87	73,23	176,87	242,39
T10	19	37	377,10	351,46	270,23	115,30	36,16	36,33	12,55	11,39	23,80	149,97	200,57	339,48
T10	20	26	1045,16	875,71	779,35	406,33	142,90	149,33	117,74	98,13	15,60	75,81	729,67	942,26
T10	21	27	5,16	3,61	1,48	1,07	1,39	1,73	1,35	1,97	1,67	13,13	0,43	5,42
T10	22	30	625,61	573,82	486,35	182,80	120,68	159,83	128,42	98,87	91,63	242,71	305,40	540,42
T10	23	28	85,74	2,82	126,16	53,90	5,52	2,40	3,55	0,74	1,73	54,00	119,37	214,68
T10	24	223	197,55	151,18	140,81	57,13	25,77	30,93	22,13	24,42	21,97	41,68	71,83	138,77
T10	25	33, 34, 35	742,58	620,57	544,55	309,53	202,74	173,83	111,42	106,26	127,80	354,65	501,93	663,45
T10	26	29	118,90	101,54	70,00	24,40	13,74	14,43	12,19	12,06	10,43	21,48	47,27	100,29
T10	27	232	169,29	136,21	136,48	76,97	28,48	37,67	21,35	20,87	17,57	52,10	102,60	134,55
T10	28	36	816,81	673,96	538,61	206,33	1,29	0,50	10,00	10,00	0,07	171,29	334,63	621,45
T10	29	31, 149	106,55	61,25	38,35	9,97	3,13	1,37	0,16	0,16	0,27	7,58	33,70	64,13
T11	1	192	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	6,65	50,93	168,84	10,00	10,00

T12	17	286	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
T13	1	51	143,19	121,32	106,97	64,83	43,23	34,27	23,94	22,23	18,93	72,29	78,53	105,00

Tabelle A-2: Rohrgeometrien Netz Großarl

Knoten		Rohr		Krümmer		
		Länge [m]	Rohr-Dn [mm]	45 [-]	90 [-]	Zeta
K1	AB2	68,24	25	0	1	2,25
K1	AB3	10,24	25	0	0	1
K2	K1	41,29	32	0	2	3,5
K2	AB95	4,82	25	0	0	1
K3	AB1	7,47	80	0	1	2,25
K3	K2	102,35	40	0	2	3,5
HW	K3	29,66	80	0	2	3,5
HW	K4	2,88	200	0	0	1
K4	AB45	60,74	65	0	0	1
K4	K5	73,97	200	0	1	2,25
K5	AB245	8,36	125	0	0	1
K5	K6	62,4	200	2	1	3,05
K6	K7	38,32	65	0	2	3,5
K7	AB4	1,98	32	0	0	1
K7	K8	8,05	65	0	0	1
K8	AB5	2,51	32	0	0	1
K8	AB6	15,73	65	0	1	2,25
K9	AB6	1,99	25	0	0	1
K6	K10	45,01	200	0	0	1
K10	AB7	7,58	32	0	0	1
K10	K11	46,93	200	0	0	1
K11	AB232	19,52	32	0	0	1
K11	K12	99,94	200	0	0	1

K12	K13	42,93	65	0	3	4,75
K13	AB229	36,97	32	0	0	1
K13	K14	47,62	65	0	0	1
K14	AB243	32,08	65	0	2	3,5
K14	K15	35,31	32	0	0	1
K15	AB230	2,08	32	0	0	1
K15	AB238	55,21	32	0	0	1
K12	K16	51,34	200	0	0	1
K16	AB244	6,74	32	0	0	1
K16	K17	14,27	200	0	0	1
K17	K18	4,79	50	0	0	1
K18	AB228	43,45	50	0	2	3,5
K18	K19	49,54	32	0	0	1
K19	AB227	10,74	25	0	0	1
K20	AB226	11,27	25	0	0	1
K20	AB242	33,33	25	0	1	2,25
K20a	K21	194,98	200	0	0	1
K21	K22	55,38	80	0	0	1
K22	K23	13,59	32	0	0	1
K23	AB212	3,24	25	0	0	1
K23	AB211	26,03	25	0	3	4,75
K22	K24	50,9	80	0	1	2,25
K24	AB213	16,56	25	0	0	1
K24	K25	12,15	80	0	0	1
K25	AB225	45,07	32	0	1	2,25
K25	K26	14,07	80	0	0	1
K26	AB214	11,84	25	0	0	1
K26	K29	2,33	80	0	0	1
K29	K27	269,97	32	1	4	6,4

K27	AB224	11,96	25	0	0	1
K27	K28	14,11	32	0	0	1
K28	AB241	13,38	25	0	0	1
K28	AB223	39,07	25	0	2	3,5
K29	K30	48,57	80	0	1	2,25
K30	AB215	6,13	25	0	1	2,25
K30	K31	1,54	80	0	0	1
K31	AB221	4,35	32	0	0	1
K31	K32	12,6	80	0	0	1
K32	AB220	50,09	50	0	3	4,75
K32	K33	33,4	50	0	0	1
K33	AB219	40,28	32	0	2	3,5
K33	K34	10,33	40	0	0	1
K34	AB216	2,3	25	0	0	1
K34	K35	19,39	40	0	0	1
K35	AB218	31,67	25	0	2	3,5
K35	AB217	30,34	25	0	1	2,25
K21	K36	64,5	200	0	0	1
K36	AB9	69,31	25	0	6	8,5
K36	K37	30,08	200	0	0	1
K37	K38	28,58	25	0	2	3,5
K38	AB210	17,52	25	0	2	3,5
K38	AB209	1,76	25	0	0	1
K37	K39	32,26	200	1	0	1,4
K39	K40	13,16	32	0	1	2,25
K40	AB208	11,62	25	0	2	3,5
K40	K41	26,32	32	0	0	1
K41	AB207	3,86	25	0	0	1
K41	AB206	9,03	25	0	1	2,25

K39	K42	16,68	200	0	0	1
K42	K43	15,28	25	0	0	1
K43	AB10	9,35	25	0	1	2,25
K43	AB11	5,28	25	0	1	2,25
K42	K44	34,34	200	0	0	1
K44	AB12	19,69	32	0	2	3,5
K44	K45	53,11	200	0	0	1
K45	K46	13,38	32	0	0	1
K46	AB14	2,18	25	0	0	1
K46	AB13	11,28	25	0	1	2,25
K45	K47	40,65	200	0	0	1
K47	K48	30,03	65	0	0	1
K48	AB18	9,89	25	0	1	2,25
K48	K49	4,65	50	0	0	1
K49	AB15	10,53	25	0	1	2,25
K49	K50	9,15	32	0	0	1
K50	AB17	5,65	25	0	0	1
K50	AB16	24,41	25	0	1	2,25
K47	K51	74,12	200	0	0	1
K51	AB205	68,98	25	2	2	4,3
K51	K52	45,9	200	0	0	1
K52	K53	7,4	65	0	0	1
K53	AB19	11,61	32	0	2	3,5
K53	K54	67,47	50	1	0	1,4
K54	AB21	5,43	25	0	0	1
K54	AB20	32,01	32	0	1	2,25
K52	K55	37,41	200	0	0	1
K55	AB204	6,48	50	0	0	1
K55	K56	28,26	200	0	0	1
K56	AB203	6,73	25	0	0	1

K56	K57	39,27	200	1	0	1,4
K57	K58	13,53	40	0	0	1
K58	AB200	11,92	32	0	0	1
K58	K59	8,36	32	0	1	2,25
K59	AB202	3,27	25	0	0	1
K59	AB201	38,37	25	0	2	3,5
K57	K60	49,88	200	0	0	1
K60	K61	18,62	65	0	0	1
K61	AB197	5,31	50	0	0	1
K61	K62	25,35	50	1	0	1,4
K62	AB198	8,76	25	0	2	3,5
K62	AB199	8,28	25	0	1	2,25
K60	K63	23,64	200	0	0	1
K63	K64	14,32	50	0	1	2,25
K64	AB23	2,2	32	0	0	1
K64	AB22	31,16	25	0	1	2,25
K63	K65	13,23	200	0	0	1
K65	K66	10,18	100	0	0	1
K66	K67	73,95	65	0	3	4,75
K67	AB34	8,13	32	0	1	2,25
K67	AB33	32,39	32	0	2	3,5
K66	K68	36,69	100	0	0	1
K68	AB32	3,13	65	0	0	1
K68	K69	1,35	100	0	0	1
K69	AB24	5,86	40	0	0	1
K69	K70	25,3	100	0	0	1
K70	AB25	17,03	32	0	1	2,25
K70	K71	31,08	65	0	0	1
K71	AB26	6,48	25	0	0	1
K71	K72	18,77	65	0	0	1

