

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Dynamische Simulation eines Fernwärmenetzes mit Komponenten der Modelica Standard Library

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

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Werner,

Projektass. Dipl.-Ing. Johannes Nagler
und
Projektass. Dipl.-Ing. Thomas Fellner

E302

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Veronika Berg

Matr. Nr.: 0826304
Schopenhauerstraße 43/15
1180 Wien

Wien, im Juli 2015

I Vorwort

An dieser Stelle sei allen gedankt, die mich in meinem Studium begleitet haben: Jenen, die mit eisernem Willen solange mit mir gelernt haben, bis wir gemeinsam die schwierigsten Prüfungen überwunden hatten und jenen, die viel Anteilnahme und Verständnis zeigten, wenn ich mich über Hürden und Unannehmlichkeiten aufgeregt habe.

Weites möchte ich mich bei allen bedanken, die mich beim Abschluss dieser Diplomarbeit begleiteten:

An erster Stelle bedanke ich mich bei Prof. Dr. Andreas Werner für seine Betreuung. Jedes Mal, wenn es nötig war, hat er mich mit seinen Kommentaren zu neuen Ideen inspiriert.

Ein besonderer Dank geht an Dipl.- Ing. Thomas Fellner und Dipl.- Ing. Johannes Nagler, die mir, wann immer ich Fragen hatte, ein offenes Ohr geliehen haben und mich bei allen Herausforderungen dieser Arbeit geduldig unterstützten.

Dank an Anna, Denise, Heinrich, Johanna, Maria, Mario, Moni, Philipp, René und Winnie, die mir mit jeder Menge Beistrichen und anderen Vorschlägen dabei geholfen haben, diese Arbeit auf Papier zu bringen.

Zuletzt sollen meine Eltern genannt werden, die, mit ausgleichender Ruhe und Gelassenheit, den Abschluss dieser Arbeit ermöglicht haben.

II Zusammenfassung

Fernwärmenetze haben in den aktuellen Diskussionen um künftige Energieversorgungssysteme eine große Bedeutung. Beim Bau und beim Betrieb der Netze stellen sich immer wieder Fragen, die durch eine geeignete Simulation kostengünstig beantwortet werden könnten.

Es gibt am Markt mehrere Programmiersprachen und Simulationsprogramme, die für eine Fernwärmenetzsimulation in Frage kommen. Ziel dieser Arbeit war es, die Möglichkeiten der Programmiersprache Modelica auszutesten. Es sollte ein Fernwärmenetz mit Hilfe der, von der Modelica Association kostenfrei zur Verfügung gestellten, Modelica Standard Library modelliert werden. Dabei wurde mit dem kommerziellen Tool Dymola - Dynamic Modeling Laboratory gearbeitet.

Als Vorlage für die Dimensionierung des Netzes, diente das Fernwärmenetzes der Marktgemeinde Großarl in einer vereinfachten Form, bei der Netzabschnitte rechnerisch zusammengefasst wurden.

Die Untersuchung des Modelica-Modells erfolgte in drei Schritten. Zunächst wurden die Komponenten des Fernwärmenetzes aufgebaut und für sich getestet, um sie zum vereinfachten Modell des Fernwärmenetzes Großarl zusammenzufügen. Anschließend wurde, anhand eines unvereinfachten Netzabschnitts mit 15 Verbrauchern, das Modelica-Modell mit einem von Johannes Nagler zur Verfügung gestellten Modell aus MATLAB/Simscape verglichen. In einem letzten Schritt erfolgte der Vergleich des nicht vereinfachten Netzabschnitts mit seiner vereinfachten Version.

Als Vergleichsgrößen dienten einerseits die Rechenzeiten für die Simulation, die besonders für die Anwendung im Netzbetrieb wichtig sind. Andererseits wurden berechnete Zustandsgrößen an verschiedenen Stellen im Netz betrachtet, um die verschiedenen Arten von Modellen zu vergleichen.

Ergebnis war, dass die Komponenten der Modelica Standard Library zu komplex und detailliert sind, um ein großes Fernwärmenetz in geringer Zeit zu simulieren. Die Rechenzeiten sind zu lang, um im laufenden Betrieb Voraussagen über nötige Regelgrößen zu treffen. Auch ist der Aufwand beim Aufbau des Modells, aufgrund der schwierigen Initialisierung, sehr hoch.

Der Vergleich zwischen Dymola und Simscape hat erneut ergeben, dass die Rechenzeiten im Dymola-Modell viel zu lang sind, dafür kann man wesentlich mehr physikalische Größen ohne zusätzlichen Rechenaufwand auswerten. Ein Vergleich der berechneten Zustandsgrößen in den beiden Modellen hat gezeigt, dass die Ergebnisse meist ausreichend übereinstimmen. Die Abweichungen liegen bei ca. 1%. Ausnahme bilden die Wärmeverluste über die Rohrwand und Folgefehler aus diesen.

Auch der Vergleich der Simulation eines originalen Netzabschnitts mit seiner vereinfachten Variante, liefert gute Übereinstimmungen der Zustandsgrößen Temperatur und Druck. Hier liegen die Abweichungen unter 0,3%. Die berechneten Massenströme bilden eine Ausnahme, mit stellenweisen Abweichungen bis zu 4%.

III Abstract

The discussion on future energy supply systems often leads to the topic of district heating. The simulation of district heating networks is beneficial for their operation and design.

There are several programming languages and tools which could be used for building a model of a district heating network. This thesis aimed at building a model in the Modelica modeling language, using Dymola – Dynamic Modeling Laboratory as simulation environment. For the components of the model, the open source Modelica Standard Library should be applied.

It is a model of the district heating network in Großarl. For simplification the dimensions of parts of the network were merged into a simpler model in advance.

The model was built in three steps: At first the necessary components were assembled and tested. In a second step the model of one sector of the network, composed of 15 consumers, was compared to an equivalent model built in MATLAB/Simscape. Here, the original dimensions were used. At last this small model was compared to its simplified version.

For comparison the CPU-time for simulation was used. Furthermore several state variables served for comparing the different model types.

The experiments showed, that the components of the Fluid library appeared to be too complex for simulating a large pipe network. Computing the model takes far too long and therefore it can not be used in operational applications.

Due to faster calculations, the Simscape model is superior to the Dymola model. But the Dymola model has an advantage, regarding its capability to evaluate many more parameters of the fluid dynamics, without the need of further calculations. The deviation between the calculated state variables of the two models was mostly below 1%. Only the calculation of the heat losses in pipes differed more.

The simplified version and its original model of 15 consumers behaved in a similar way. The deviations of temperature and pressure are below 0,3%. But the calculated mass flow partially differed up to 4%.

IV Inhaltsverzeichnis

I Vorwort.....	i
II Zusammenfassung.....	ii
III Abstract.....	iii
IV Inhaltsverzeichnis.....	iv
V Nomenklatur.....	vii
1 Einleitung.....	1
2 Fernwärme.....	2
2.1 Bedeutung.....	2
2.1.1 Fernwärmesysteme allgemein.....	2
2.1.2 Fernwärme in Österreich.....	3
2.2 Aufbau eines Fernwärmesystems.....	3
2.2.1 Einteilung von Fernwärmenetzen.....	4
2.2.2 Regelungskonzepte für die Netzpumpe(n).....	5
2.3 Das Fernwärmenetz in Großarl.....	6
3 Modellierung des Verbraucherverhaltens.....	8
4 Die Programmiersprache Modelica.....	13
4.1 Grundlegende Eigenschaften und Geschichte.....	13
4.2 Bibliotheken.....	14
4.3 Simulationsumgebungen.....	15
5 Das Simulationsprogramm Dymola.....	16
5.1 Besonderheiten von Dymola.....	16
5.1.1 Dymola aus Anwendersicht.....	16
5.1.2 Dymola auf Simulationsebene.....	17
5.2 Lösungsalgorithmen.....	18
6 Das Modell.....	20
6.1 Thermodynamik und Strömungslehre.....	20
6.1.1 Wärmeverlust über die Rohrwand.....	20
6.1.2 Druckverlust über die Rohrlänge.....	22
6.1.3 Rohrleitungswiderstand durch Krümmer.....	23
6.2 Komponenten der Modelica Standard Library.....	24
6.2.1 FixedBoundary.....	24
6.2.2 MassFlowSource_T.....	24
6.2.3 DynamicPipe.....	24
6.2.4 SimpleGenericOrifice.....	25
6.2.5 ThermalConductor.....	26
6.2.6 FixedTemperature.....	26
6.2.7 PrescribedHeatFlow.....	26
6.2.8 CombiTimeTable.....	26
6.2.9 Limiter.....	27
6.2.10 RealOutput.....	27
6.2.11 System.....	27
6.2.12 StandardWater.....	27
6.3 Weitere Bauteile.....	28
6.3.1 Valve_mFlow.....	28
6.3.2 Massenstromberechnung.....	28

IV Inhaltsverzeichnis

6.4 Untermodelle und zusammengefügte Bauteile.....	29
6.4.1 Hauptleitungsrohr.....	29
6.4.2 Verbraucher.....	30
6.4.3 Teilast.....	31
7 Netzvereinfachung.....	33
7.1 Methode nach Larsen et al.....	33
7.1.1 Einklappen der Rohrverzweigungen.....	33
7.1.2 Zusammenlegen der Knoten.....	34
7.2 Umsetzung der Transformation.....	35
8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau.....	36
8.1 Einstellung des Solvers.....	36
8.1.1 General.....	36
8.1.2 Translation.....	36
8.1.3 Output.....	36
8.2 Zur Verfügung stehende Rechnerleistung, verwendete Programme.....	37
8.3 Funktionstüchtigkeit der Komponente Hauptleitungsrohr.....	37
8.3.1 Versuchsbeschreibung.....	37
8.3.2 Ergebnisse.....	39
8.4 Funktionstüchtigkeit der Komponente Verbraucher.....	39
8.4.1 Versuchsbeschreibung kleines Modell.....	39
8.4.2 Ergebnisse kleines Modell.....	40
8.4.3 Ergebnisse erweitertes Modell.....	43
8.5 Funktionstüchtigkeit der Komponente Teilast.....	46
8.5.1 Versuchsbeschreibung Einzeläste.....	46
8.5.2 Ergebnisse Einzeläste.....	47
8.5.3 Versuchsbeschreibung mehrere Teiläste.....	48
8.5.4 Ergebnisse mehrere Teiläste.....	48
8.6 Funktionstüchtigkeit vollständige Netzstruktur.....	49
8.6.1 Versuchsbeschreibung kleines Modell.....	49
8.6.2 Ergebnisse kleines Modell.....	50
8.7 Diskussion der Ergebnisse des schrittweisen Netzaufbaus.....	50
9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung.....	53
9.1 Vergleich Dymola mit Simscape.....	54
9.1.1 Vergleich der Rechenzeiten.....	55
9.1.2 Vergleich der Massenströme.....	55
9.1.3 Vergleich der Drücke.....	56
9.1.4 Vergleich der Temperaturen.....	57
9.1.5 Vergleich der Verluste über ein Rohr.....	58
9.2 Vergleich 15 Verbraucher mit vereinfachtem Teilast T11.....	61
9.2.1 Vergleich der Rechenzeiten.....	61
9.2.2 Vergleich der Massenströme.....	62
9.2.3 Vergleich der Drücke.....	64
10 Fazit.....	67
11 Quellenverzeichnis.....	68
12 Abbildungsverzeichnis.....	70
13 Anhang.....	72
13.1 Anhang A: Arbeiten mit Modelica: Hürden und Tipps.....	72

IV Inhaltsverzeichnis

13.1.1 Wahl der Startwerte.....	72
13.1.2 Verzweigung von DynamicPipes.....	73
13.1.3 Auslesen von Zustandsgrößen von DynamicPipes.....	73
13.1.4 Arbeiten an der oberen Belastungsgrenze des PCs.....	73
13.1.5 Lange Tabellen auslesen.....	74
13.2 Anhang B: Simulationsergebnisse.....	77
13.2.1 Vergleich Dymola mit Simscape.....	77
13.2.2 Vergleich 15 Verbraucher mit vereinfachtem Seitenast T11.....	86
13.3 Anhang C: Rohrgeometrien.....	90

V Nomenklatur

Variable:

A	... Fläche	[m ²]
α	... Wärmeübergangskoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
c_p	... spezifische isobare Wärmekapazität	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
ζ	... Rohrwiderstandsbeiwert	[-]
d	... Durchmesser	[m]
D	... Durchmesser oder Ersatzdurchmesser	[m]
ϑ	... Temperatur	[°C]
G	... Wärmedurchgangszahl für Modelica	[W K ⁻¹]
h	... spezifische Enthalpie	[J kg ⁻¹]
H	... Enthalpiestrom	[W]
ΔH	... Enthalpiedifferenz	[W]
k	... Wärmedurchgangskoeffizient	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
K	... eine Zustandsgröße	
K_T	... Korrekturfaktor für Rohrtoleranzen	[-]
L	... Länge	[m]
λ_i, \check{k}	... Wärmeleitfähigkeit der Schicht i	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_R	... Rohrreibungszahl	[-]
m°	... Massenstrom	[kg s ⁻¹]
p	... Druck	[Pa]
Δp	... Druckdifferenz	[Pa]
Q°, Q_{flow}	... Wärmestrom	[W]
r	... Radius	[m]
ρ	... Dichte	[kg m ⁻³]
s	... Dicke	[m]
T	... Temperatur	[K]
ΔT	... Temperaturdifferenz	[K]
v	... mittlere Geschwindigkeit	[m s ⁻¹]
w_A	... Durchflussgeschwindigkeit am Anfang	[m s ⁻¹]
Z	... Anzahl	[-]
Ω	... Wärmedurchgangswiderstand	[K W ⁻¹]

Indizes:

VL	... Vorlauf
RL	... Rücklauf
St	... Stahl
iso	... Isolierschicht
i	... Innen
a	... Außen
ein	... Eintritt
aus	... Austritt

1 Einleitung

Fernwärmenetze haben in den aktuellen Diskussionen um künftige Energieversorgungssysteme eine große Bedeutung. Beim Bau und beim Betrieb der Netze stellen sich immer wieder Fragen, die durch eine geeignete Simulation kostengünstig beantwortet werden könnten.