K72	AB27	3,66	32	0	0	1
K72	K73	13,24	65	0	0	1
K73	K74	16,59	50	0	2	3,5
K74	AB30	11,47	32	0	2	3,5
K74	AB31	76,61	32	2	2	4,3
K73	K75	33,95	32	0	0	1
K75	AB28	28,32	32	0	4	6
K75	AB29	24,37	25	0	2	3,5
K65	K76	47,11	200	0	2	3,5
K76	AB35	8,06	50	0	0	1
K76	K77	4,13	200	0	0	1
K77	K78	2,56	50	0	1	2,25
K78	AB36	25,35	50	0	1	2,25
K78	AB37	8,16	50	0	1	2,25
K77	K79	25,3	200	0	0	1
K79	AB196	7,65	50	0	0	1
K79	K80	12,02	200	0	0	1
K80	K81	30,25	125	0	0	1
K81	K82	12,67	32	0	0	1
K82	AB167	2,15	25	0	0	1
K82	AB168	17,5	25	0	1	2,25
K81	K83	10,92	125	0	0	1
K83	K84	23,49	32	0	2	3,5
K84	AB169	5,77	25	0	1	2,25
K84	AB170	15,43	25	0	2	3,5
K83	K85	23,41	125	0	0	1
K85	K86	2,48	80	0	0	1
K86	AB194	24,83	80	0	1	2,25
K86	AB195	22,31	40	0	2	3,5
K85	K87	41,73	100	0	0	1

K87	K88	8,75	25	0	1	2,25
K88	AB172	3,96	25	0	0	1
K88	AB171	45,23	25	2	0	1,8
K87	K89	33,77	100	0	0	1
K89	K90	10,64	100	0	0	1
K90	AB193	17,29	65	0	0	1
K90	K91	4,98	80	0	0	1
K91	K92	133,94	65	0	5	7,25
K92	AB192	16,42	40	0	0	1
K92	K93	35,2	50	0	0	1
K93	K94	20,08	40	0	0	1
K94	AB191	5,68	25	0	0	1
K94	AB190	3,21	25	0	0	1
K93	AB189	50,42	25	0	2	3,5
K91	K95	21,69	80	0	0	1
K95	AB188	16,53	65	0	0	1
K95	K96	92,88	65	0	1	2,25
K96	AB187	32,27	32	0	3	4,75
K96	AB186	25,85	50	0	1	2,25
K89	K97	13,29	65	0	1	2,25
K97	AB185	8,34	50	0	0	1
K97	K98	16,47	65	0	2	3,5
K98	K99	6,54	40	0	0	1
K99	AB173	17,41	25	0	1	2,25
K99	AB174	33,81	32	0	2	3,5
K98	K100	43,72	65	0	0	1
K100	K101	4,84	32	0	0	1
K101	AB177	8,58	25	0	0	1
K101	K102	4,89	25	0	0	1
K102	AB176	3,91	25	0	0	1

K102	AB175	11,13	25	0	1	2,25
K100	K103	8,6	65	0	0	1
K103	AB178	40,21	32	0	2	3,5
K103	K104	3,68	32	0	0	1
K104	AB184	12,67	32	0	0	1
K104	K105	37,67	50	0	0	1
K105	AB179	8,87	32	0	1	2,25
K105	AB183	64,17	32	0	3	4,75
K105	K106	32,05	32	0	0	1
K106	AB180	14,82	25	0	0	1
K106	K107	33,16	32	0	0	1
K107	AB181	37,15	32	0	2	3,5
K107	AB182	31,19	25	0	1	2,25
K80	K108	34,94	150	0	2	3,5
K108	AB166	3,44	32	0	0	1
K108	K109	30,23	150	0	0	1
K109	K110	33,16	125	0	0	1
K110	AB165	7,6	32	0	0	1
K110	K111	22,71	125	0	0	1
K111	AB105	55,65	25	0	2	3,5
K111	K112	37,8	125	0	0	1
K112	AB164	3,62	25	0	0	1
K112	K113	159,23	125	1	0	1,4
K113	AB106	37,82	32	0	2	3,5
K113	K114	16,16	125	0	0	1
K114	AB163	5,22	25	0	0	1
K114	K115	17,23	125	0	0	1
K115	AB162	4,5	25	0	0	1
K115	K116	11,76	125	0	0	1
K116	AB107	52,82	65	0	3	4,75

K116	K117	71,33	125	0	2	3,5
K117	K118	93,98	50	0	3	4,75
K118	AB154	13,31	25	0	0	1
K118	K119	16,68	50	0	0	1
K119	K120	29,86	25	0	0	1
K120	AB155	3,95	25	0	0	1
K120	K121	31,71	25	0	0	1
K121	AB157	8,09	25	0	0	1
K121	AB156	36,18	25	0	0	1
K119	K122	17,96	25	0	1	2,25
K122	AB158	41,77	25	0	2	3,5
K122	K123	17,15	25	0	0	1
K123	AB161	6,97	25	0	0	1
K123	K124	27,83	25	1	0	1,4
K124	AB160	2,5	25	0	0	1
K124	AB159	11,26	25	0	2	3,5
K117	K125	8,29	125	0	0	1
K125	K126	62,51	50	1	0	1,4
K126	AB153	26,25	25	0	4	6
K126	K127	24,34	50	0	0	1
K127	AB151	15,96	50	1	1	2,65
K127	AB152	21,12	25	0	1	2,25
K125	K128	53,66	125	1	0	1,4
K128	K129	6,89	50	0	0	1
K129	AB108	3,73	25	0	0	1
K129	K130	23,63	32	0	2	3,5
K130	AB111	1,62	25	0	0	1
K130	K131	13,1	25	0	1	2,25
K131	AB109	3,38	25	0	0	1
K131	AB110	37,68	25	0	4	6

K128	K132	86,44	125	0	0	1
K132	AB112	8,35	65	0	0	1
K132	K133	59,9	125	1	0	1,4
K133	AB113	18,94	25	0	1	2,25
K133	K134	24,43	125	0	0	1
K134	K135	23,48	65	0	0	1
K135	AB150	29,15	65	1	1	2,65
K135	AB149	26,53	26,53	0	2	3,5
K134	K136	78,86	125	0	0	1
K136	AB148	16,96	50	0	1	2,25
K136	K137	22,99	125	0	0	1
K137	AB147	14,79	32	0	0	1
K137	K138	16,4	125	0	0	1
K138	AB146	23,04	32	0	1	2,25
K138	K139	22,54	125	0	0	1
K139	K140	7,35	65	0	0	1
K140	AB144	21,42	50	0	2	3,5
K140	AB145	77,28	40	0	2	3,5
K139	K141	78,64	125	0	0	1
K141	AB114	9,64	32	0	2	3,5
K141	K142	5,92	125	0	0	1
K142	AB143	14	32	0	2	3,5
K142	K143	34,81	125	0	0	1
K143	AB142	9,64	32	0	1	2,25
K143	K144	11,64	125	0	1	2,25
K144	AB115	12,32	32	0	2	3,5
K144	K145	27,96	125	0	1	2,25
K145	K146	144,12	80	0	2	3,5
K146	K147	22,86	40	0	0	1
K146	AB116	90,87	65	0	3	4,75

K147	AB117	4,37	32	0	0	1
K147	AB118	37,23	32	0	2	3,5
K145	K148	15,12	125	0	0	1
K148	AB141	6,03	32	0	0	1
K148	K149	64,54	100	0	0	1
K149	AB119	8,11	40	0	0	1
K149	K150	5,01	100	0	0	1
K150	AB140	10,65	32	0	0	1
K150	K151	40,25	100	0	0	1
K151	K152	12,8	40	0	0	1
K152	AB120	4,88	32	0	1	2,25
K152	AB121	51,4	32	0	2	3,5
K151	K153	14,4	100	0	0	1
K153	AB139	8,9	25	0	0	1
K153	K154	82,42	100	0	0	1
K154	AB138	10,77	50	0	0	1
K154	K155	28,29	100	0	0	1
K155	AB122	39,16	40	0	3	4,75
K155	K156	46,14	80	1	0	1,4
K156	K157	18,24	50	0	1	2,25
K157	AB123	16,19	32	0	1	2,25
K157	K158	65,84	50	2	0	1,8
K158	AB124	18,49	25	0	1	2,25
K158	AB125	36,11	40	0	2	3,5
K156	K159	37,09	80	0	0	1
K159	AB126	14,25	50	0	1	2,25
K159	K160	44,66	80	0	1	2,25
K160	AB137	9,48	32	0	1	2,25
K160	K161	17,63	80	0	0	1
K161	K162	11,69	40	0	0	1

K162	AB136	39,1	32	0	3	4,75
K162	AB135	41,93	25	0	4	6
K161	K163	2,31	80	0	0	1
K163	K164	122,77	65	1	6	8,9
K164	AB131	9,63	25	0	0	1
K164	K165	17,24	65	0	0	1
K165	AB134	57,42	32	1	1	2,65
K165	K166	34,98	32	0	0	1
K166	AB132	2,92	25	0	0	1
K166	AB133	41,35	25	0	0	1
K163	K167	2,29	50	0	0	1
K167	AB127	4,38	25	0	0	1
K167	K168	15,1	50	0	0	1
K168	AB128	26,05	25	0	3	4,75
K168	K169	91,89	50	0	1	2,25
K169	AB129	9,92	25	0	0	1
K169	AB130	74,19	50	0	3	4,75
K109	K170	26,45	125	0	0	1
K170	K171	34,61	65	0	1	2,25
K171	AB40	3,53	50	0	0	1
K171	K172	19,37	40	1	0	1,4
K172	AB39	3,1	25	0	0	1
K172	AB38	8,03	25	0	1	2,25
K170	K173	18,02	125	0	0	1
K173	AB41	8,73	32	0	0	1
K173	K174	20,94	125	0	0	1
K174	AB104	8,96	50	0	2	3,5
K174	K175	3,43	125	0	0	1
K175	AB103	3,98	40	0	1	2,25
K175	K176	22,49	125	0	0	1

K176	AB42	7,2	25	0	0	1
K176	K177	2,68	125	0	0	1
K177	AB102	4,82	40	0	0	1
K177	K178	17,46	125	0	0	1
K178	AB43	7,15	32	0	0	1
K178	K179	35,8	125	0	0	1
K179	K180	10,06	65	0	0	1
K180	AB101	2,9	40	0	0	1
K180	K181	35,69	65	0	2	3,5
K181	AB96	6,09	25	0	0	1
K181	K182	28,87	65	0	0	1
K182	AB100	14,12	32	0	2	3,5
K182	K183	4,91	65	0	0	1
K183	AB98	21,56	40	0	2	3,5
K183	AB99	26,15	32	0	1	2,25
K179	K184	9,84	125	0	0	1
K184	AB44	16,49	50	0	0	1
K184	K185	4,95	125	0	0	1
K185	K186	50,41	65	0	1	2,25
K186	AB233	29,94	25	0	0	1
K186	K187	33,74	65	0	0	1
K187	AB234	24,19	25	0	0	1
K187	K188	42,51	50	0	0	1
K188	AB235	24,53	25	0	2	3,5
K188	K189	43,72	50	0	0	1
K189	AB236	21,81	32	0	2	3,5
K189	AB237	67,5	32	0	4	6
K185	K190	67,16	125	1	0	1,4
K190	K191	4,31	65	0	0	1
K191	AB46	11,31	25	0	1	2,25

K191	K192	32,03	50	0	0	1
K192	AB47	3,07	32	0	0	1
K192	AB48	22,86	50	0	1	2,25
K190	K193	28,01	125	0	0	1
K193	AB94	130,88	65	0	0	1
K193	K194	62,64	125	0	0	1
K194	K195	53,41	65	0	3	4,75
K195	AB51	6,11	40	0	0	1
K195	K196	16,57	50	0	0	1
K196	AB49	8,33	40	0	0	1
K196	AB50	38,89	32	0	1	2,25
K194	K197	7,7	125	0	0	1
K197	AB93	19,2	32	0	0	1
K197	K198	64,06	125	1	0	1,4
K198	AB53	31,09	25	0	2	3,5
K198	K199	35,51	125	0	0	1
K199	AB54	22,23	32	0	1	2,25
K199	K200	37,08	125	0	0	1
K200	K201	33,84	65	0	2	3,5
K201	AB90	9,89	25	0	1	2,25
K201	K202	39,72	65	0	1	2,25
K202	AB91	6,7	32	0	0	1
K202	AB92	33,96	32	0	1	2,25
K200	K203	14,83	125	0	0	1
K203	AB52	10,2	25	0	0	1
K203	K204	9,76	125	0	0	1
K204	AB89	11,72	50	0	0	1
K204	K205	29,63	125	0	0	1
K205	K206	75,84	100	1	0	1,4
K206	K207	39,22	50	0	0	1

K207	AB85	9,98	25	0	0	1
K207	K208	16,04	50	0	0	1
K208	AB86	11,64	32	0	0	1
K208	K209	33,48	50	0	0	1
K209	AB87	31,17	40	0	1	2,25
K209	AB88	56,51	32	0	1	2,25
K206	K210	17,53	100	0	0	1
K210	AB84	7,9	32	0	0	1
K210	K211	19,73	100	0	0	1
K211	K212	36,46	65	0	0	1
K212	K213	9,75	32	0	0	1
K213	AB83	2,34	25	0	0	1
K213	AB82	18,45	25	0	2	3,5
K212	AB81	157,53	65	0	2	3,5
K211	AB80	32,08	100	0	0	1
K205	K214	2,58	80	0	0	1
K214	AB55	5,37	25	0	0	1
K214	K215	50,84	80	0	0	1
K215	K216	110,38	65	2	3	5,55
K216	K217	18,26	32	0	0	1
K217	AB56	5,93	25	0	0	1
K217	AB57	39,35	25	0	1	2,25
K216	K218	21,29	50	0	0	1
K218	AB58	10,15	25	0	0	1
K218	K219	19,71	50	0	0	1
K219	AB240	12,61	25	0	0	1
K219	K220	7,24	50	0	0	1
K220	AB59	9,59	25	0	0	1
K220	K221	26,63	50	0	0	1
K221	AB239	16,75	25	0	0	1

K221	K222	0,7	50	0	0	1
K222	AB60	10,98	25	0	0	1
K222	AB61	78,4	50	2	0	1,8
K215	K224	49,7	80	0	0	1
K224	K225	11,62	50	0	1	2,25
K225	AB67	25,35	25	0	1	2,25
K225	K226	20,58	50	0	0	1
K226	AB66	13,06	25	0	0	1
K226	K227	9,18	40	0	0	1
K227	AB62	13,27	25	0	1	2,25
K227	K228	33,28	40	2	0	1,8
K228	AB63	19,98	25	0	1	2,25
K228	K229	17,2	40	0	0	1
K229	AB65	3,22	25	0	0	1
K229	AB64	39,26	32	0	2	3,5
K224	K230	2,23	80	0	0	1
K230	K231	72,36	80	0	2	3,5
K231	AB79	15,81	65	0	0	1
K231	K232	124,1	65	0	1	2,25
K232	AB78	19,97	25	0	3	4,75
K232	K233	98,12	50	0	1	2,25
K233	AB76	4	25	0	0	1
K233	AB77	8,7	32	0	1	2,25
K230	K234	122,33	65	0	0	1
K234	AB69	10,43	32	0	0	1
K234	K235	54,32	65	0	1	2,25
K235	AB75	4,62	32	0	0	1
K235	K236	29,67	65	0	1	2,25
K236	AB70	23,72	25	0	2	3,5
K236	K237	63,61	65	0	4	6