Viele Betreiber steuern ihre Netze anhand von Wetterprognosen und Voraussagen über den Wärmebedarf der Verbraucher. Falls sich größere Änderungen im Verbrauch ankündigen (z. B. Zuschalten eines neuen Großverbrauchers), kann eine Simulation helfen, vorausschauend den Durchfluss und die Vorlauftemperaturen soweit anzupassen, dass alle Kunden sicher versorgt sind und trotzdem keine Energie verschwendet wird.

Eine andere Anwendung ist das Testen von geplanten Netzbauten. Man kann im Vorhinein simulieren, ob Ringschlüsse, der Einbau von weiteren Pumpen im Netz etc., zur Optimierung des Netzes beitragen würden. Vor der Investitionsentscheidung bietet sich eine Simulation, zum Austesten der Vorteile des Umbaus, an.

Es gibt am Markt mehrere Programmiersprachen und Simulationsprogramme, die für eine Fernwärmenetzsimulation in Frage kommen. Ziel dieser Arbeit war es, die Möglichkeiten der Programmiersprache Modelica auszutesten. Es sollte ein Fernwärmenetz mit Hilfe der, von der Modelica Association kostenfrei zur Verfügung gestellten, Modelica Standard Library modelliert werden.

Dabei wurde mit dem kommerziellen Tool Dymola - Dynamic Modeling Laboratory gearbeitet. Ursprünglich sollte die Simulation mit der Open-Source-Software OpenModelica durchgeführt werden. Leider waren die Fluid- und Medium-Bibliotheken zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht ausreichend in OpenModelica implementiert. Sobald das geschieht, könnte man einen weiteren Versuch starten, nur mit Open-Source-Mitteln ein Fernwärmenetz zu modellieren.

Als Vorlage für die Dimensionierung des Netzes, diente das Fernwärmenetz der Marktgemeinde Großarl. Es handelt sich um ein Strahlennetz mit 17 km Länge. Im Zuge der Diplomarbeit von Johannes Nagler: „Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simulink“ (Juli 2014), wurde dieses Netz bereits in MATLAB/Simulink modelliert. Dafür wurde eine Netzvereinfachung vorgenommen.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Untersuchung des Modelica-Modells in drei Schritten. Zunächst wurden die Komponenten des Fernwärmenetzes aufgebaut und für sich getestet, um sie zum vereinfachten Modell des Fernwärmenetzes Großarl zusammenzufügen. Anschließend wurde, anhand eines unvereinfachten Netzabschnitts mit 15 Verbrauchern, das Modelica-Modell mit dem Simulink-Modell von Johannes Nagler verglichen. In einem letzten Schritt erfolgte ein Vergleich des nicht vereinfachten Netzabschnitts mit seiner vereinfachten Version.

Als Vergleichsgrößen dienten einerseits die Rechenzeiten für die Simulation, die besonders für die Anwendung im Netzbetrieb wichtig sind. Andererseits werden berechnete Zustandsgrößen an verschiedenen Stellen im Netz betrachtet, um die verschiedenen Arten von Modellen zu vergleichen.

2 Fernwärme

2.1 Bedeutung

Um auf die Frage: „Was ist Fernwärme?“, zu antworten soll hier eine relativ alte, aber teilweise immer noch gültige Definition von Jacobs und Klein zitiert werden: „Die zentrale Erzeugung und Verteilung von Wärme zur Beheizung und Brauchwassererwärmung von Wohnungen, gewerblichen Betrieben und Industrieanlagen wird als Fernwärme bezeichnet.“ (Redaktion: Klaus Günter Jacobs, Helmut Klein: Fernwärmeversorgung mit Wärme-Kraft-Kopplung; Fernwärme. Umschau Verlag Breidenstein KG, Frankfurt am Main, 1977 [S.31].)

Heutzutage ist dieses Grundkonzept der Wärmeverteilung immer noch gültig. Die Wärmebereitstellung muss jedoch nicht zwingend rein zentral erfolgen. So kann entweder an einem Ort effizient (im energetischen und ökonomischen Sinn) Wärme produziert werden und/oder man kann von verschiedenen Stellen, ansonsten ungenutzte Restwärme sammeln und diese von anderen Verbrauchern nutzen lassen.

2.1.1 Fernwärmesysteme allgemein

Lund et al. versuchen in ihrer Arbeit [3] ein Bild eines Fernwärmenetzes der Zukunft zu gestalten. Zuvor geben sie einen Überblick über die Geschichte von Fernwärmenetzen: Fernwärmenetze gibt es seit Ende des 19. Jahrhunderts. Mittlerweile wird die vierte Generation von Fernwärmenetzen entwickelt.

Bei der ersten Generation wurde als Transportmedium Wasserdampf eingesetzt. Mit den hohen Temperaturen ging ein großer Wärmeverlust beim Transport einher. Außerdem bestand die Gefahr der Rohrleitungsexplosion. Ein paar Netze aus dieser Zeit bestehen noch heute.

Ab den 1930er Jahren beginnt der Übergang zu Heißwassernetzen, der sogenannten zweiten Generation. Hier wurde Wasser unter Druck und mit Temperaturen über 100°C eingesetzt.

Ab den 1970er Jahren spricht man von der dritten Generation. Es wird weiterhin Druckwasser eingesetzt, jedoch mit immer geringeren Temperaturen. Die meisten derzeit bestehenden und auch das in dieser Arbeit modellierte Fernwärmenetz, zählen zu dieser Gruppe.

Die zukünftige vierte Generation von Fernwärmenetzen soll nach Lund et al. [3] die Basis für nachhaltige Energiesysteme sein und sich in sogenannte „smarte“ Konzepte eingliedern. Sie soll Niedrigtemperaturwärme liefern, die für die Beheizung von Niedrigenergiehäusern, sowie von bestehenden, thermisch sanierten Gebäuden geeignet ist. Es sollen möglichst geringe Netzverluste erzielt werden. Als Wärmelieferanten sollen Niedrigtemperaturquellen und erneuerbare Energiequellen wie Solarthermie und Geothermie genutzt werden können. Die Netze sollen in smarte Energiesysteme integriert werden, also gemeinsam mit intelligenten Stromnetzen arbeiten. Weiters sollen auch ökonomische Aspekte berücksichtigt werden.

Bei der Diskussion über zukünftige Fernwärmenetze wird öfters die Befürchtung geäußert, dass bei einem zurückgehenden Wärmebedarf, der Einsatz von Fernwärme ökonomisch nicht mehr sinnvoll ist. Persson und Werner [4] beschreiben in ihrer Studie vier Kostenfaktoren für Fernwärme: Netzinvestitionskosten, wie die Baukosten des Verteilernetzes, Wärmetransportkosten aus Wärmeverlusten, Wärmetransportkosten aus Druckverlusten

2 Fernwärme

sowie Betriebs- und Erhaltungskosten. Zwar ist der Netzausbau in dicht besiedelten Stadtzentren komplizierter und teurer als in weniger eng bebauten Gegenden. Trotzdem kommen die Autoren zu dem Schluss, dass sich (auch in Zukunft) der Ausbau von Fernwärme in Gebieten mit hoher bis sehr hoher Wärmeabnahmedichte rentiert.

In wenig besiedelten Gebieten ist der Einsatz von Fernwärme, schon bei heutigen Bedingungen, nur unter Umständen sinnvoll. Bei einem, im Vergleich zu heute, reduzierten Wärmebedarf ist der Einsatz von individuellen Wärmeerzeugern günstiger.

2.1.2 Fernwärme in Österreich

Nach Angaben des Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft [5] zählt Fernwärme zu den boomenden Wirtschaftszweigen. Im Jahr 2012 wurden ca. 23 TWh Fernwärme erzeugt. Davon waren 21 TWh der energetische Endverbrauch. Die versorgte Trassenlänge betrug 4603 km und wird beständig ausgebaut. Es wurden 22% aller Wohnungen mit Nah- oder Fernwärme versorgt. Der Großteil der gelieferten Energie (ca. 65%) kommt von Kraft-Wärmekopplungsanlagen.

Das in dieser Arbeit betrachtete Fernwärmenetz befindet sich in der Gemeinde Großarl im salzburger Pongau.

2.2 Aufbau eines Fernwärmesystems

Ein Fernwärmesystem besteht aus drei verschiedenen Arten von Teilsystemen. Den Wärmeerzeugern, dem Verteilungsnetz und den Verbrauchern. In dieser Arbeit wird nur das Verteilungsnetz modelliert. Der Wärmeerzeuger und die Verbraucher werden von möglichst einfachen Ersatzkomponenten repräsentiert.

Gern genannte Wärmeerzeuger für Fernwärmesysteme sind auch in einer Übersicht bei isoplus Fernwärmetechnik [6] zu finden. Hierzu zählen Kraft-Wärmekopplungsanlagen, bei denen die „Abwärme“ aus der Stromerzeugung genutzt wird, sowie Müllverbrennungsanlagen. Vorteile der zentralen Wärmeproduktion sind ein hoher Wirkungsgrad und die Möglichkeit große Abgasreinigungsanlagen zu betreiben. Große Wärmespeicher können Schwankungen in der Wärmeerzeugung und Lastspitzen abpuffern.

Nach isoplus Fernwärmetechnik [7] ist ein typisches Fernwärmenetz aus gut isolierten Rohrleitungen aufgebaut. Der Hauptleitungsstrang besteht meist aus zwei parallelen Rohren, einem Vorlaufrohr und einem Rücklaufrohr. Vom Vorlauf zweigen kleinere Leitungen ab und führen zu den eigentlichen Verbrauchern und von diesen zurück zum Rücklauf. Als Rohrmaterial wird meist Kunststoff, aber auch Weichstahl, vernetztes Polyethylen oder Kupfer (letztere Rohre sind biegsam) eingesetzt. Diese werden von einer Isolierschicht und anschließend von einem Mantelrohr (ebenfalls aus Kunststoff) umgeben.

Beim Verbraucher befindet sich eine Wärmeübergabestation mit Wärmetauschern, die den Fernwärmekreislauf und den Hauskreislauf trennt. In hier erstelltem Modell wird diese Übergabestation durch einen Punkt mit Wärmeabnahme und einer vorgegebenen Verbraucherefunktion ersetzt.

2.2.1 Einteilung von Fernwärmenetzen

Nach Hakansson [8] gibt es verschiedene Möglichkeiten Fernwärmenetze zu klassifizieren:

- 1 Nach der Trassenführung
 - 1.1 Unterirdisch
 - 1.2 Oberirdisch auf Geländehöhe
 - 1.3 Oberirdisch auf Brückenkonstruktionen

Die unterirdische Führung wird hier bevorzugt, da die Leitungen nicht mit dem Verkehr kollidieren. Allerdings sind sie dadurch schwerer zugänglich und die Verlegekosten sind höher. Weiters muss beim Verlegen beachtet werden, welche Abstände zu anderen Leitungen wie Strom oder Gas notwendig sind, welchen Einfluss die Abwärme auf die Umgebung hat und welche Belastungen auf das umliegende Erdreich und damit auf die Leitungen wirken (z. B. Erschütterungen durch Straßenverkehr,...)

- 2 Nach dem Transportmedium und dessen Zustand
 - 2.1 Dampfsysteme
 - 2.2 Heißwasser mit $T > 100\text{ °C}$
 - 2.3 Warmwasser mit $T < 100\text{ °C}$

Je heißer das Medium desto höher die thermische Belastung der Rohrleitungen. Mit höheren Temperaturen gehen meist auch höhere Drücke einher. Die Wärmeverluste über das Leitungsnetz steigen in erster Linie mit der Mediumtemperatur an. Insofern werden heute vor allem Warmwassernetze gebaut. Andere Systeme sind jedoch noch in Betrieb.

- 3 Netzsysteme

- 3.1 Strahlennetz

Eine oder mehrere Leitungsstränge gehen vom Heizwerk weg. Von ihnen gibt es Verbindungen zu den Abnehmern. Jeder Leitungsstrang verläuft separat. Beim Fernwärmenetz in Großarl handelt es sich um ein Strahlennetz.

- 3.2 Ringnetz

Hier verläuft der Hauptleitungsstrang im Kreis. An ihn sind die Leitungen zu den Verbrauchern angeschlossen. Es können ein oder mehrere Heizwerke im Ring integriert werden. Vorteil ist, dass jeder Verbraucher von zwei Seiten aus versorgt werden kann und somit bei Reparaturarbeiten nur ein kleiner Teil der Verbraucher unversorgt bleibt. Diese Art ist besonders für große Netze geeignet.

- 3.3 Vermaschtes Netz

Hier gibt es zusätzlich zum Hauptring mehrere Querverbindungen im Netz. Dadurch gibt es noch mehr Möglichkeiten die einzelnen Abnehmer bei Ausfällen zu versorgen. Dieses System findet vor allem in Gebieten mit sehr hoher Wärmeabnahmedichte Anwendung.

4 Anzahl der Leitungen

4.1 Einleitersystem

Hier gibt es nur einen einzelnen Rohrstrang vom Heizwerk weg. Meist handelt es sich hier um Dampfleitungen. Nachdem die Wärme abgenommen wurde, wird das Kondensat des Dampfes ins Abwassersystem geleitet. Diese Variante ist sehr selten. Einerseits muss das Kondensat ausreichend abkühlen bevor es ins Abwassersystem geleitet werden kann, andererseits ergibt sich ein ständiger Bedarf an geeignetem Frischwasser.

4.2 Zweileitersystem

Ein Vorlauf führt vom Heizwerk weg, Ein Rücklauf zum Heizwerk zurück. Die Verbraucher entnehmen dem Vorlauf einen Teilmassenstrom. Dieser wird nach Wärmeübergabe in den Rücklauf geleitet. Es geht im Normalfall kein Wasser verloren.

Beim, in dieser Arbeit betrachteten, Netz, handelt es sich um ein Zweileitersystem.

4.3 Dreileitersystem

Hier gibt es zwei Vorlaufstränge, die Wasser mit verschiedenen Temperaturen führen. Das ist sinnvoll, wenn verschiedene Abnehmer (z. B. Industrieabnehmer und Haushalte) verschiedene Vorlauftemperaturen benötigen. Es gibt ein gemeinsames Rücklaufrohr. Daher müssen die Drücke in beiden Vorlaufleitungen gleich sein.

4.4 Vierleitersystem

Auch dieses System kommt zur Anwendung, wenn verschiedene Vorlauftemperaturen benötigt werden. Wenn zusätzlich verschiedene Drücke in den Vorlaufsträngen herrschen, ist jeweils ein separater Rücklauf notwendig. Es handelt sich also eigentlich um zwei Stränge die gemeinsam verlegt werden.

2.2.2 Regelungskonzepte für die Netzpumpe(n)

Um den Durchfluss im gesamten Fernwärmenetz aufrecht zu erhalten wird eine Druckdifferenz als treibende Kraft benötigt. Zur Aufrechterhaltung der notwendigen Druckdifferenz dient die Pumpe (oder die Pumpen) im Fernwärmenetz. Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Durchfluss in einem Fernwärmenetz zu regeln.

Kunst und Geck erwähnen in ihrer Arbeit [9] zwei verschiedene Grundideen zur Pumpenregelung. Einerseits die kontinuierliche Regelung der Druckspreizung durch Drehzahlverstellung, auch „Schlechtpunktregelung“ genannt und die Drehzahlführung anhand der Außentemperatur und/oder dem Volumenstrom.

Bei der Schlechtpunktregelung soll sichergestellt werden, dass am Schlechtpunkt, dem vom Druckniveau aus betrachtet, vom Heizwerk entlegensten Verbraucher, immer eine Mindestdruckdifferenz, zwischen Vor- und Rücklauf, aufrecht erhalten bleibt. Dadurch soll garantiert werden, dass dieser Verbraucher, auch bei sehr hoher Wärmeabnahme im Gesamtnetz, auf ausreichend Heizenergie zugreifen kann. Es wird die Druckspreizung am Schlechtpunkt gemessen und über einen Soll-/Ist-Vergleich durch Ansteuerung der Pumpe geregelt. In der realen Umsetzung wird jedoch häufig auf die Messung und Fernsteuerung außerhalb des Heizwerks verzichtet. Stattdessen wird von der Druckdifferenz im Heizwerk auf die Druckdifferenz am Schlechtpunkt hochgerechnet und dieser Wert als Regelgröße

2 Fernwärme

eingesetzt.

In der zweiten Regelungsvariante wird auf den ständigen Soll-Ist-Vergleich zwischen Pumpe und Schlechtpunkt-Spreizung verzichtet. Das ist durchaus zulässig. Es werden Einflussgrößen wie die Witterungsverhältnisse beobachtet und von diesen eine Vorgabe für die Drehzahlführung abgeleitet. Da der Wärmebedarf in einem engen Zusammenhang mit den Witterungsbedingungen steht, funktioniert diese „blinde Fahrweise“ durchaus. Es sollte jedoch gelegentlich nachjustiert werden. Auch Netzbauten müssen hier berücksichtigt werden. Die reine außentemperaturabhängige Drehzahlführung ist das einfachste Konzept. Sie kann auch um eine volumenstromabhängige Drehzahlführung ergänzt werden.

Im hier erstellten Modell wird eine Schlechtpunktregelung angenommen. Dazu wird am Eintritt und Austritt des Verbrauchers im Schlechtpunkt, jeweils ein konstanter Druck als Randbedingung vorgegeben. Die Differenz zwischen den beiden Drücken garantiert die gewünschte Druckspreizung am Schlechtpunkt. Zusätzlich gibt es am Netzanfang, beim „Heizwerk“, eine Quelle und eine Senke, bei denen ein Massenstrom, der in den Netzzvorlauf fließt, bzw. aus dem Netzzrücklauf zurück kommt, vorgegeben wird. Diese Massenströme werden aus der Summe der Massenstromvorgaben für die Verbraucher gebildet. Der Druckverlauf über das gesamte Netz ergibt sich dann, ausgehend von den Drücken am Schlechtpunkt, durch die Vorgaben für den Durchfluss in allen Rohren.

2.3 Das Fernwärmenetz in Großarl

Großarl liegt im Bezirk St. Johann (Pongau) in Salzburg. Die Marktgemeinde umfasst 3.807 Einwohner, [10].

Die Hackschnitzel- und Heizgenossenschaft reg.Gen.m.b.H. betreibt das dortige Fernwärmenetz. Sie beschreibt das Netz folgendermaßen [11], [12]: 1988 wurde das Fernwärmenetz Großarl errichtet und in Betrieb genommen. Ziel war die Wärmeversorgung mit Biomasse. Aus der ersten Ausbaustufe stammen zwei Biomassekessel mit 1,5 MW bzw. 3,5 MW thermischer Leistung. Hinzu kam ein Spitzenlastkessel von 5,7 MW, der mit Heizöl-Extra-Leicht befeuert wird. In späteren Jahren wurde die Anlage durch eine Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage auf Basis eines Organic Rankine Cycle-Prozesses (ORC-Prozess) erweitert. Diese wurde für 3,5 MW thermische und 600 kW elektrische Energie ausgelegt.

Als Brennstoff für die Biomassekessel dient Holz in Form von Rinde, Hackschnitzel, Sägespäne und Waldhackgut.

Zur Rauchgasreinigung gibt es pro Kessel einen Multizyklon. Diese werden durch eine Rauchgaskondensationsanlage inklusive Wärmerückgewinnung ergänzt.

Zusätzlich wird eine Holz Trocknungsanlage betrieben.

Das Fernwärmenetz selbst besteht aus hochfrequenzgeschweißten Stahlrohren, die mit Polyurethan-Hartschaum isoliert werden. Rohre und Isolierung sind in ein HDPE-Mantelrohr eingebettet. Die vorisolierten Rohre sind für die direkte Erdverlegung geeignet. Die Rohre werden in mindestens 1 m Tiefe, thermisch vorgespannt verlegt.

Das Netz ist derzeit 17 km lang und versorgt 250 Kunden. Die Strömungsgeschwindigkeit in den Hauptsträngen beträgt ca. 1,2 – 2,0 m/s.

2 Fernwärme



Abbildung 1: Johannes Nagler: Fernwärmenetz Großarl, rot: Heizwerk, blau: Schlechtpunktverbraucher

Johannes Nagler: *Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape; Institut für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien; Wien, Juli 2014, S.8*

3 Modellierung des Verbraucherverhaltens

Eine Herausforderung bei der Simulation und Regelung von Fernwärmenetzen, ist die Vorhersage des Wärmebedarfs im Netz. Während sich Wärmeverluste über die Rohrleitungen hinweg, bei bekannten Netzgeometrien und einer sinnvollen Prognose für die Außentemperatur berechnen lassen, ist das Konsumentenverhalten eine stochastische und daher schwer vorhersagbare Einflussgröße. Wenn dem Netz größere Energiemengen zugeführt werden, dann steigt bei gleich bleibendem Verbrauch die Rücklauftemperatur. Das führt zu höheren Abgasverlusten und ist somit aus prozesstechnischer und ökonomischer Sicht schlecht für das Fernwärmeunternehmen. Ist die Temperatur im Vorlauf zu gering, bekommen das vor allem die Verbraucher an der Netzperipherie zu spüren. Es kann bewirken, dass die vorhandene Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf nicht mehr ausreicht, um trotz vollständig geöffneter Ventile, die Heizaufgabe zu erfüllen. Das führt wiederum zu unzufriedenen Kunden, die gegebenenfalls auf eine alternative Wärmeversorgung umsteigen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die gelieferte Wärmemenge zu erhöhen. Man kann die Temperaturspreizung am Verbraucher vergrößern, indem man die Vorlauftemperatur erhöht, beziehungsweise auf eine niedrigere Rücklauftemperatur abkühlt. Eine weitere Möglichkeit ist den Massenstrom zu steigern. Änderungen der Vorlauftemperatur werden jedoch, je nach Netzgröße, nur sehr langsam an die Endverbraucher weitergegeben. Insofern müssen Fernwärmebetreiber versuchen das Verhalten ihrer Kunden vorauszusagen.

Auch in dieser Arbeit ist es notwendig das Verbraucherverhalten zu modellieren. Es wird dem Netzmodell in Form von Verbraucherfunktionen, also als Wärmeabnahme über die Zeit, vorgegeben.

Untersuchungen zur Modellierung des elektrischen und/oder thermischen Energieverbrauches unterscheiden sich unter Anderem im Detaillierungsgrad.

Dotzauer stellt in [13] ein einfaches Modell für ein Fernwärmenetz vor, bei dem die Last des gesamten Netzes, zusammengefasst vorausgesagt wird. Er geht von der oft vertretenen Meinung aus, dass der Wärmebedarf in erster Linie von der Außentemperatur und dem Konsumentenverhalten abhängt. Wind und Sonneneinstrahlung sowie andere Wetterbedingungen werden als vernachlässigbar angesehen. Dementsprechend setzt sich die entwickelte Verbraucherfunktion aus einem temperaturabhängigen Teil und einer Sozialkomponente zusammen. Die Temperatur wird anhand von Wettervorhersagen abgeschätzt. Bei der sozialen Komponente geht man von einer Verbrauchskurve aus, die sich in einem wöchentlichen Rhythmus wiederholt. Es wurde ein Wochenrhythmus und kein Tagesrhythmus gewählt, um das unterschiedliche Verhalten an Werktagen und Wochenenden in die Voraussage einzubeziehen. Die Funktion wurde anhand von Messdaten kalibriert. Der Autor argumentiert, dass ein einfaches Modell vor allem dann sinnvoller als ein komplexes ist, wenn nur wenige Daten über das Netz vorliegen. Das ist häufig der Fall, wenn nur beim Wärmeerzeuger Messdaten vorliegen, nicht aber bei den einzelnen Wärmeabnehmern.

Es gibt auch Untersuchungen, die der Annahme, dass Wetterbedingungen für den Wärmeverbrauch nicht relevant sind, widersprechen. Wojdyga hat, um ein Beispiel zu nennen, hierzu einen Artikel veröffentlicht [14]. Bei seinen Untersuchungen liegt der Fokus auf dem Wärmeverbrauch einzelner Gebäude. Es wird der Einfluss von Windgeschwindigkeiten und Sonneneinstrahlung betrachtet. Ergebnis ist, dass beide Faktoren einen Einfluss auf den Wärmebedarf haben, wobei jener der Sonneneinstrahlung als stärker bewertet wird. Der

3 Modellierung des Verbraucherverhaltens

Einfluss ist laut Wojdyga [14] jedoch geringer, als jener der Außentemperatur. Wind bewirkt eine Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten zur Außenwand sowie einen erhöhten Luftaustausch. An sonnigen Tagen ist die Strahlungswärme, die besonders durch Glasflächen eintritt relevant. Zusätzlich wird in der Arbeit darauf hingewiesen, dass der Einfluss des Wetters stark von der Isolierung des Gebäudes abhängt. Insofern wird er immer schwächer je mehr man sich modernen Passivhausstandards annähert.

Swan und Ugursal haben sich mit diversen Möglichkeiten auseinandergesetzt, den Energiebedarf (Wärme und Strom) einzelner Verbraucher, in Form von Wohnhäusern, zu modellieren. In ihrer Arbeit [15] geben sie einen Überblick über verschiedene Veröffentlichungen zu dem Thema, unterteilen sie nach Herangehensweise und beleuchten die jeweiligen Vor- und Nachteile.

Sie sehen bei der Untersuchung von Wohnhäusern mehrere Schwierigkeiten. Einerseits die Inhomogenität des Gebäudebestands, der eine Vielzahl von Größen und Formen umfasst. Auch die Qualität der Isolierung ist verschieden. Andererseits variiert das Verhalten der Konsumenten stark. Hinzu kommen Schwierigkeiten bei der Sammlung von Daten, da es sich dabei, bis zu einem gewissen Grad, um ein Eindringen in die Privatsphäre handelt. Weiters sind nur bei wenigen Haushalten Messgeräte installiert. Diese aufzubauen ist mit größeren Kosten verbunden.

Als eine Datenquellen nennen Swan und Ugursal [15] Informationen über die physikalischen Eigenschaften der Wohnhäuser und besonders ihrer Außenhülle, welche entweder durch eine visuelle Bestandsaufnahme oder durch statistische Abschätzungen aus Untersuchungen zum Alter des Baubestands, kombiniert mit amtlich erfassten Daten über Neubauten und Renovierungsprojekte, ermittelt werden können. Interessant sind auch Statistiken zum Besitz von Geräten unterschiedlicher Art, in durchschnittlichen Haushalten. Diese sind besonders beim Stromverbrauch wichtig. Weiters verweisen Swan und Ugursal [15] auf Daten zum Energieverbrauch, die vor allem vom Fernwärmeunternehmen, über monatliche Verrechnungen bei einzelnen Kunden zur Verfügung gestellt werden können. Alternativ kann man auf staatliche Hochrechnungen zum Energieverbrauch und Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch zurückgreifen. Die detailliertesten Daten würde man durch Messungen direkt bei den einzelnen Verbrauchern erhalten. Das ist möglich, jedoch mit einem großen Kostenaufwand verbunden.