K237	K238	10,38	25	0	0	1
K238	AB8	2,18	25	0	0	1
K238	AB71	15,85	25	0	1	2,25
K237	K239	2,39	65	0	0	1
K239	AB72	5,49	25	0	0	1
K239	K240	25,61	65	0	0	1
K240	AB73	24,8	25	0	1	2,25
K240	AB74	194,53	65	0	5	7,25
K0	K4	2,88	200	0	0	1
K17	K20a	12,46	200	0	0	1
K20a	AB00	106,98	40	0	2	3,5
K19	K20	30,31	32	0	0	1

Tabelle A-3: Zusammengefasste Verbraucher nach Cluster

Cluster	HA-Nr.-Cluster	VB-Nr. lt. Plan	äquiv. VB
T01	10-13	252;271;266;255	1,2,3
	3,4,5	142;187;165	4,5,6
	8,9	145;216	7,8,9
T02	5,6,7	215;146;147	1,2,3
	11,12	139;270	4,5,6
T03	10,11	163;127;128;129	1,2,3
	4-7	124;125;224;254	4,5,6
	1,2,3	118;119;120	7,8,9
	15,16	134alt, 134neu	10,11,12
T04	8-15	171;123;173;260;172;238;122; 121	1,2,3
T05	1-18	32;103;104;107;105;106;17;10 8- 112;276;269;217;179;64;462;1 13;198;235;188;177;178;263;1 32	1,2,3
T06	4,5,6	152;250;97	1,2,3
	9-16	239;15;98;99;100;101;101a;19 5	4,5,6
	18-23	240;241;249;248;247;242-246	7,8,9
T07	1,2,3	176;264;77	1,2,3
	10-14	82;83;84;155;199	4,5,6
	16-20	48;87;86;88;89;90	7,8,9
	21,22,23	267;218;91	10,11,12
	25,26,27	213;170;159;94	13,14,15

T08	1-28	52;53;54;102;268;55;229;269; 57;206;60;59;208;58;70;68;71; 72;66;67;73;197;148;74;75;76; 56;62;209;281;280;61;69;190, 191	1,2,3
T09	1-11	46;47;40;38;39;41;42;43;233,4 5;154;44;185	1,2,3
T10	2,3	16;18	1,2,3
	4,5,6	19;156;150;207	4,5,6
	7,8	20;21	7,8,9
	10,11	23;24	10,11,12
	12-15	201;237;202;203	13,14,15
	17,18,19	25;204;37	16,17,18
	22,23,24	30;28;223	19,20,21
	25,26,27	33;34;35;29;232	22,23,24
	28,29	26;31;149	25,26,27
T11	1-15	192;256;236;5;6;261;262;265; 259;8;7;13;9;194;10;11	1,2,3
T12	13-16	220;166;4;283	1,2,3
	8-11	189;285;212;284	4,5,6
	3,4,5	225;227;226	7,8,9

11. Anhang B : Leitfaden zur Netzvereinfachung

ausgearbeitet von Veronika Berg, Sabrina Dusek und Johannes Nagler

Im Rahmen der Diplomarbeit Dynamische Modellierung eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape und der darin verwendeten Methode zur Netzvereinfachung nach Larsen et al [23] wird in dieser Arbeit die Vorgehensweise bei der Netzvereinfachung vorgestellt.

Grundsätzlich geschieht der Benutzerinput über ein Excel-File. Die physikalischen Formeln der Netzvereinfachung sind in verschiedenen m-Files hinterlegt, die eigentliche Transformation wird also in Matlab vorgenommen. Die daraus erhaltenen Ergebnisse werden wieder an das Excel-File übergeben.

Die Vorgehensweise bei der Netztransformation geschieht schrittweise. Schritt für Schritt werden Rohre ineinander geklappt und/oder zusammengefasst. Der folgende Schritt benötigt in diesem Fall die Ergebnisse des vorangegangenen.

Inhalt

1. Vorbereitungen	3
1.1. Systemanforderungen	3
1.2. Benötigte Dateien	3
1.3. Netzdaten.....	4
2. Vereinfachungskonzept	5
2.1. Methode A.....	5
2.2. Methode B	6
3. Eingabe der Netzdaten	7
3.1. Das Excel-File	7
3.2. Rohrdaten	8
3.3. Hausanschlüsse.....	9
3.4. Parameter.....	10
4. Clusterbildung	11
4.1. Erweiterung der Excel-Arbeitsmappe um mehr Cluster.....	11
5. Netzvereinfachung	12
5.1. Aufbau des Cluster-Tabellenblattes.....	12
5.2. Eingabe in Excel.....	13
5.3. Methodenaufruf in Matlab.....	18
6. Ergebnisse	19
6.1. Kontrollmöglichkeiten.....	20
6.2. Möglichkeiten der Vereinfachung in der Mitte des Netzes	21

1. Vorbereitungen

1.1. Systemanforderungen

- Matlab
- MS Excel 2007 oder neuer

1.2. Benötigte Dateien

- Excel-Arbeitsmappe: Netzvereinfachung.xlsx

Matlab-Files:

- TRAFO_T01.m
- MethodeA.m
- MethodeB.m
- Bedingung.m
- VereinfachungKnoten.m
- Verzweigung.m
- Verlauf_real.mat

Alle Dateien müssen in dem selben Ordner gespeichert werden.

Der Aufbau der Dateien darf nicht geändert werden. Es werden nur die erforderlichen Daten in den vorgesehenen Bereichen eingegeben. (Details weiter unten.)

Das Workspace-File *Verlaufe_T01* enthält hier beispielhaft als Matrix die Verbraucherfunktionen der 17 Verbraucher des Clusters T01.

Für die Transformation des gesamten Netzes sind alle Verbraucherfunktionen erforderlich. Für jeden Cluster wird eine Variable geschaffen, welche als Vektor die Verbrauchsfunktionen der zum Cluster gehörenden Verbraucher enthält (Elemente in *Verlauf_real.mat*).

1.3. Netzdaten

Netzplan mit eindeutiger Benennung aller Knoten

Liste aller Rohre mit:

- Eindeutiger Benennung der Anfangs und Endknoten zur Rohridentifizierung
- Länge des Rohres
- Innendurchmesser
- Anzahl der Krümmer 45°
- Anzahl der Krümmer 90°

Liste der Rohrdaten passend zum Innendurchmesser

- Dicke des Stahlmantels des Mediumrohrs
- Dicke der Isolierung

Liste der Hausanschlüsse

- Knoten an dem der Hausanschluss liegt
- Leistungsverbrauch (als Energiemenge pro Tag)

2. Vereinfachungskonzept

Alle Methoden und Funktionen basieren auf folgender Literaturquelle:

„H. V Larsen, B. Bøhm, and H. F. Ravn, “Equivalent Models for District Heating Systems,” *Proc. 7th Int. Symp. Dist. Heat. Cool. Lund, Sweden*, no. 1323, 1999.

Das Fernwärmenetz wird schrittweise vereinfacht. In jedem Schritt wird ein Teil des Netzes auf drei Ersatzrohre mit Ersatzverbrauchern zusammengefasst. Hierbei gibt es zwei Fälle mit zugehörigen Methoden:

2.1. Methode A

Bei Methode A werden mehrere Verbraucher und die dazwischen liegenden Rohre an einem Netzende zusammengefasst.