Je nachdem welche Daten zur Verfügung stehen empfehlen Swan und Ugursal [15] verschiedene Energieverbrauchsmodelle. Sie unterscheiden folgende Modelltypen:

- Top-Down Modelle (von oben nach unten)
- Bottom-Up Modelle (von unten nach oben) mit statistischen Methoden
- Bottom-Up Modelle (von unten nach oben) mit ingenieurstechnischen Methoden.

Mit Top-Down werden hier jene Modelle beschrieben, die von statistischen Gesamtwerten ausgehen und auf den Einzelverbraucher rückschließen. Solche Daten können zum Beispiel makroökonomische Indikatoren, Klimadaten oder Daten über Neubauten sein. Es handelt sich vor allem um historische Daten. Mit den Modellen werden Voraussagen über den nationalen Energieverbrauch getroffen oder der Einfluss von Markt- und Preisänderungen auf das Konsumentenverhalten. Man muss dabei sogenannte „irreversible Technologiesprünge“, bei denen die Effizienz durchgehend verbessert wird, berücksichtigen.

3 Modellierung des Verbraucherverhaltens

Als Vorteile der Top-Down Modelle nennen Swan und Urgusal [15], dass diese einfach zu entwickeln sind und mit wenigen Informationen auskommen. Ein Nachteil ist, dass sie nur auf historischen Daten basieren und bei „plötzlichen“ Veränderungen nur langsam oder zeitverzögert reagieren. Sie machen auch keine Angaben über einzelne Verbraucher. Diese Modelle sind also für Langzeitbetrachtungen geeignet.

Bei Bottom-Up Modellen wird meist nur ein kleineres Gebiet, wie ein einzelner Ort oder ein Stadtviertel betrachtet. Es geht stärker um das Verhalten von Einzelverbrauchern. Man kann einerseits Verbesserungsmöglichkeiten ablesen, andererseits kann man aus den Einzelbetrachtungen auf nationale Werte hochrechnen. Swan und Urgusal [15] unterscheiden hier zwischen statistischen und ingenieurstechnischen Ansätzen.

Statistische Bottom-Up Modelle gehen wie die Top-Down Modelle von historischen Daten aus. Die Modelle werden ausgehend von Daten über den Energieverbrauch einer Stichprobe von Häusern erstellt. Es können regionale und nationale Indikatoren einbezogen werden, zum Beispiel ökonomische und soziale Einflüsse, wie der Energiepreis oder das Einkommen der Verbraucher.

Innerhalb der statistischen Bottom-Up Modelle unterscheiden Swan und Urgusal [15] weiters, zwischen Methoden, die Regression anwenden, jenen der Kategorie Conditional demand analysis (CDA, bedingte Faktornachfragefunktion) und künstliche neuronale Netzwerke (NN, engl.: neural networks).

Bei Regressionsmodellen werden die Koeffizienten des Berechnungsmodells, durch Anpassen an historische Verbraucherkfunktionen ermittelt. Die einzelnen Parameter stehen dabei für angenommene Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch. Typische Beispiele solcher Einflussfaktoren wären die Außentemperatur und die Uhrzeit, welche einen Hinweis auf das wahrscheinliche Konsumentenverhalten geben.

CDA geht meist von einer Annahme über die im Haushalt vorhandenen technischen Geräte und ihren Einsatz aus.

NN werden ebenfalls mit historischen Daten kalibriert. Ein Vorteil ist, dass sie aus neuen Inputdaten „lernen“ und sich das Modell immer an die aktuellen Gegebenheiten anpasst. Dafür ist die Information, die sie liefern nur eingeschränkt, da ihre einzelnen Parameter keine physikalische Bedeutung haben.

Swan und Urgusal [15] sehen die statistischen Bottom-Up Modelle als Brücke zwischen detaillierten Endverbrauchermodellen und Top-Down Modellen für großräumige Indikatoren. Man kann mit ihnen vielfältige, aussagereiche Analysen vornehmen. Dafür sind jedoch auch große Mengen an Ausgangsdaten notwendig. Innerhalb der Gruppe halten sie Regressionen für am wenigsten sinnvoll. CDA liefert ihrer Meinung nach nützliche, einfache Modelle. NN haben an sich die besten Voraussagemöglichkeiten, allerdings enthalten ihre einzelnen Parameter keinerlei physikalische Informationen. Man kann mit statistischen Bottom-Up Modellen Endverbraucher analysieren. Dabei wird das menschliche Verhalten mit einbezogen. Als Ausgangsdaten dienen Rechnungsdaten und Bestandsaufnahmen oder Befragungen.

Als letzte Gruppe werden ingenieurstechnische Bottom-Up Modelle genannt. Diese gehen von Untersuchungen über die vorhandenen Gebäude und die verwendeten Geräte in den Haushalten, kombiniert mit dem Konsumentenverhalten, aus und berechnen mit thermodynamischen Zusammenhängen die benötigte Energie. Auch hier bilden Swan und Urgusal [15] drei Untergruppen: Bevölkerungsverteilungen, Archetypen und Stichproben.

3 Modellierung des Verbraucherverhaltens

Bei Bevölkerungsvorteilungen beginnt die Analyse bei der Menge und Art der besessenen technischen Geräte in einem Haushalt. Statistische Werte dazu kommen aus nationalen Untersuchungen, weiters können historische Daten über den Energieverbrauch einbezogen werden. Trotzdem argumentieren die Autoren, dass es sich um eine Bottom-Up Methode handelt, da sich das Untersuchungsergebnis auf Einzelhaushalte bezieht.

Bei Archetypen wird der Gebäudebestand nach Eigenschaften wie dem Alter, der Größe, der Form, der Isolierung oder dem Anteil der Glasflächen an der Fassade, gemeinsam mit Annahmen über die Anzahl der Bewohner und deren Verhalten, kategorisiert. Daten über die Gebäudeeigenschaften werden zum Beispiel durch eine Bestandsaufnahme erfasst.

Bei Stichproben werden einzelne Gebäude genau untersucht. Die Stichprobe sollte repräsentativ für den Gebäudebestand des Untersuchungsgebiets sein. Hier muss ein geeignet großer Stichprobenumfang gewählt werden.

Als Stärke der ingenieurstechnischen Bottom-Up Ansätze sehen Swan und Urigus [15], dass sie grundsätzlich nicht auf historischen Daten aufbauen, auch wenn diese bei der Kalibrierung einbezogen werden können. Dafür sind sehr detaillierte Informationen über den Gebäudebestand notwendig. Weiters ist es sehr schwierig, sinnvolle Annahmen über das Konsumentenverhalten zu treffen. Das ist hier aber notwendig. Wenn es jedoch darum geht den Einfluss neuer Technologien abzuschätzen, so sind ingenieurstechnische Modelle, so die Autoren, die einzige Möglichkeit.

Bei den genannten Methoden wird immer wieder vom Konsumentenverhalten gesprochen. Die Anwesenheit von Menschen in Gebäuden ist wichtig, denn sie nehmen Einfluss auf den Energieverbrauch indem sie Geräte an- und ausschalten, Warmwasser verbrauchen, den Thermostat verstellen oder das Fenster öffnen, usw. Je nachdem ob es sich um ein Wohnhaus oder ein Bürogebäude handelt, werden sich die Anwesenheitszeiten unterscheiden. Es sind in der Literatur diverse Modelle zu finden, häufig mit einem Schwerpunkt auf einer bestimmten Art von Energieverbrauch.

Claridge et al. [16] haben zum Beispiel Anwesenheitsprofile in einem Bürogebäude, basierend auf dem Energieverbrauch für Beleuchtung, erstellt. Sie gingen von Messwerten zum Verbrauch in diversen Gebäuden aus. Die Messwerte deckten ein Jahr ab. Die Gebäude wurden nach Größe kategorisiert. Weiters wurden die Daten in Wochentage und Wochenenden unterteilt. Die Messergebnisse wurden jeweils mit dem Maximalverbrauch des jeweiligen Gebäudes normiert, sodass sich Sets aus „diversity factors“ (Gleichzeitigkeitsfaktoren) für 24 h ergeben. Diese nehmen Werte zwischen 0 und 1 an. Nach Erstellen der Profile kann in Simulationsprogrammen, ausgehend von diesen Tagesprofilen, durch Multiplikation mit der Spitzenlast, eine passende Verbraucherfunktion erstellt werden. So werden einerseits Tagesprofile erstellt. Andererseits kann man auf den Jahresverbrauch hochrechnen, wobei Feiertage mit dem Wochenendprofil berücksichtigt werden.

Page et al. [17] setzten sich ebenfalls mit Anwesenheitszeiten in Bürogebäuden auseinander. Sie kritisieren an Vorgängeruntersuchungen vor allem, dass meistens nur eine einzelne Funktion erstellt wird, die einheitlich auf jeden Wochentag und jeden Konsumenten angewandt wird. Im Fall eines Büros werden zum Beispiel leichte Schwankungen bei den Ankunftszeiten sowie Urlaubszeiten, meist nicht einbezogen. Auch kritisieren Page et al. [17], dass häufig davon ausgegangen wird, dass in der Nacht und an Wochenenden keine Personen in Bürogebäuden anwesend sind. In ihrem Modell führen sie daher stochastische Prozesse mittels Markov-Ketten ein.

3 Modellierung des Verbraucherverhaltens

Die in dieser Arbeit verwendeten Verbraucherkfunktionen wurden im Zuge seiner Diplomarbeit von Johannes Nagler [1] erstellt. Bei den Verbrauchern in Großarl handelt es sich überwiegend um Ein- und Mehrfamilienhäuser, zu denen historische Daten zur Tagesenergieentnahme vorhanden sind. Um das variable Konsumentenverhalten zu berücksichtigen hat Nagler [1] vier verschiedene qualitative Tagesverläufe erstellt. Für jeden Hausanschluss wurde zufällig einer dieser Standardverläufe gewählt und anschließend auf den Gesamttagesverbrauch skaliert, um einen quantitativen Tagesverlauf zu erhalten. Das Integral über den zeitlichen Verlauf der so entstandenen Leistungskurve, für die Zeitdauer von 24 h, entspricht dann der Tagesentnahme des Verbrauchers.

Zu den Hausanschlüssen kommen einige Großverbraucher wie Hotels, Betriebsanschlüsse und Verwaltungsgebäude hinzu. Bei diesen könnte man aufgrund der detaillierteren Daten genauere Verbrauchermodelle entwickeln. Für die Simulation des Fernwärmenetzes Großarl in [1] wurde eine Verbraucherkfunktion stellvertretend für ein Hotel entwickelt. Ausgehend von Messdaten eines Hotels in Tirol wurden Wärmebedarfsverläufe für verschiedene Tage im Jahr erstellt, die anschließend der Größe nach an die Außentemperatur angepasst werden können.

Johannes Nagler hat zunächst ein dreidimensionales Modell für die Monate erstellt, bei dem die Leistung in Abhängigkeit vom Monatstag und von der Tageszeit abgebildet wird.

Anschließend wurden für jeden Monat drei repräsentative Tagesverläufe ausgewählt und zu einer Jahresverlaufsmatrix zusammengefasst. In dieser Weise wurde für 36 Tage der Leistungsverlauf, in Abhängigkeit von der Uhrzeit abgebildet.

Die entstandene Funktion wurde auf die Maximalwerte normiert und mittels Regression in eine stetige Funktion überführt.

Zuletzt hat Nagler [1] eine Regression durchgeführt, mit der der Tagesverbrauch in einen Zusammenhang mit der Außentemperatur gebracht wird.

Die ermittelten Verbraucherkfunktionen wurden in Form von MATLAB-Timeseriesobjects zur Verfügung gestellt. Im Zuge dieser Arbeit wurden die Timeseriesobjects mit Hilfe von MATLAB in ein für Dymola geeignetes .txt-File umgewandelt.

4 Die Programmiersprache Modelica

4.1 Grundlegende Eigenschaften und Geschichte

Otter und Elmquist [18] sowie Fritzson [19] erläutern in ihren Arbeiten unter anderem die Eigenschaften und Geschichte von Modelica. Die folgende Einführung basiert auf Informationen aus ihren Darstellungen.

Modelica ist eine objektorientierte, gleichungsbasierte Programmiersprache. Sie wurde speziell für die mathematische Modellierung von komplexen physikalischen Systemen entwickelt.

1996 bildete sich eine Gruppe von Experten verschiedener objektorientierter Programmiersprachen, die das Ziel hatte, eine einheitliche Sprache zu entwickeln. Diese sollte komplexe fächerübergreifende Systeme abbilden können, wie z. B. mechatronische Modelle, die sowohl mechanische als auch elektrische oder regelungstechnische Komponenten vereinen. Weiters sollte es durch die Wiederverwendbarkeit der Komponenten und Codeteile sehr einfach möglich sein, komplexe Systeme aufzubauen. Dabei wurde besonders auf die Anwendbarkeit für Ingenieure Rücksicht genommen, indem man fertige Bauteile nehmen und miteinander verbinden kann. Nur bei Spezialfällen sollte der eigentliche Quellcode bearbeitet oder neuer Code geschrieben werden.

2000 wurde die Modelica-Association gegründet, eine gemeinnützige Organisation, mit dem Ziel, Modelica weiterzuentwickeln und kostenfrei für Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten verfügbar zu machen.

2002 wurde mit der Entwicklung der Modelica.Fluid – Bibliothek angefangen, welche für diese Arbeit wichtige Komponenten wie Rohrleitungen enthält.

Laut Fritzson [19] sind die wichtigsten Besonderheiten von Modelica:

- Modelica arbeitet mit Gleichungen und nicht mit Zuweisungen. Die linke und rechte Seite einer Gleichung sind gleichwertig und es ist nicht die Leserichtung von links nach rechts vorgegeben. Das vereinfacht das Schreiben von Quellcode, da man nicht im Voraus entscheiden muss, in welcher Reihenfolge oder nach welchen Variablen das Gleichungssystem gelöst wird. Das Modell wird flexibler, da keine bestimmte Datenflussrichtung vorgegeben wird.
- Modelica ist für fachbereichsübergreifende Modelle („multidomain modeling“) geeignet. Es können komplexe Systeme aufgebaut werden, bei denen Komponenten aus, zum Beispiel der Mechanik, der Elektrotechnik und der Thermodynamik oder Regelungstechnik, verbunden werden.
- Modelica ist eine objektorientierte Programmiersprache. Sie arbeitet mit dem Konzept der Klassen. Das ermöglicht eine gute Wiederverwendbarkeit von Komponenten und die Weiterentwicklung von Modellen.
- Modelica ist gut dafür geeignet, einzelne Komponenten aufzubauen und anschließend in größeren Systemen zu verbinden. Die Software-Architektur ist daher für das Modellieren von komplexen physikalischen Systemen besonders gut geeignet.

4.2 Bibliotheken

Es sind diverse Bibliotheken mit Standardkomponenten für Modelica erhältlich. Die kostenfrei von der Modelica Association zur Verfügung gestellte Standardbibliothek (Modelica Standard Library) umfasst Komponenten aus diversen Gebieten. In dieser Arbeit wurde die Modelica Standard Library Version 3.2, 2010-10-25, build 9 (2012-02-09 11:32:00Z) benutzt. Hier soll ein Überblick über die Unterbibliotheken gegeben werden:

- **Blocks und ComplexBlocks:** Kontinuierliche und diskrete Input-/Outputblöcke. Einige der Komponenten wurden in dieser Arbeit für die Regelung des Systems eingesetzt.
- **StateGraph:** Regelungstechnische Komponenten.
- **Electrical:** Elektrische Komponenten wie Widerstände, Dioden aber auch Elektromotoren,...
- **Magnetic:** Komponenten für das Modellieren von Magnetfeldern.
- **Mechanics:** Mechanische Bauteile wie Massenelemente, Federn aber auch Zahnräder oder Gelenke.
- **Fluid:** Hier findet man Modelle für den Aufbau von Rohrleitungsnetzwerken inklusive Pumpen, Tanks,... Diese Bibliothek enthält die klassischen Komponenten für den Aufbau eines Fernwärmenetzes.
- **Media:** enthält Modelle diverser Fluide mit Eigenschaften wie Dichte, Wärmekapazitäten, aber auch chemische Zusammensetzung,... Je nach Anwendungsbereich kann, zum Beispiel, zwischen verschiedenen Modellen für Wasser gewählt werden (flüssig, flüchtig und dampfförmig,...)
- **Thermal:** Enthält Komponenten für Wärmeleitung und -übertragung, Wärmespeicher sowie simple Rohrleitungsmodelle, die nur die thermischen Aspekte beachten, nicht aber die Strömungsmechanik. Komponenten dieser Bibliothek wurden bei dieser Arbeit für die Modelle der Wärmeverluste über die Rohrwand und bei den Wärmeabnehmerstationen eingesetzt.
- **Math und ComplexMath:** Hier findet man diverse mathematische Operatoren.
- **Constants, SIunits,...:** enthält Konstanten sowie die Definition verschiedener physikalischer Größen inklusive ihrer SI-Einheiten. Wenn allen Variablen als physikalische Größe und ihr Wert mit einer Einheit angegeben werden, kann das Programm Gleichungen auf ihre Richtigkeit überprüfen. Weiters werden andere Einheiten automatisch auf SI-Einheiten umgerechnet.

Die meisten Komponenten orientieren sich an Bauteilen realer Systeme und können dadurch mit begrenztem Informatik-Wissen zusammengesetzt werden.

4.3 Simulationsumgebungen

Das folgende Kapitel basiert auf Angaben von Otter und Elmquist [18] sowie Fritzson [19].

Es stehen für das Arbeiten mit Modelica diverse Simulationsumgebungen zur Verfügung, sowohl entgeltliche als auch unentgeltliche.

Aufgabe der Simulationsumgebung ist es, im sichtbaren Bereich eine anwenderorientierte Benutzeroberfläche zu gestalten. Im unsichtbaren Bereich muss bei einer Simulation der Modelica-Quellcode übersetzt und die Gleichungssysteme gelöst werden.

Die meisten Benutzeroberflächen bestehen zunächst aus einer Ebene, in der man nach dem Drag-and-Drop-Prinzip Bauteile aus einer vorgefertigten Bibliothek zusammensetzen und verbinden kann. Anschließend werden sie noch detaillierter festgelegt, zum Beispiel mit geometrischen Parametern.

In einer weiteren Ebene ist üblicherweise der kommentierte Quellcode zugänglich, um die Gleichungen, auf denen das Bauteil basiert, betrachten zu können oder selbst Bauteile zu schreiben und zu adaptieren.

Im Simulationsfenster können alle notwendigen Parameter für die Simulation, inklusive des gewünschten Lösungsverfahrens gewählt und, nach erfolgreicher Berechnung, alle Ergebnisse abgerufen werden. Üblicherweise kann man sie sich in Form von Diagrammen darstellen lassen.

Ergänzt wird alles meist durch ein Command-Window, in dem Befehle direkt eingegeben werden können.

Für die eigentliche Simulation braucht jedes Tool einen Modelica Compiler oder Interpreter, der den Modelica-Code verarbeitet, zusammenfasst und nötigenfalls in eine andere Sprache wie C++ überführt. Diese kann dann von einem Standardcompiler in Maschinencode übersetzt werden. Weiters ist eine Ausführungs- bzw. Laufzeitumgebung nötig, die auch die numerischen Solver beinhaltet.

Die drei bekanntesten Simulationsumgebungen für Modelica sind Dymola, MathModelica und die Open-Source-Software OpenModelica.

In einer ursprünglichen Idee zu dieser Arbeit hätte mit OpenModelica gearbeitet werden sollen. Leider war zu diesem Zeitpunkt die Verwendung der Fluid- und Medium-Libraries in OpenModelica noch nicht vollständig möglich. Daher wurde stattdessen mit Dymola gearbeitet.

5 Das Simulationsprogramm Dymola

Grundlage für dieses Kapitel sind das Dymola Benutzerhandbuch [20] und eigene Erfahrungen aus der Arbeit mit Dymola.

Dymola steht für Dynamic Modeling Laboratory.

Ähnlich wie andere Simulationsumgebungen, enthält Dymola folgende Hauptkomponenten:

- Einen Compiler für Modelica, der auch eine Optimierungsfunktion übernimmt, um sehr große Gleichungssysteme zu vereinfachen.
- Eine Laufzeitumgebung für die Simulation, inklusive diverser numerischer Solver.
- Eine grafische Benutzeroberfläche, inklusive Connection Editor.
- Einen Text-Editor.

5.1 Besonderheiten von Dymola

- Dymola ist in der Lage, komplexe Modelle zu bearbeiten, die Aspekte verschiedener technischer Fachrichtungen verbinden.
- Die grafische Benutzeroberfläche erlaubt es, schnell Modelle aufzubauen und Komponenten zu verbinden.
- Durch den Vorgang des symbolic preprocessings (Vereinfachung der zu lösenden Gleichungssysteme, vor der eigentlichen Berechnung) kann eine kürzere Simulationszeit erreicht werden.
- Es ist möglich, zusätzlich zu den Standardbibliotheken, eigene Komponenten zu definieren.
- Es gibt die Möglichkeit Schnittstellen zu anderen Programmen zu nutzen. Zum Beispiel können Simulationsergebnisse als MATLAB (.mat)-File gespeichert werden. Tabellarische Daten können unter anderem aus .txt-Files ausgelesen werden. Dymola überträgt Modelica-Code in C-Code, der zum Beispiel zu MATLAB/Simulink übertragen werden kann.
- Es gibt die Möglichkeit der 3D-Animation mechanischer Systeme.
- Es sind Echtzeitsimulationen (real-time simulations) möglich.

5.1.1 Dymola aus Anwendersicht

Die Benutzeroberfläche für die Modellierung besteht aus folgenden Teilen:

- Dem Übersichtsbaum über alle geladenen Bibliotheken und Modelle. Von hier können Komponenten mittels Drag-and-Drop in die grafische Modellierungsebene oder auch in den Quellcode gezogen werden.
- Der grafischen Modellierungsebene: Hier können Komponenten platziert und miteinander verbunden werden. Weiters kann man bei jeder Komponente ein Parameter-Menü öffnen, in dem man alle relevanten Größen und Einstellungen der Komponenten festlegt. Es ist auch möglich, die Parameter für mehrere gleichartige

5 Das Simulationsprogramm Dymola

Komponenten, durch Auswahl aller auf einmal, festzulegen.

- Dem Quellcode: Auch hier können Komponenten mittels Drag-and-Drop eingefügt und anschließend parametrisiert und verbunden werden. Es können weitere Parameter und Konstanten definiert und Gleichungen aufgestellt werden. Diese Ebene ist beim Aufbau eigener Komponenten besonders essenziell. Der Quellcode wird zur einfacheren Lesbarkeit in verschiedenen Farben angezeigt (Standard-Typen, Kommentare, ...).
- Dem Symbol: Hier kann ein Symbol (Icon) inklusive Konnektoren für Komponenten gestaltet werden. Dieses wird auf der grafischen Ebene als Symbol für die Komponente verwendet. Die Konnektoren können mit anderen Komponenten verbunden werden.
- Der Informationsebene: Zu jeder Komponente/jedem Modell kann ein Informationstext angezeigt werden. Bei eigenen Komponenten kann dieser in Form einer Annotation angelegt werden. Bei den Standardkomponenten kann man sich über die Funktionsweise des Bauteils und die verstellbaren Parameter informieren. Die Texte stammen aus den Erläuterungen der Modelica-Association.

Die Benutzeroberfläche für die Simulation hat folgende Eigenschaften:

Von hier aus werden die Vorgaben für die Simulation gemacht (Simulationsdauer, Solverauswahl, Toleranz,...) und die Simulation gestartet. Die Simulationsebene besteht aus folgenden Teilen:

- Dem Variable Browser: Hier können nach einer Simulation alle Variablen und Parameter des Modells, in einem Komponentenbaum, aufgerufen werden.
- Plot-Windows: Hier werden die ausgewählten Simulationsergebnisse in Form von x, y-Diagrammen dargestellt.
- Einem Fenster für die 3D-Visualisierung von Bewegungen, bei mechanischen Systemen.
- Dem Command-Window: Hier können Befehle direkt an das Programm gegeben werden. Alle Befehle und ihr Ergebnis werden dokumentiert. So können automatische Simulationsroutinen vorgegeben werden. Es ist möglich, ein separates Command-Window (auch in der Modellierungsebene) anzuzeigen.
- Diversen Schaltflächen: Die Ergebnisse können gespeichert und wieder aufgerufen werden.

5.1.2 Dymola auf Simulationsebene

- Nachdem man den Befehl zur Simulation gegeben hat, wird das Modell zunächst übersetzt. Dann werden die Gleichungen bearbeitet, um ein möglichst einfaches Gleichungssystem zu erhalten. Anschließend startet die eigentliche Simulation.
- Übersetzung: Es ist eine reine Übersetzung über den Befehl „Translate“ möglich. Während der Übersetzung ergänzt Dymola sämtliche nicht angegebenen Startwerte für die Berechnung mit „default“-Werten. In diesem Fall werden Warnungen im Messagewindow angezeigt. Bei der Überprüfung des Modells werden auch die Einheiten der Variablen in den Gleichungen miteinander abgeglichen. Es werden nicht-SI-Einheiten automatisch in SI-Einheiten umgewandelt. In Dymola wird daher zwischen „Units“ und „DisplayUnits“ unterschieden, wobei letztere zur

benutzerfreundlichen Darstellung genutzt werden. Wenn keine Einheit angegeben wird, so interpretiert Dymola das als unbekannte, frei wählbare Einheit.

- Allgemeine Einstellungen für die Simulation: Es wird eine Simulationsdauer über die Eingabe von Startzeit und Stopzeit gewählt. Dazu kann entweder eine Intervalllänge angegeben werden oder eine Anzahl an Intervallen, auf die die Simulationszeit aufgeteilt werden soll. Diese Intervalllänge bestimmt, in welchem Abstand Ergebnispunkte gespeichert werden. Weiters muss der Lösungsalgorithmus gewählt werden und gegebenenfalls mit Parametern wie der Solvertoleranz versehen werden. Es können verschiedene Optionen gewählt werden, welche Informationen während der Simulation gesammelt und angezeigt werden sollen.
- Algorithmen: Es stehen diverse Lösungsalgorithmen zur Auswahl (siehe unten).
- Dymola benötigt einen Compiler, um den Modelica-Code in ein ausführbares Simulationsprogramm überzuführen. Üblicherweise ist dieses Programm in C oder C++ geschrieben.
- Es gibt die Möglichkeit mit Dymola Echtzeitsimulationen durchzuführen.

5.2 Lösungsalgorithmen

Es stehen diverse Lösungsalgorithmen zur Auswahl: Dassl (Differential/Algebraic System Solver); Lsodar (Livermore Solver for Ordinary Differential equations, with Automatic method switching for stiff and nonstiff problems, and with Root-finding); Euler; Rkfix2, 3, 4; Radau IIa; Esdirk23a und Esdirk34a (mit verschiedener Ordnung); Dopri45; Dopri853; Sdirk34hw sowie Cerk23, 34, 45. Als Voreinstellung ist Dassl gewählt.