Hinweis: Es muss sich um das Ende eines (Seiten-) Astes handeln

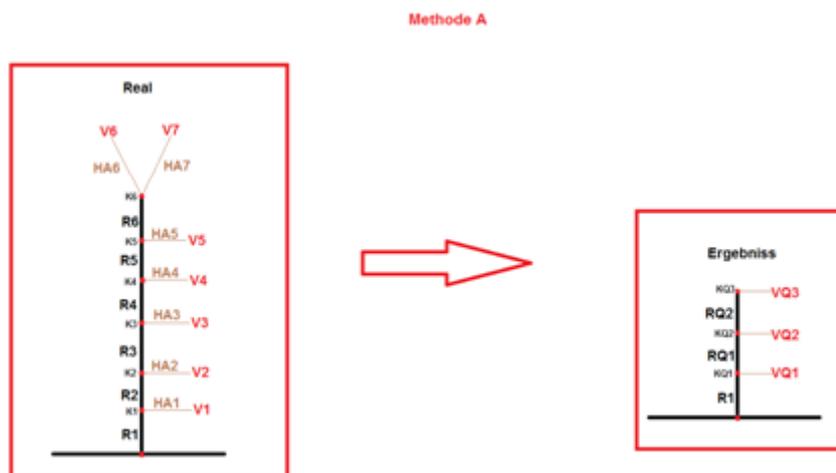


Abbildung 2.1: Netzvereinfachung Methode A

2.2. Methode B

Bei Methode B können zwei Leitungsstränge, an denen jeweils drei Verbraucher angeschlossen sind ineinander eingeklappt werden.

Hinweis: Die Verbraucher müssen direkt am Leitungsstrang hängen ohne weitere Nebenrohre. Es ist möglich hier Ergebnisstränge, die bereits mit Methode A bearbeitet wurden einzusetzen.

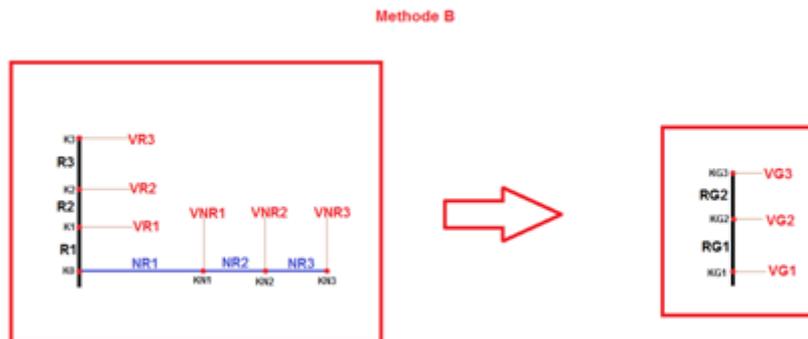


Abbildung 2.2: Netzvereinfachung Methode B

Die Vereinfachung erfolgt durch schrittweises Anwenden der Methoden A und B auf das Netz, immer unter Einbezug von vorhergegangenen Ergebnissen.

3. Eingabe der Netzdaten

3.1. Das Excel-File

File: Excel-Arbeitsmappe Transformation.xlsx.

Während der Bearbeitung darf die Struktur der Arbeitsmappe nicht verändert werden: Bei bestehenden Tabellen dürfen keine Zeilen und Spalten eingefügt werden, da die m-Files auf feste Zellenbereiche zugreifen. Die Benennung der bestehenden Tabellen dürfen nicht geändert werden. Es ist möglich neue Tabellen mit Zusatzinformationen einzufügen.

Der Name der gesamten Arbeitsmappe kann geändert werden. Sie muss jedoch im gleichen Ordner wie die Matlab-Files gespeichert werden. Als Speicherformat ist .xlsx vorgesehen.

Generell gelten folgende Farbhinweise:

Blau: Bereich der Benutzereingabe

Grün: Automatisch von Excel bearbeitete Bereiche

Orange: Ausgabe von Matlab

3.2. Rohrdaten

Tabellenblatt „Rohrdaten“.

Es muss nun jedes einzelne Rohrstück des Fernwärmenetzes eingetragen werden. Folgende Angaben sind notwendig:

- Eindeutige Benennung der Anfangs und Endknotens zur Rohridentifizierung
- Länge des Rohres in m
- Innendurchmesser in mm
- Anzahl der Krümmer 45°
- Anzahl der Krümmer 90°

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Knoten		Rohr		Krümmer			Rohrwand		Rohr
2	Anfang [i]	Ende[j]	Länge	Rohr-Dn	45°	90°	Zeta	s_st	s_iso	Rohr-Dn
3			[m]	[mm]	[-]	[-]		[m]	[m]	[m]
4	K1	AB2	68,24	25	0	1	2,25	0,0023	0,02515	0,025
5	K1	AB3	10,24	25	0	0	1	0,0023	0,02515	0,025
6	K2	K1	41,29	32	0	2	3,5	0,0026	0,0308	0,032
7	K2	AB95	4,82	25	0	0	1	0,0023	0,02515	0,025
8	K3	AB1	7,47	80	0	1	2,25	0,0032	0,03255	0,08
9	K3	K2	102,35	40	0	2	3,5	0,0026	0,02785	0,04
10	HW	K3	29,66	80	0	2	3,5	0,0032	0,03255	0,08
11	HW	K4	2,88	200	0	0	1	0,0045	0,04385	0,2
12	K4	AB45	60,74	65	0	0	1	0,0029	0,02895	0,065

Abbildung 3.1: Eingabefeld im Tabellenblatt Rohrdaten

Die Bereiche Zeta, Stahlmanteldicke s_st, Isolierungsdicke s_iso und Innendurchmesser Rohr in m werden automatisch ergänzt.

3.3. Hausanschlüsse

Tabellenblatt „Hausanschlüsse“.

Tragen Sie alle Verbraucher des Fernwärmenetzes mit folgenden Angaben ein:

- Name des Knotens an dem der Verbraucher seine Leistung bezieht
- Durchschnittlicher Energieverbrauch in kWh/Tag (aus diesem Wert wird die Durchschnittsleistung automatisch berechnet)
- Es kann zu jedem Verbraucher ein Name (Nr.laut Netzplan) eingetragen werden (dient der Übersichtlichkeit)
- Es kann die Zuordnung zu den Clustern (s.Clusterbildung) eingetragen werden (dient der Übersichtlichkeit)

	A	B	C	D	E	F
1	Nr. laut Plan	Knoten	Durchschnitts Leistung [W]	Energie-Menge [kWh/Tag]	Cluster	
2	141	AB138	20143,0555555556	483,4333333333	T01	
3	140	AB122	5031,9444444445	120,7666666667	T01	
4	142	AB123	5368,0555555556	128,8333333333	T01	
5	187	AB125	1868,0555555556	44,8333333333	T01	
6	165	AB124	4662,5	111,9	T01	
7	143	AB126	4183,3333333333	100,4	T01	
8	144	AB137	7020,8333333333	168,5	T01	
9	145	AB136	3138,8888888889	75,3333333333	T01	
10	216	AB135	675	16,2	T01	
11	252	AB131	890,2777777778	21,3666666667	T01	
12	271	AB133	2083,3333333333	50	T01	
13	266	AB132	4672,2222222222	112,1333333333	T01	
14	255	AB134	2315,2777777778	55,5666666667	T01	
15	193	AB127	1120,8333333333	26,9	T01	
16	221	AB128	966,5555555556	22,9333333333	T01	

Abbildung 3.2: Eingabe der Hausanschlussdaten im Tabellenblatt Hausanschlüsse

3.4. Parameter

Tabellenblatt „Parameter“.

Hier werden zusätzliche Rohrgeometrien angegeben: Es wird eine Liste erstellt in der jedem möglichen Rohrdurchmesser (in m) folgende Daten zugewiesen werden:

- Dicke des Stahlmantels s_{st} in m
- Dicke der Isolierung s_{iso} in m

Hinweis: Aus dieser Liste werden die Werte für s_{st} und s_{iso} im Tabellenblatt Rohrdaten ergänzt.

Die Liste der Innendurchmesser sollte in aufsteigender Reihenfolge eingetragen werden. Wenn ein Durchmesser nicht gefunden wird, wird der Wert kleiner oder gleich dem Innendurchmesser gewählt. Bei noch größeren Innendurchmessern wird der letzte Wert der Liste zurückgegeben.

	A	B	C	D
1	Rohrwanddaten			
2	Durchmesser	s_{st}	s_{iso}	
3	[m]	[m]	[m]	
4	0,025	0,0023	0,02515	
5	0,032	0,0026	0,0308	
6	0,040	0,0026	0,02785	
7	0,050	0,0029	0,02935	
8	0,065	0,0029	0,02895	
9	0,080	0,0032	0,03255	
10	0,100	0,0036	0,03965	
11	0,125	0,0036	0,03925	
12	0,200	0,0045	0,04385	

Abbildung 3.3: Eingabe der Rohrparameter im Tabellenblatt Parameter

4. Clusterbildung

Zunächst wird das Netz in Cluster bzw. Teilabschnitte aufgeteilt, die der Reihe nach bearbeitet werden.

- Jeder Teilabschnitt bekommt einen Namen: Txx (xx...Nummer des Teilabschnittes) Es sind maximal 17 Netzabschnitte T01 bis T17 vorgesehen
- Jeder Netzabschnitt wird in dem dafür vorgesehenen Tabellenblatt bearbeitet.
- Die Maximale Größe eines Netzabschnittes ist begrenzt auf:
 - 30 Hausanschlüsse (Verbraucher)
 - 20 Rohre (Rohre des Hauptstrangs)
 - 15 Nebenrohre (Rohre in Seitenästen)
- Es ist möglich die Ergebnisse der in früheren Schritten zusammengefassten Cluster in einen darauffolgenden Cluster einzubeziehen und so ein neues Netzende zu bilden. Das Vorergebnis gilt dann als drei Hausanschlüsse mit drei Rohren.
- Für Vereinfachungen in der Mitte (T10) siehe Kap. 6.2.

4.1. Erweiterung der Excel-Arbeitsmappe um mehr Cluster

- Kopieren Sie das Tabellenblatt T0x
- Benennen Sie das neue Blatt um in z.B. T18
- Ersetzen Sie mit der Suchen und Ersetzen Funktion alle „T0x“ durch „T18“
- Ergänzen Sie im Blatt „Ergebnisse“ einen Verweis, sodass die Ergebnisse des neuen Blattes T18_E0 bis T18_E2 in die Ergebnisliste eingetragen werden (Referenz zum Tabellenblatt T18, Bereich N6:S8)
- In all jenen Teilabschnitts-Blättern, die Ergebnisse aus neu erstellten Tabellenblättern benötigen muss weiters ergänzt werden:
 - Ab Zeile 759: Erweiterung der Liste der verwendbaren Rohrdaten um die Ergebnisse T18_E0 bis T18_E2 durch Kopieren der Verweise von T17_E0 bis T17_E2.
 - Die Liste darf maximal bis zur Zeile 850 aufgefüllt werden.

5. Netzvereinfachung

Es wird nun ein Cluster nach dem anderen vereinfacht.

5.1. Aufbau des Cluster-Tabellenblattes

Generell gelten folgende Farbhinweise:

Blau: Bereich der Benutzereingabe

Grün: Automatisch von Excel bearbeitete Bereiche

Orange: Ausgabe von Matlab

Zeile 1 – 210: Hier befindet sich das Benutzerinterface. In den Blauen Bereichen (Spalten A – J) füllen Sie die notwendigen Daten aus. Nach anschließender Bearbeitung durch das Matlab – Programm finden Sie in den orangen Bereichen die Ergebnisse (Spalten M – AA)

Zeile 231 – 690: Dieser Bereich ist nicht zur Bearbeitung vorgesehen. Hier werden automatisch alle notwendigen Daten für die einzelnen Berechnungsschritte zusammengesucht und die Zwischenergebnisse jedes Schritts bei der Berechnung durch Matlab eingetragen.

Zeile 714 – 888: Dieser Bereich ist nicht zur Bearbeitung vorgesehen. Hier werden automatisch alle Rohrdaten, die für den Cluster relevant sind eingetragen.

5.2. Eingabe in Excel

Tabellenblatt des Clusters, z.B.: T01

Anfänglich werden alle Hausanschlüsse, Rohre und Nebenrohre des Clusters eingetragen und mit einem eindeutigen Namen für die weitere Bearbeitung versehen.

Hier wird das Anfertigen einer Handskizze des Netzabschnittes basierend auf dem Netzplan empfohlen.

Füllen Sie den Bereich C11:D75 folgendermaßen aus:

- Leitungen mit Hausanschlüssen: in den Zeilen 11-40; Es wird jeweils der Anfangs- und Endknoten der Leitung angegeben. (Benennung wie im Blatt „Rohrdaten“) In der Spalte B befindet sich die ab jetzt benutzte Benennung jedes Anschlusses Txx_HAyy. Wenn weniger als 30 Hausanschlüsse vorhanden sind, werden die überflüssigen Zeilen frei gelassen.

Hinweis: Es werden automatisch in der Spalte E die Leistungsverbräuche der Hausanschlüsse ergänzt. Sollten zwei Hausanschlüsse über den selben Zahlenwert der Leistung verfügen, empfiehlt es sich einen leicht abzuändern. Die Gleichheit zweier Leistungen führt nämlich zu einer fehlerhaften Zuweisung der Ergebnisse in der Spalte AJ. Das Problem kann auch durch die Änderung einer nicht mehr signifikanten Nachkommastelle erfolgen.

- Rohre des Hauptstrangs: in den Zeilen 41-60; Es wird jeweils der Anfangs- und Endknoten der Leitung angegeben. (Benennung wie im Blatt „Rohrdaten“) In der Spalte B befindet sich die ab jetzt benutzte Benennung jedes Rohres Txx_Ryy. Wenn weniger als 20 Rohre vorhanden sind, werden die überflüssigen Zeilen frei gelassen.
- Nebenrohre (Rohre von Seitenästen): in den Zeilen 61-75; Es wird jeweils der Anfangs- und Endknoten der Leitung angegeben. (Benennung wie im Blatt „Rohrdaten“) In der Spalte B befindet sich die ab jetzt benutzte Benennung jedes Rohres Txx_NRyy. Wenn weniger als 15 Nebenrohre vorhanden sind, werden die überflüssigen Zeilen frei gelassen.

- Wenn das Ergebnis eines vorhergegangenen Clusters verwendet werden soll, also die Vereinfachung über mehrere Cluster erfolgen soll, so wird dieser in Feld B77 angegeben.

	A	B
75		T02_NR15
76	Weitere verwendbare Rohrdaten	Null-Rohr
77	Benötigte Clusterergebnisse	T01
78		

Abbildung 5.1: Verwendung vorhergehender Clusterergebnisse

Abbildung 5.2 zeigt die vorher beschriebene Eingabe im Tabellenblatt T01:

	A	B	C	D	E	F
1	Netzvereinfachung					
2	Teilastnummer:	T01				
3						
4						
5						
6						
7						
8	Eingabe					
9	Rohre des Netzabschnitts					
10		Name	Knoten[i]	Knoten[j]	Leistungen [W]	
11		T01_HA01	K154	AB138	20143,0556	
12		T01_HA02	K155	AB122	5031,94444	
13		T01_HA03	K157	AB123	5368,05556	
14		T01_HA04	K158	AB125	1868,05556	
15		T01_HA05	K158	AB124	4662,5	
16		T01_HA06	K159	AB126	4183,33333	
39		T01_HA29			#NV	
40		T01_HA30			#NV	
41		T01_R01	K153	K154		
42		T01_R02	K154	K155		
59		T01_R19				
60		T01_R20				
61		T01_NR01	K156	K157		
62		T01_NR02	K157	K158		
63		T01_NR03	K161	K162		
64		T01_NR04	K163	K164		
65		T01_NR05	K164	K165		
66		T01_NR06	K165	K166		

Abbildung 5.2: Eingaben der Hausanschlussrohre, Hauptrohre und Nebenrohre

Nun müssen die einzelnen Schritte zur Vereinfachung des Netzabschnitts vorgegeben werden. Es wird immer entweder Methode A oder B gewählt und die Rohre auf die die Methode angewandt werden soll angegeben.

Mit *Methode A* werden Netzen mit mehreren Hausanschlüssen zu einem Strang mit drei Ersatzverbrauchern zusammengefasst. Es können maximal 7 Hausanschlüsse auf einmal zusammengefasst werden.

Mit *Methode B* werden zwei 3-Verbraucher-Stränge ineinander geklappt. Anhand des Netzplans wird zunächst die Abfolge der einzelnen Vereinfachungsschritte festgelegt (Beispiel siehe. Abbildung 5.3) Es sind für einen Cluster maximal 20 Schritte möglich.