Die Algorithmen können nach verschiedenen Eigenschaften eingeteilt werden:

- Einschrittverfahren (z. B. Radau IIa) und Mehrschrittverfahren (z. B. Dassl, Lsodar). Einschrittverfahren beginnen ihre Berechnungen (quasi) nach jedem Berechnungsschritt von neuem. Dadurch sind sie besser geeignet, wenn Ereignisse (plötzliche Änderungen von Werten) in der Simulation auftreten. Es werden aber auch bei Einschrittverfahren Informationen vom vorangehenden Berechnungsschritt genutzt.
- Algorithmen mit fester Schrittweite (z. B. Euler) oder mit variabler Schrittweite (z. B. Dassl, Lsodar). Letztere berechnen bei jedem Schritt den lokalen Fehler und wählen die Schrittweite dann so, dass dieser Fehler innerhalb einer bestimmten Toleranz liegt. In den meisten Fällen sind die Berechnungsschritte unabhängig vom voreingestellten Intervall für die Ergebnisspeicherung (dense output). Sollte zu einem gewünschten Ergebnispunkt kein Wert vom Solver vorliegen, wird zwischen den nächstgelegenen Punkten interpoliert. Es gibt jedoch auch Solver, die die vorgegebenen Punkte für die Ergebnisspeicherung genau treffen sollen. Hier hat diese Vorgabe eine erheblich höhere Bedeutung. Sie sollte ein Vielfaches der vorgegebenen Schrittweite sein.
- Ordnung: Die Lösung der Berechnung wird vom Solver durch ein Polynom bestimmter Ordnung angenähert. Es gibt Solver mit fester Ordnung (z. B. Radau IIa – Order 5) und Solver, die die Ordnung des Polynoms variieren (z. B. Dassl, Lsodar). Je höher die Ordnung, desto größer kann das Integrationsintervall gewählt werden, wodurch eine höhere Effizienz gegeben ist. Algorithmen höherer Ordnung sind jedoch weniger gut

5 Das Simulationsprogramm Dymola

für Systeme geeignet, deren Lösungskurven nicht glatt sind.

- Algorithmen, die sich für steife bzw. nicht steife Gleichungssysteme eignen. Steif bedeutet hier, dass sowohl „schnelle“ als auch „langsame“ Signale im Modell vorhanden sind, bzw., dass die kürzeste Zeitskala wesentlich schneller, als die interessante Modelldynamik ist. Lsodar ist als einziger Solver sowohl für steife als auch nicht steife Systeme geeignet. Dassl ist ein Solverbeispiel für steife Systeme, Euler für nicht steife.
- Explizite und implizite Berechnungsverfahren.

Beim betrachteten Fernwärmenetzmodell handelt es sich um ein steifes Gleichungssystem. Es finden jedoch keine Ereignisse statt. Die Übergänge von einem Zustand zum nächsten erfolgen langsam. Daher wurde mit Dassl gearbeitet.

Da die Verbraucherfunktionen Vorgaben in Zeitschritten von 100 s machen, wurde das Ergebnisintervall auf $100 \text{ s} = 1,6 \text{ min}$ gestellt. Die gewählte Toleranz war 10^{-6} .

6 Das Modell

6.1 Thermodynamik und Strömungslehre

6.1.1 Wärmeverlust über die Rohrwand

Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser in den Rohren und dem umgebenden Erdreich, wird bei allen Rohrleitungen Wärme über die Wand abgegeben. Die Isolierung der Rohrwände kann die abgegebene Wärmemenge zwar verringern, die Verluste jedoch nicht vollständig verhindern. Die Berechnung des Wärmeübergangs soll analog zu Baehr und Stephan [21] erläutert werden. Die Angaben zu den verwendeten Gleichungen in den Modellen stammen aus den Erläuterungen zum und dem Quellcode der Modelica Standard Library [22]:

Der Wärmedurchgang ist eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen der äußeren und inneren Umgebung.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i) \quad (01)$$

\dot{Q}	... Wärmestrom	[W]
A	... Fläche, auf die der Wärmeübergang bezogen wird	[m ²]
ϑ_a, ϑ_i	... Temperaturen außen und innen	[°C]
k	... Wärmedurchgangskoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]

Der Wärmedurchgangskoeffizient hängt von der Wärmeübergangszahl zwischen dem Transportmedium und der Rohrwand, der Wärmeleitfähigkeit in der Rohrwand sowie der Wärmeübergangszahl von der äußeren Rohrwand zum Umgebungsmedium ab.

Im Fall einer ebenen Wand ergibt sich der Wärmedurchgangswiderstand Ω zu:

$$\Omega = \frac{1}{k \cdot A} = \frac{1}{\alpha_1 A_1} + \sum_1^n \frac{d_i}{\lambda_i \cdot A_i} + \frac{1}{(\alpha_2 \cdot A_2)} \quad (02)$$

Ω	... Wärmedurchgangswiderstand	[K W ⁻¹]
d_i	... Innendurchmesser an Schicht i	[m]
α_i	... Wärmeübergangskoeffizient zwischen Medium und Schicht	[W m ⁻² K ⁻¹]
λ_i	... Wärmeleitfähigkeit der Schicht i	[W m ⁻¹ K ⁻¹]

Bei der gekrümmten Rohrwand muss die Änderung der Rohroberfläche mit veränderlichem Radius (z. B. ist bei Kreisringprofilen die Rohrinnenfläche kleiner als die Rohraußenfläche) berücksichtigt werden.

Hier ergibt sich der Wärmedurchgangswiderstand zu:

$$\frac{1}{k \cdot A} = \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2} \cdot \sum_1^n \frac{1}{\lambda_{mi}} \cdot \ln \left(\frac{d_{i+1}}{d_i} \right) + \frac{1}{(\alpha_{n+1} d_{n+1})} \right) \quad (03)$$

L	... Länge des Rohrs	[m]
---	---------------------	-----

wobei die i-te Schicht von den Durchmessern d_i und d_{i+1} begrenzt wird.

Im vorliegenden Fall handelt es sich um Rohre mit zwei Schichten: einer Stahlwand und einer Isolierschicht.

6 Das Modell

Als Wärmeleitfähigkeiten wurden angenommen:

$$\lambda_{st} = 13,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\lambda_{iso} = 0,029 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient von der Isolierschicht zur Umgebung, wird als unendlich angenommen. Damit fällt der letzte Term weg.

Der Wärmeübergangskoeffizient vom Heißwasser zur Rohrwand wird im Modell dynamisch berechnet. Hier wurde das Modell

Modelica.Fluid.Pipes.BaseClasses.HeatTransfer.LocalPipeFlowHeatTransfer in den Rohreinstellungen gewählt. Dabei handelt es sich um ein Berechnungsmodell für den Wärmeübergang im laminaren und turbulenten Bereich. Voraussetzungen sind eine voll ausgebildete Strömung, erzwungene Konvektion, einphasiges Newtonsches Fluid, die Annahme einer konstanten Wandtemperatur und eine Strömung im laminaren Bereich ($0 \leq Re \leq 1e6$, $0,6 \leq Pr \leq 100$, $d/L \leq 1$).

Für die Modellierung der Wärmeverluste der Rohre werden im Modell eine Ersatzkomponente für die Rohrwand (ThermalConductor) und eine vorgegebene Umgebungsbedingung (fixedTemperature) an den Wärmeconnector des jeweiligen Rohres (DynamicPipe) angeschlossen.

Als Umgebungstemperatur wird $\vartheta_a = 10^\circ\text{C}$ angenommen.

Die Komponente ThermalConductor berechnet den Wärmestrom nach dem Prinzip

$$Q_{flow} = G \cdot dT \quad (04)$$

Q_{flow}	... Wärmestrom	[W]
G	... Parameter für die Wärmeleitfähigkeit	[W K ⁻¹]
T	... Temperatur	[K]

Das entspricht Gleichung (01). Dabei soll, nach Anleitung in der Information zur Komponente, der Koeffizient G für zylinderförmige Geometrie folgendermaßen berechnet werden:

$$G = \frac{2 \cdot \pi \cdot \tilde{k} \cdot L}{\ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)} \quad (05)$$

\tilde{k}	... Wärmeleitfähigkeit des Materials	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
L	... Länge des Zylinders	[m]
r_{out}	... äußerer Radius des Zylinders	[m]
r_{in}	... innerer Radius des Zylinders	[m]

G entspricht also dem Wärmedurchgangskoeffizienten nach Baehr und Stephan [21] mal der Länge des Rohres.

Daher wurde in der Arbeit mit folgendem Gleichungssatz gearbeitet:

$$k^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{st}} \cdot \ln\left(\frac{d_i + s_{st}}{d_i}\right) + \frac{1}{\lambda_{iso}} \cdot \ln\left(\frac{d_i + 2 \cdot s_{st} + 2 \cdot s_{iso}}{d_i + 2 \cdot s_{st}}\right) \right) \quad (06)$$

$$G = k \cdot L \quad (07)$$

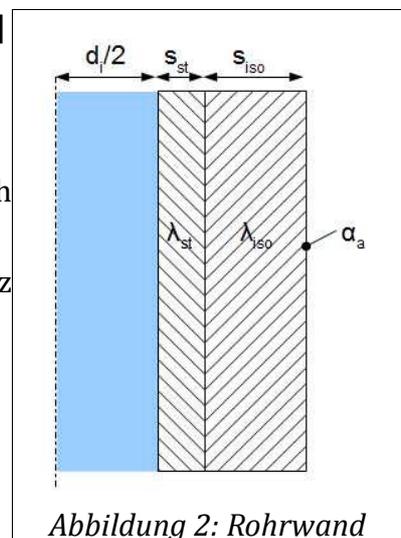


Abbildung 2: Rohrwand

6 Das Modell

G	... Wärmedurchgangszahl für Modelica	[W K ⁻¹]
k	... Wärmedurchgangskoeffizient nach Baehr	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
d _i	... Innendurchmesser des Rohres	[m]
s _{St}	... Dicke der Stahlwand	[m]
s _{iso}	... Dicke der Isolierschicht	[m]
λ _{St}	... Wärmeleitfähigkeit der Stahlwand	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ _{iso}	... Wärmeleitfähigkeit der Isolierschicht	[W m ⁻¹ K ⁻¹]

Die Wärmeverluste wirken sich als Temperaturdifferenz zwischen dem in das Rohr eintretenden und am Rohrende austretenden Medium aus.

Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik bedeutet das, unter der Annahme von stationären Bedingungen (kein Aufheizen/Abkühlen der Rohrwand selbst):

$$\dot{Q} = H_{aus} - H_{ein} = \dot{m} \cdot (h_{aus} - h_{ein}) = \dot{m} \cdot c_p(T) dT \quad (08)$$

Unter vereinfachter Annahme einer konstanten isobaren Wärmekapazität c_p gilt:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p (T_{aus} - T_{ein}) \quad (09)$$

Q°	... Wärmeverlust	[W]
m°	... Massenstrom Wasser	[kg s ⁻¹]
H _{aus}	... Enthalpiestrom aus dem Rohr heraus	[W]
H _{ein}	... Enthalpiestrom ins Rohr hinein	[W]
h _{aus}	... spezifische Enthalpie des Wassers am Austritt	[J kg ⁻¹]
h _{ein}	... spezifische Enthalpie des Wassers am Eintritt	[J kg ⁻¹]
T _{aus}	... Temperatur des Wassers am Austritt	[K]
T _{ein}	... Temperatur des Wassers am Eintritt	[K]
c _p	... spezifische isobare Wärmekapazität des Wassers	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]

6.1.2 Druckverlust über die Rohrlänge

Um einen Durchfluss in den Rohren aufrecht zu erhalten, ist eine Kraft, beziehungsweise eine Druckdifferenz über die Rohrlänge, notwendig. Diese Druckdifferenz kann als Druckverlust pro Meter Rohrlänge dargestellt werden.

Der Druckverlust ist stark abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Rauigkeit der Rohrwand, welche für die Form und Art der Strömung bestimmend sind.

Wossog [23] gibt als allgemeine Formel für den Druckverlust bei inkompressiblen Fluiden auf einer Rohrstrecke mit konstantem Innendurchmesser an:

$$\Delta p = \frac{\rho_A \cdot w_A^2}{2} \cdot \left(\frac{\lambda_R \cdot L_S}{d_i} + \sum \zeta \right) \cdot K_T \quad (10)$$

Δp	... Druckverlust über die Rohrlänge	[Pa]
ρ _A	... Fluidichte am Anfang	[kg m ⁻³]
w _A	... Durchflussgeschwindigkeit am Anfang	[m s ⁻¹]
λ _R	... Rohrreibungszahl	[-]
ζ	... Einzelwiderstände durch Umlenkungen und Querschnittsänderungen	[-]
L _S	... Rohrlänge	[m]
d _i	... Rohrinne Durchmesser	[m]
K _T	... Korrekturfaktor für Rohrtoleranzen	[-]

6.1.3 Rohrleitungswiderstand durch Krümmen

Bei der Berechnung der Druckverluste im Modell DynamicPipe wird von einem geraden Rohr ausgegangen. Krümmen in der Rohrleitung erhöhen jedoch den Druckverlust. Daher wird zu jedem Rohrstück eine zusätzliche Komponente in die Leitung eingebaut, die als Ersatzwiderstand für die Krümmen in der Leitung wirkt. Eingesetztes Bauteil war das SimpleGenericOrifice. Hier wurde neben einem Rohrdurchmesser ein Rohrwidestandsbeiwert zeta als Parameter vorgegeben.

Dieser Rohrwidestandsbeiwert wurde folgendermaßen berechnet:

$$\zeta_{ges} = 1 + Z_{90^\circ} \cdot \zeta_{90^\circ} + Z_{45^\circ} \cdot \zeta_{45^\circ} \quad (11)$$

ζ_{ges}	... Gesamter Rohrwidestandsbeiwert, entspricht zeta im SimpleGenericOrifice	[-]
ζ_{90°	... zusätzlicher Rohrwidestandsbeiwert pro Rohrkrümmer mit 90°	[-]
ζ_{45°	... zusätzlicher Rohrwidestandsbeiwert pro Rohrkrümmer mit 45°	[-]
Z_{90°	... Anzahl der Rohrkrümmer 90°	[-]
Z_{45°	... Anzahl der Rohrkrümmer 45°	[-]

Folgende Werte wurden angenommen:

$$\zeta_{90^\circ} = 1,25$$

$$\zeta_{45^\circ} = 0,4$$

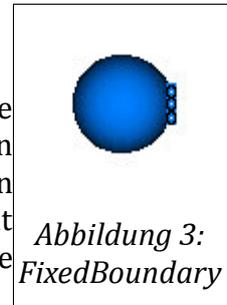
6.2 Komponenten der Modelica Standard Library

Die Erläuterungen zu den verwendeten Komponenten der Modelica Standard Library basieren auf Informationen der Modelica Association [22]. Auch die Abbildungen der Icons stammen aus der Modelica Standard Library [22].