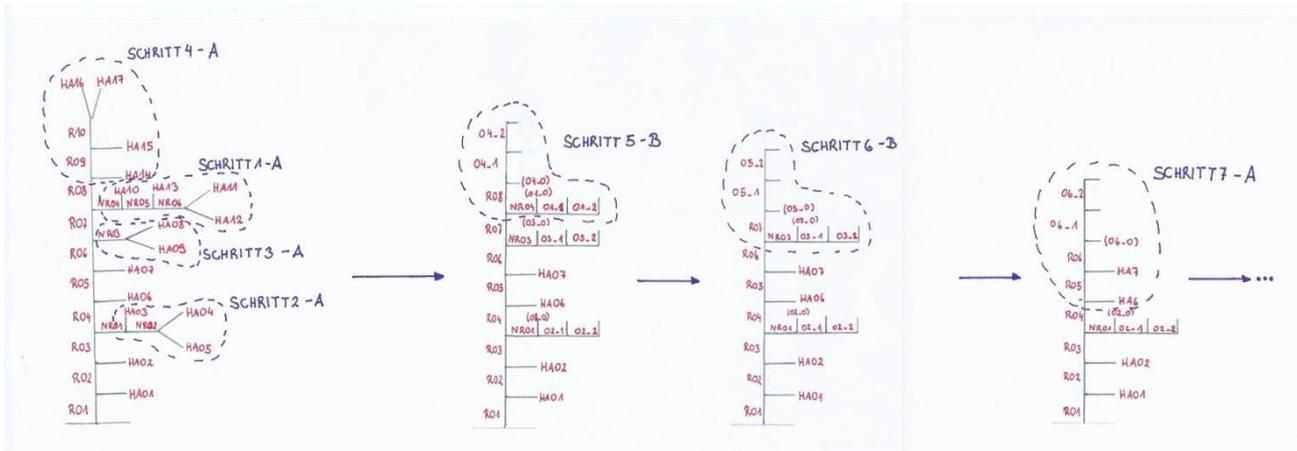


Abbildung 5.3: Festlegen der Vereinfachungsschritte

- Als Ergebnis eines Schrittes werden drei Rohre mit Ersatzleistungen zurückgegeben mit folgender Benennung: Txx_yy_0, Txx_yy_1, Txx_yy_2. xx...Clusternummer, yy...Schrittnummer
- Die Schrittabfolge wird folgendermaßen im Excel-File eingetragen:
 - Bei jedem Schritt wird zunächst die Methodenart gewählt: Eintragen von „A“ oder „B“ im blauen Feld neben „Methode:“ (z.B. bei Schritt 1 Feld I10)
 - Hinweis:* Wenn keine Methode angegeben wird, nimmt das Programm an, dass keine weiteren Berechnungsschritte mehr durchgeführt werden sollen und bricht (ohne Fehlermeldung) ab. Die Ergebnisse jenes Schrittes, nachdem abgebrochen wurde, wird als Endergebnis zurückgegeben.
 - Anschließend werden die Rohrstücke auf die die Methode angewandt werden soll angegeben. (z.B. bei Schritt 1 im Bereich I12:J18). Als Benennung der Hausanschlüsse, Rohre und Nebenrohre werden die vorher zugeordneten Namen benutzt (z.B. T01_HA15; T01_R07, T01_NR02) Gelegentlich ist es notwendig ein Zusatzrohr mit Länge 0 einzusetzen. Hier benutzt man die Bezeichnung „Null-Rohr“.

	G	H	I	J
	Vereinfachungssystem			
Schritt 1	Methode:	A		
	Rohre:	HA/HR	R/NR	
		T01_HA10	T01_NR05	
		T01_HA11	T01_NR06	
		T01_HA12		
		T01_HA13		

Abbildung 5.4: Eingabe Methode A, Schritt 1-A in Abbildung 6.3

Zu Beachten:

- Methode A

Die Methode kann immer nur an einem Netzende angewandt werden. Es kann ein Teilnetz mit maximal 7 Hausanschlüssen vereinfacht werden. Hierbei können auch Ergebnisse aus vorangegangenen Schritten oder Endergebnisse aus vorher bearbeiteten Clustern verwendet werden. Die Hausanschlüsse werden in der Spalte I eingetragen angefangen vom innersten zum äußersten. In der Spalte J werden die dazugehörigen Rohre eingetragen (bei einem Seitenast die Nebenrohre). Hierbei steht neben jedem Hausanschluss das angrenzende, weiter außen liegende Rohr. Somit bleibt das erste Rohr des Teilstücks immer unberührt und bildet am Ende das erste Ergebnisrohr. Neben einem ganz am Ende angebrachten Verbraucher wird kein Rohr mehr eingetragen. Wenn am Ende eine Gabelung mit zwei Verbrauchern vorhanden ist, wird neben beiden Verbrauchern kein Rohr eingetragen.

Hinweis: Wenn am Ende zwei Verbraucher hängen, können diese zunächst in beliebiger Reihenfolge eingetragen werden.

- Spezialfall A1: Einbeziehen von Ergebnissen aus vorhergehenden Schritten. Hier werden für die drei Ersatzanschlüsse drei Null-Rohre eingetragen, die Stichleitungen zur WÜST wurden bereits im vorhergehenden Schritt (Methode A) in die Hauptleitung geklappt. Die beiden Ergebnisrohre Txx_yy_1 und Txx_yy_2 (im Beispiel Abbildung 5.3 T01_06_1 und T01_06_2) werden für die letzten Rohre eingetragen.

	G	H	I	J
Schritt 7	Methode:	A		
	Rohre:	HA/HR	R/NR	
		T01_HA06	T01_R05	
		T01_HA07	T01_R06	
		Null-Rohr	T01_06_1	
		Null-Rohr	T01_06_2	
		Null-Rohr		

Abbildung 5.5: Eingabe Spezialfall A1, Schritt 7-A in Abbildung 6.3

- Spezialfall A2: Wenn ein Seitenast nur aus einem Rohr und zwei daran anschließenden Verbrauchern besteht wird dies folgendermaßen eingetragen: In Spalte I ein Null-Rohr und dann die beiden Hausanschlüsse. In Spalte J ein Null-Rohr.

30	Schritt 3	Methode:	A	
31		Rohre:	HA/HR	R/NR
32			Null-Rohr	Null-Rohr
33			T01_HA08	
34			T01_HA09	
35				
36				
37				
38				

Abbildung 5.6: Eingabe Spezialfall A2, Schritt 3-A in Abbildung 6.3

Bei Methode A ist die Liste in der Spalte I immer um mindestens einen Eintrag länger als jene in der Spalte J.

- Methode B

Hier werden zuvor mit Methode A vereinfachte Seitenäste ineinander geklappt (bzw. in ein bearbeitetes Hauptleitungsende) Hierzu wird in den Spalten I und J jeweils ein Ast eingetragen, bestehend aus drei Rohren. Die Rohre werden dem Rohrleitungsverlauf nach von innen zum äußeren Ende aufgelistet.

Es entsteht also eine Liste aus zwei Spalten mit jeweils drei Einträgen.

Hinweis: Bei Methode A bleibt das innerste Rohr immer unangetastet. Dieses wird hier als erstes eingetragen. Dann folgen die Ergebnisse Txx_yy_1 und Txx_yy_2. Txx_yy_0 enthält nur eine Ersatzleistung die automatisch dem ersten Rohr zugeordnet wird.

50	Schritt 5	Methode:	B	
51		Rohre:	HA/HR	R/NR
52			T01_R08	T01_NR04
53			T01_04_1	T01_01_1
54			T01_04_2	T01_01_2
55				
56				
57				
58				

Abbildung 5.7: Eingabe Methode B

5.3. Methodenaufruf in Matlab

Im ersten Code-Abschnitt des m-files TRAFO_T01 müssen nun die Hinweise auf das Excel-File ersetzt werden:

```
Excel_Name = 'Netzvereinfachung';  
Excel_Name_xls = 'Netzvereinfachung.xlsx';  
Teil_Sheet_Name = 'T01';
```

Als *Excel_Name* wird der Name der Excel-Arbeitsmappe (als String mit ' ') eingegeben. Als *Excel_Name_xls* den Name der Arbeitsmappe inklusive Dateityp-Endung. Als *Teil_Sheet_Name* den Namen des Tabellenblattes des zu bearbeitenden Clusters.