6.2.1 FixedBoundary

Modelica.Fluid.Sources.FixedBoundary

Die FixedBoundary ist das einfachste Modell für eine unendlich große Umgebung. Es wird ein Umgebungsmedium mit konstanten Zustandsgrößen vorgegeben. Man kann zwischen Temperatur und Enthalpie sowie zwischen Druck und Dichte, als Konstanten wählen. Die eingestellten Parameter, mit Ausnahme des Druckes, haben keinen Einfluss auf angeschlossene Komponenten, solange das Medium in die FixedBoundary hinein fließt.

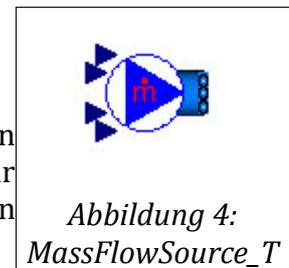


Mit Hilfe von zweier FixedBoundaries wird im Modell eine Schlechtpunktregelung nachgestellt. Am Schlechtpunkt wird sowohl am Vorlauf als auch am Rücklauf jeweils eine FixedBoundary angehängt. Diese haben einen vorgegebenen, konstanten Druck, der als feste Randbedingung wirkt. Zwischen den beiden Boundaries herrscht eine Druckdifferenz. Das ist die vorgegebene Druckdifferenz über den Verbraucher im Schlechtpunkt. Weiters wurde bei der Vorlauf-Boundary die Temperatur des Vorlaufs eingestellt und beim Rücklauf die gewünschte Rücklauftemperatur. Wenn ein höherer Massenstrom ins Netz fließt, als von den Verbrauchern in Summe abgezogen wird, so dient die Vorlauf-Boundary als Senke. Aus der Rücklauf-Boundary wird dann der notwendige Zusatzmassenstrom für den Rücklauf, mit der gewünschten Rücklauftemperatur gezogen.

6.2.2 MassFlowSource_T

Modelica.Fluid.Sources.MassFlowSource_T

Hier handelt es sich um eine Flüssigkeitsquelle, die einen vorgegebenen Massenstrom eines angegeben Fluids, mit vorgegebener Temperatur abgibt. Sowohl beim Massenstrom als auch bei der Temperatur kann entweder ein konstanter Wert oder eine Funktion vorgegeben werden.



Diese Quelle dient als Ersatzmodell für das Heizwerk. Es wird für den Vorlauf ein Wasserstrom mit fester Vorlauftemperatur eingestellt. Der Massenstrom wird über eine äußere Funktion vorgegeben. Er wird aus den akkumulierten Verbraucherfunktionen ermittelt. Derselbe Massenstrom wird über eine weitere MassFlowSource_T aus dem Rücklauf abgezogen. Gemeinsam mit den Druckrandbedingungen durch die FixedBoundaries werden so die Massenströme und Druckverhältnisse im Netz vorgegeben.

6.2.3 DynamicPipe

Modelica.Fluid.Pipes.DynamicPipe

Es handelt sich hier um das komplexere der beiden Rohrleitungsmodelle aus der Fluid Bibliothek. Es ist ein gerades Rohr mit Massen-, Energie- und Impulsbilanz für eine eindimensionale Strömung. Zwei Anschlüsse für den Flüssigkeitsstrom und ein optionaler

6 Das Modell

Anschluss für einen Wärmestrom, sind vorhanden.

Das Differentialgleichungssystem wird mit der Finite Elemente Methode behandelt. Je nach Einstellung des Users, wird das Rohr auf unterschiedlich viele Volumenelemente aufgeteilt. Weiters kann gewählt werden, ob die Zustandsgrößen in den Anschlüssen zum ersten Volumenabschnitt zählen oder separat gehandhabt werden. Für das Strömungsmodell können verschiedene Einstellungen von laminar bis turbulent gewählt werden.

Der Wärmeübergangsanschluss kann aus- und eingeschaltet werden. Er kann mit diversen Wärmestromkomponenten verbunden werden. Wenn mehr als ein Volumenelement vorhanden ist, besitzt jedes einzelne einen Wärmeanschluss. Es kann gewählt werden, ob eine verlustfreie Wärmeübertragung stattfindet. Alternativ kann ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient vorgegeben werden oder der Koeffizient wird dynamisch vom Modell berechnet.

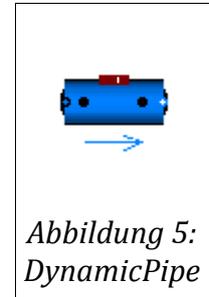


Abbildung 5:
DynamicPipe

Als Parameter werden weiters das fließende Medium, die Rohrgeometrien, ein geodätischer Höhenunterschied zwischen den Enden sowie Startwerte für die Berechnung der Zustandsgrößen vorgegeben.

Im hier behandelten Modell werden, je nach Position, Rohre mit unterschiedlichen Einstellungen eingesetzt. Am häufigsten vertreten ist die Rohrkonfiguration av_vb, nNodes=2 für den Hauptleitungsstrang und a_v_b, nNodes=1 für die Wärmeabnehmerstationen. Es wird mit der Einstellung DetailedPipeFlow gearbeitet. Die geodätischen Höhenunterschiede werden vernachlässigt.

Bei Rohren mit Wärmeverlust wird ein dynamisch berechneter Wärmeübergangskoeffizient gewählt. Bei der Wärmeabgabe beim Verbraucher wird ein idealer Wärmeübergang angenommen.

6.2.4 SimpleGenericOrifice

Modelica.Fluid.Fittings.SimpleGenericOrifice

Diese Komponente bewirkt einen Druckverlust. Dieser wird in Abhängigkeit von den Fluideigenschaften und dem Durchfluss berechnet. Vorgegeben wird ein Rohrwiderstandsbeiwert zeta sowie der Durchmesser der Leitung.

Der Druckverlust wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta p = 0,5 \cdot \zeta \cdot v \cdot |v|$$

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \zeta}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot \rho} \cdot \dot{m} |\dot{m}| \quad (12, 13)$$

Δp	... Druckverlust zwischen Ein- und Austritt	[Pa]
D	... Durchmesser des Rohrstückes (Kreisprofil) oder Ersatzdurchmesser [m]	
ζ	... Rohrwiderstandsbeiwert	[-]
v	... Mittlere Geschwindigkeit	[m s ⁻¹]
ρ	... Dichte	[kg m ⁻³]
\dot{m}°	... Massenstrom	[kg s ⁻¹]

Es sind auch alternative Einstellungen möglich, bei denen ζ aus einem angegebenen Nennmassenstrom mit zugehöriger Nenndruckdifferenz berechnet wird.

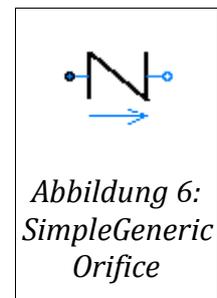


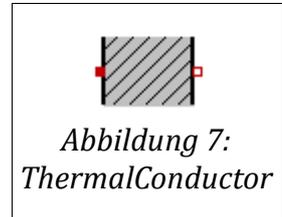
Abbildung 6:
SimpleGeneric
Orifice

Für diese Arbeit wurde ein vereinfachtes Netzmodell gebildet, bei dem Rohrkrümmer durch einen Rohrwiderstandsbeiwert ersetzt wurden. Dieser wurde mit dem SimpleGenericOrifice umgesetzt.

6.2.5 ThermalConductor

Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.ThermalConductor

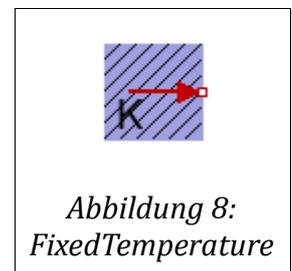
Diese Komponente modelliert Wärmeleitung durch einen Körper, wobei dieser keine Wärme speichert. Dabei muss eine Konstante G für die Wärmeleitfähigkeit vorgegeben werden. In dieser Arbeit repräsentieren ThermalConductors die Rohrwände der Leitungsrohre. Zur Berechnung von G siehe „Untermodule und zusammengefasste Bauteile“.



6.2.6 FixedTemperature

Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.FixedTemperature

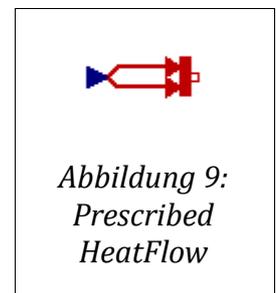
Hier handelt es sich um das einfachste Umgebungsmodell für thermische Komponenten. Es wird eine konstante Temperatur als Randbedingung vorgegeben. Dieses Bauteil ersetzt hier das Erdreich um die Leitungsrohre. Es wird eine Temperatur von $10^{\circ}\text{C} = 385,15\text{K}$ angenommen. Dadurch ergibt sich die Temperaturdifferenz zum Warmwasser in den Rohren, aus der die Wärmeverluste berechnet werden.



6.2.7 PrescribedHeatFlow

Modelica.Thermal.HeatTransferSources.PrescribedHeatFlow

Mit dieser Komponente kann bei einem thermischen Anschluss (thermal Connector) ein Wärmestrom, in Form einer Funktion, vorgegeben werden. Je nach Vorzeichen fließt der Wärmestrom in die angeschlossene Komponente hinein oder aus ihr heraus. Optional kann ein Wärmeübergangskoeffizient gewählt werden, um temperaturabhängige Verluste bei der Wärmeübertragung einzubeziehen.

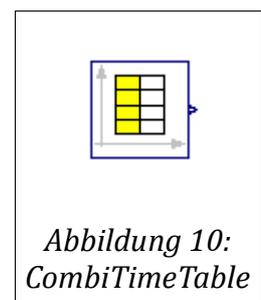


Mit Hilfe dieser Komponente wird die Verbraucherfunktion im Ersatzmodell der Wärmeübergabestation aufgebracht. Dabei wird ein verlustfreier Wärmeübergang (Parameter $\alpha=0$) angenommen.

6.2.8 CombiTimeTable

Modelica.Blocks.Sources.CombiTimeTable

Mit Hilfe dieses Bauteils können Daten aus Tabellen in einer ASCII oder binären Datei ausgelesen werden. Für den Aufbau der Datei gibt es Vorgaben: Eine Datei kann mehrere Tabellen enthalten. In der Komponente wird der Dateipfad und der Tabellename angegeben. In der ersten Spalte wird die Zeit angegeben. Die Werte dieser ersten Spalte müssen monoton steigend sein. Diskontinuitäten können angegeben werden, indem ein Zeitpunkt zweimal hintereinander genannt wird. Als



6 Das Modell

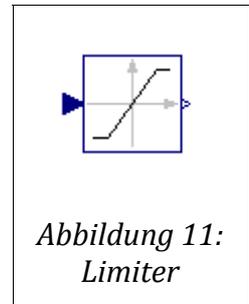
Output wird der zur Simulationszeit zugehörige Tabellenwert, aus einer anderen Spalte, ausgegeben. Wenn der gesuchte Zeitpunkt in der ersten Spalte nicht enthalten ist, wird zwischen nahegelegenen Werten interpoliert. Die Interpolationsart (z. B. linear) kann gewählt werden.

Im hier erarbeiteten Modell wird diese Komponente zum Einlesen der Verbraucherfunktionen eingesetzt.

6.2.9 Limiter

Modelica.Blocks.Nonlinear.Limiter

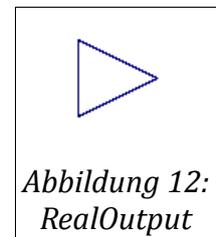
Mit dieser Komponente kann ein oberer und unterer Grenzwert für ein Signal der Art Real vorgegeben werden. Sie wird in dieser Arbeit eingesetzt, um bei den einzelnen Verbrauchern einen Mindestmassenstrom zu garantieren. Das ist einerseits nötig, um eine Berechnung zu ermöglichen, andererseits kann man diesen Massenstrom als Bypass interpretieren, der das Auskühlen der Rohrleitungen verhindert.



6.2.10 RealOutput

Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput

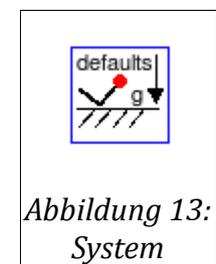
Dieses Interface dient dazu Signale vom Typ Real auszugeben.



6.2.11 System

Modelica.Fluid.System

Diese Komponente wird in jedem Modell, das Komponenten der Fluidbibliothek verwendet, eingesetzt. Sie dient dazu für das gesamte Modell Gemeinschaftsparameter vorzugeben. Viele default-values und Startwerte von Komponenten greifen auf die im „System“ angegebenen Parameter zurück. Beispiele dafür sind Umgebungsbedingungen wie Druck und Temperatur, die Erdbeschleunigung, ein Mindestmassenstrom oder die Grundgleichungen von Energie-, Massen- und Impulsbilanz.



6.2.12 StandardWater

Modelica.Media.Water.StandardWater

Als Wärmeübertragungsmedium wurde Wasser gewählt. Beim StandardWater handelt es sich um Wasser mit Eigenschaften die nach IAPWS/IF87 Standard ermittelt werden Hierbei sind Druck und spezifische Enthalpie die unabhängigen Variablen.