Speichern Sie das File und rufen Sie die Methode mit Matlab auf.

Hinweis: Die Excel-Arbeitsmappe sollte beim Methodenaufruf geschlossen sein, da der `xlswrite`-Befehl sonst nicht auf das File zugreifen kann.

Matlab liest nun automatisch alle benötigten Daten ein und gibt die Berechnungsergebnisse in der Arbeitsmappe aus.

6. Ergebnisse

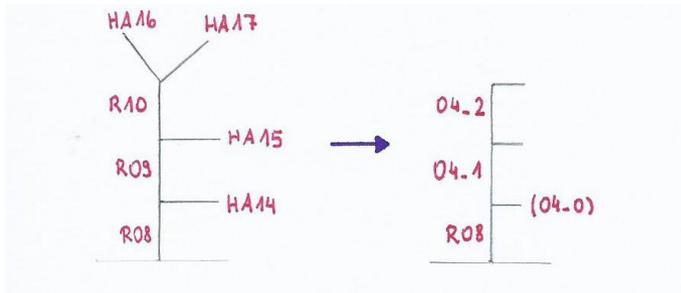


Abbildung 6.1: Ergebnis eines Vereinfachungsschrittes (Skizze)

	M	N	O	P	Q	R	S
40	Ergebnisrohre						
41	Name	Länge	Durchmesser	s _{st}	s _{iso}	Zeta	Leistung
42		[m]	[m]	[m]	[m]		
43	T01_04_0						1823,71177
44	T01_04_1	34,2809423	0,0501700972	0,00293625	0,01018543	3,03125	4584,25536
45	T01_04_2	104,430952	0,0499588842	0,0029015	0,02158789	11,71875	830,921763
46							

Abbildung 6.2: Ergebnis eines Vereinfachungsschrittes im Excel-File

Jeder Rechenschritt liefert immer drei Ergebnisse zurück:

Txx_yy_2 und Txx_yy_1 sind jeweils Ersatzrohre, denen die Leistung des angehängten Ersatzverbrauchers zugeordnet sind. Txx_yy_0 enthält die Leistung des ersten Ersatzverbrauchers am Ersatzstrang. Das dazu passende dritte Rohr im Hauptstrang ist das unberührte Rohr jedes Transformationsschrittes (vgl. Kap. 5.2).

Die Ergebnisse jedes Rechenschrittes werden im orangenen Bereich rechts neben der Schritteingabe ausgegeben.

Als Endergebnis für den gesamten Cluster Txx_E0, Txx_E1 und Txx_E2 werden die Ergebnisse des letzten Teilschrittes eingetragen. In diesem Schritt sollte der gesamte Cluster auf das vereinfachte Endmodell aus drei Ersatzrohren mit Verbrauchern reduziert werden. Das Ergebnisfeld befindet sich im Bereich M5:S8.

Des Weiteren werden im Bereich W5:AA21 die Gewichtungsfaktoren der Einzelleistungen (Verbrauchsfunktionen) des Endergebnisses eingetragen. Diese sind für die Umrechnung der Verbraucherfunktionen auf die Ersatzverbraucher relevant.

Die Endergebnisse jedes Clusters werden zusätzlich im Tabellenblatt „Ergebnisse“ aufgelistet. Sie können in der Berechnung von weiteren Clustern eingesetzt werden. Aus ihnen wird dann auch das endgültige vereinfachte Netz aufgebaut.

6.1. Kontrollmöglichkeiten

Eine simple Kontrolle der Berechnungsergebnisse kann über einen Vergleich der verbrauchten Leistungen erfolgen: Die Summe aller verbrauchten Leistungen im vereinfachten Teilstück (dies kann der ganze Cluster oder auch nur der in einem Schritt bearbeitete Teil sein) und die Summe der verbrauchten Leistungen im unbearbeiteten Teilstück müssen gleich sein.

Netzvereinfachung					Ergebnis		
1	Teilastnummer: T01				End-Ergebnisrohre		
2					Name	Zeta	Leistung
3							
4							
5							
6					T01_E0		21009,3057563
7					T01_E1	2,7310528755	46328,6466296
8	Eingabe				T01_E2	71,2689471248	1953,71428016
9	Rohre des Netzabschnitts				Gesamtverbrauch 69291,6666667		
10		Name	Knoten[i]	Knoten[j]	Leistungen [W]		
11		T01_HA01	K154	AB138	20143,0556		
12		T01_HA02	K155	AB122	5031,94444		
13		T01_HA03	K157	AB123	5368,05556		
14		T01_HA04	K158	AB125	1868,05556		
15		T01_HA05	K158	AB124	4662,5		
16		T01_HA06	K159	AB126	4183,33333		
17		T01_HA07	K160	AB137	7020,83333		
18		T01_HA08	K162	AB136	3138,88889		
19		T01_HA09	K162	AB135	675		
20		T01_HA10	K164	AB131	890,27778		
21		T01_HA11	K166	AB133	2083,33333		
22		T01_HA12	K166	AB132	4672,22222		
23		T01_HA13	K165	AB134	2315,27778		
24		T01_HA14	K167	AB127	1120,83333		
25		T01_HA15	K168	AB128	965,55556		
26		T01_HA16	K169	AB129	4545,83333		
27		T01_HA17	K169	AB130	516,66667		
28		T01_HA18		#NV			
					Gesamtverbrauch	69291,6666667	

Abbildung 6.3: Überprüfen des Berechnungsergebnisses

Addieren Sie hierzu die Leistungen der drei Ergebnisrohre.

Addieren Sie als Vergleichswert die Summe der Leistungen der Hausanschlüsse des Clusters sowie die Gesamtleistung von einbezogenen Cluster-Ergebnissen.

Die Ergebnisse müssen übereinstimmen.

Auf dem gleichen Weg kann man nur jene Hausanschlüsse und Teilschritt Ergebnisse die in einem Teilschritt verwendet wurden addieren und mit der Summe der Leistungen des Teilabschnittsergebnisses vergleichen.

6.2. Möglichkeiten der Vereinfachung in der Mitte des Netzes

Die Methoden A und B lassen sich immer nur auf Netzen bzw. die Enden von Seitenästen anwenden.

Es gibt hier nur die Möglichkeit kleine Seitenäste mit der Methode A zu vereinfachen.

Es ist nicht notwendig für jeden dieser Seitenäste einen eigenen Cluster anzulegen. Man kann auch in einem Cluster-Tabellenblatt jeden dieser kleinen Seitenäste als eigenen Schritt einzutragen und mit der Methode A berechnen zu lassen. Die Ergebnisse für jeden Seitenast finden sich dann immer direkt neben der Schrittvorgabe. (Also in den orangen Bereichen in M10:S155.)

Das Endergebnis des Clusters muss hier ignoriert werden. *Hinweis:* Es wird jedoch weiterhin automatisch in das „Ergebnisse“-Tabellenblatt übertragen.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
Schritt 2	Methode:	A						Ergebnisrohre						
	Rohre:	HA/HR	R/NR					Name	Länge	Durchmess	s _{st}	s _{iso}	Zeta	Leistung
		T10_HA04	T10_NR03						[m]	[m]	[m]	[m]		
		T10_HA05						T10_02_0						1628,53923
		T10_HA06						T10_02_1	6,33944174	0,03404682	0,00283662	0,00312881	4,25	934,154323
								T10_02_2	8,38099659	0,03042168	0,00257363	0,03105483	3,5	4270,63978
Schritt 3	Methode:	A						Ergebnisrohre						
	Rohre:	HA/HR	R/NR					Name	Länge	Durchmess	s _{st}	s _{iso}	Zeta	Leistung
		Null-Rohr	Null-Rohr						[m]	[m]	[m]	[m]		
		T10_HA08						T10_03_0						0
		T10_HA07						T10_03_1	0,86344719	0,02957631	0,00272102	0,00251813	2,25	4383,33333
								T10_03_2	8,2491635	0,025	0,0023	0,02515	2,25	913,888889

Abbildung 6.4: Ergebnisse der Transformation in Excel