6.3 Weitere Bauteile

6.3.1 Valve_mFlow

Dieses Bauteil wurde ausgehend von den Ventilmodellen der Modelica Standard Library entworfen. Es dient der möglichst einfachen Massenstromsteuerung. Es handelt sich um eine durchströmte Komponente. Über einen äußeren Connector wird ein Massenstrom vorgegeben. Die Zusatzbedingung ist, dass vergleichbar mit einer idealen Drossel die Enthalpie am Ein- und Austritt gleich sein soll. Als Parameter wird das durchströmende Medium angegeben.

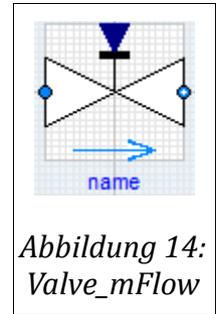


Abbildung 14: Valve_mFlow

6.3.2 Massenstromberechnung

Mit diesem Block wird der Sollmassenstrom der durch das Valve_mFlow fließt berechnet. Ausgangspunkt für diese Berechnungskomponente ist ein SI2SO-Block mit zwei Input- und einem Outputkonnektor. Als ein Input u1 dient die Wärmeverbraucherfunktion, als zweiter Input u2 die Eintrittstemperatur in den Verbraucher. Weiters wird die gewünschte Rücklaufstemperatur T_Ruecklauf angegeben sowie eine Wärmekapazität des Mediums c_p. Der Output y entspricht dem Sollmassenstrom durch den Verbraucher; damit sich eine bestimmte Rücklauftemperatur einstellt. Das Outputsignal y wird folgendermaßen berechnet:

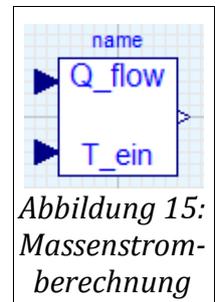


Abbildung 15: Massenstromberechnung

$$y = \frac{u_1}{c_p \cdot (T_{Ruecklauf} - u_2)} = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \Delta T} \quad (14)$$

Q°	... Wärmestrom der in das System hinein fließt	[W]
	(da es sich um eine Wärmeabnahme handelt nimmt dieser negative Werte an)	
ΔT	... Temperaturdifferenz zwischen Verbrauchereintritt und -austritt (Sollwert)	[K]
c _p	... Isobare Wärmekapazität des Fluids	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
u ₁	... Input 1: Wärmeverbrauchsvorgabe	[W]
u ₂	... Input 2: gewünschte Rücklauftemperatur	[K]
y	... Output: Sollmassenstrom	[kg s ⁻¹]

6.4 Untermodelle und zusammengefügte Bauteile

6.4.1 Hauptleitungsrohr

Das Hauptleitungsrohr besteht aus einem Vorlauf- und einem Rücklaufrohr. Diese werden über eine DynamicPipe, in der Konfiguration av_vb, nNodes=2, modelliert. Es wird ein Ersatzrohrwiderstand für Krümmer im realen Netz eingebaut. Dazu wird die Komponente SimpleGenericOrifice eingesetzt.

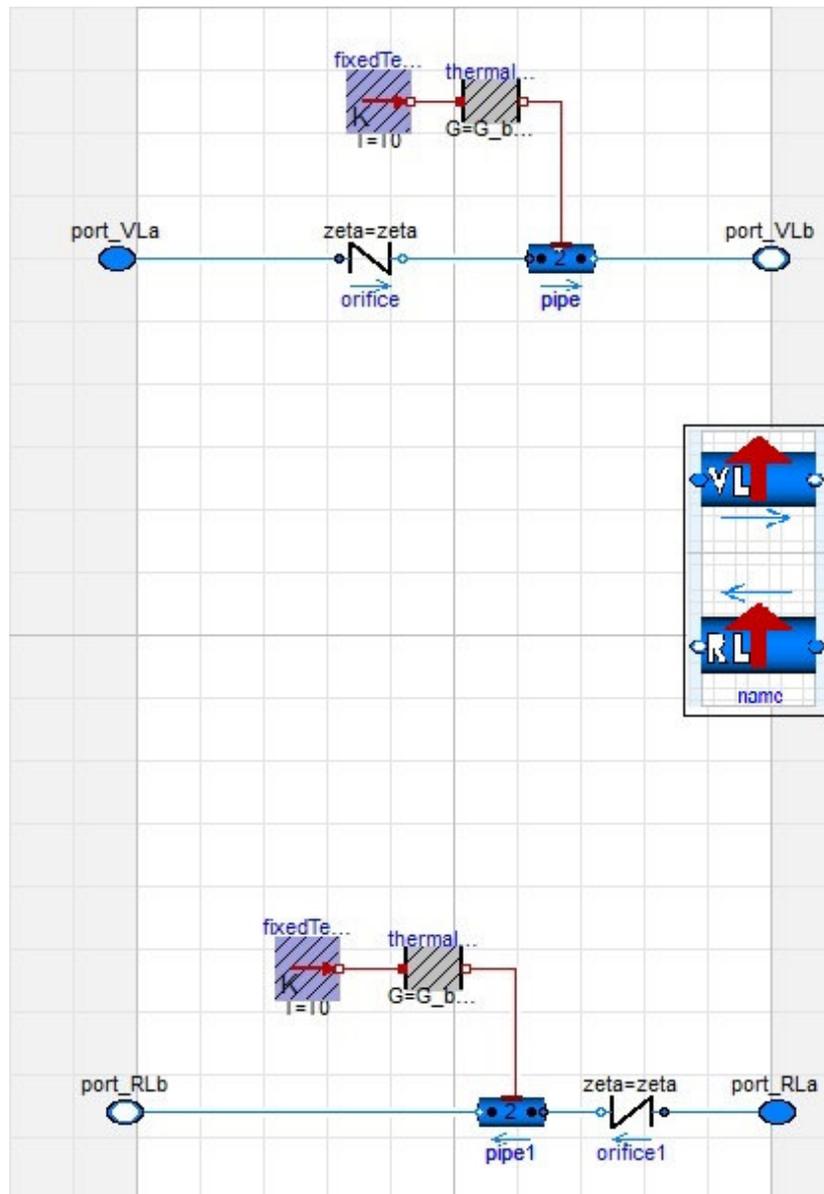


Abbildung 16: Modell eines Hauptleitungsrohrs inklusive Icon

Der Wärmeverlust über den Rohrmantel wird modelliert, indem ein Rohrwandmodell an den Thermalconnector der DynamicPipe angeschlossen wird. Am anderen Ende des Rohrwandmodells wird eine konstante Umgebungstemperatur mittels fixedTemperature vorgegeben.

6 Das Modell

Das Rohrwandmodell wird über einen ThermalConductor vorgegeben. Dabei muss eine Wärmedurchgangszahl G vorgegeben werden. Diese wird aus den angegebenen Parametern automatisch berechnet:

$$k^{-1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{st}} \cdot \ln \left(\frac{d_i + 2 \cdot s_{st}}{d_i} \right) + \frac{1}{\lambda_{iso}} \cdot \ln \left(\frac{d_i + 2 \cdot s_{st} + 2 \cdot s_{iso}}{d_i + 2 \cdot s_{st}} \right) \right) \quad (06)$$

$$G = k \cdot L \quad (07)$$

G	... Wärmedurchgangszahl für Modelica	[W K ⁻¹]
k	... Wärmedurchgangskoeffizient	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
L	... Länge des Rohres	[m]
d _i	... Innendurchmesser des Rohres	[m]
s _{St}	... Dicke der Stahlwand	[m]
s _{iso}	... Dicke der Isolierschicht	[m]
λ _{St}	... Wärmeleitfähigkeit der Stahlwand	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ _{iso}	... Wärmeleitfähigkeit der Isolierschicht	[W m ⁻¹ K ⁻¹]

Als Parameter müssen die Rohrgeometrien, der Rohrwiderstand, die Wärmeleitfähigkeiten sowie das Medium angegeben werden. Weiters sind Startwerte für Drücke, Temperaturen und Massenstrom gefragt.

6.4.2 Verbraucher

Der Verbraucher besteht aus 3 Teilabschnitten. Der Vorlaufleitung zum eigentlichen Verbraucher, der Wärmeentnahmestelle und der Leitung zum Rücklauf.

Vorlauf und Rücklauf sind mit den Modellen im Hauptleitungsrohr vergleichbar. Sie bestehen ebenfalls aus einem Rohr mit Wärmeverlust (Modellbeschreibung siehe „Hauptleitungsrohr“) und Ersatzwiderstand (SimpleGenericOrifice). Der einzige Unterschied ist, dass die Rohrkonfiguration auf a_v_b, nNodes=1 gestellt ist.

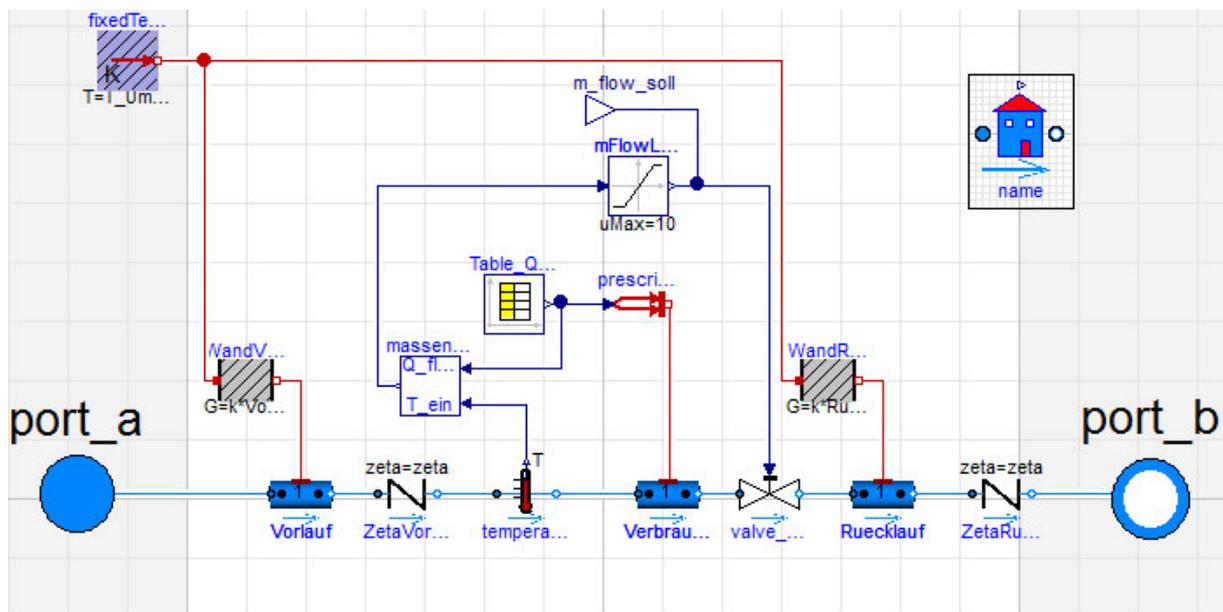


Abbildung 17: Modell eines Verbrauchers inklusive Icon

6 Das Modell

Die Wärmeentnahmestelle wird durch eine DynamicPipe der Konfiguration a_v_b, nNodes=1 dargestellt. An deren Thermalconnector ist eine Wärmestromvorgabe (prescribedHeatFlow) angeschlossen, die ihren Sollwert aus einer Tabelle (CombiTimeTable) bezieht. In dieser Tabelle ist die gewünschte Verbraucherfunktion abgespeichert. Zur Regelung dient die Kombination aus einem Ventil (Valve_mFlow), einem Thermometer, das die Temperatur am Verbrauchereintritt misst und dem Block Massenstromberechnung. Dieser berechnet aus einem vorgegebenen Sollwert für die Rücklauftemperatur, der gemessenen Eintrittstemperatur und der Verbraucherfunktion einen Sollmassenstrom. Der Sollwert wird dann an das Ventil weitergegeben.

Als Parameter werden die Geometrien von Vor- und Rücklauf sowie der Zetawert und die Stoffwerte für die Berechnung des Wärmeverlusts angegeben. Ein Medium wird gewählt. Die Tabelle zum Auslesen der Verbraucherfunktion muss angegeben werden. Weiters gibt es Startwerte für Drücke, Temperaturen und den Massenstrom. Zwischen Massenstromberechnung und Ventil ist noch ein Limiter eingebaut, welcher sicher stellt, dass ein Mindestmassenstrom nicht unterschritten wird. Als letzte Komponente ist ein RealOutput eingebaut. An diesen wird der berechnete Sollmassenstrom weitergegeben. Dieser Output wird dann bei der Berechnung des Gesamtmassenstroms im Netz berücksichtigt.

6.4.3 Teilast

Dieses Untermodell repräsentiert einen vereinfachten (s. Netzvereinfachung) Seitenast. Es besteht aus drei parallel geschalteten Verbrauchern, die durch Vorlauf- beziehungsweise Rücklaufrohre verbunden sind.

Die Verbraucher werden wie im Untermodell „Verbraucher“ durch ein kurzes (1 m) Rohr (DynamicPipe) mit Wärmeentnahmestelle und ein Ventil zur Massenstromregelung (Valve_mFlow) ersetzt. Die Wärmeentnahme wird mit den Komponenten CombiTimeTable aus einer .txt Datei ausgelesen. Die Massenstromvorgabe wird wie beim Verbraucher berechnet.

Die Vorlauf- und Rücklaufrohre bestehen aus jeweils einem Rohr (DynamicPipe) mit Wärmeentnahmestelle, die mit einem Rohrwandmodell aus einer Schicht Rohrwand sowie einer Isolierschicht verbunden ist. An das Rohrwandmodell grenzt eine Umgebungsbedingung. So wird der Wärmeverlust simuliert. Weiters wird jedes Rohr mit einem Rohrleitungswiderstand (SimpleGenericOrifice) kombiniert, der einen Ersatzwiderstand für Rohrkrümmer in der realen Leitung darstellt.

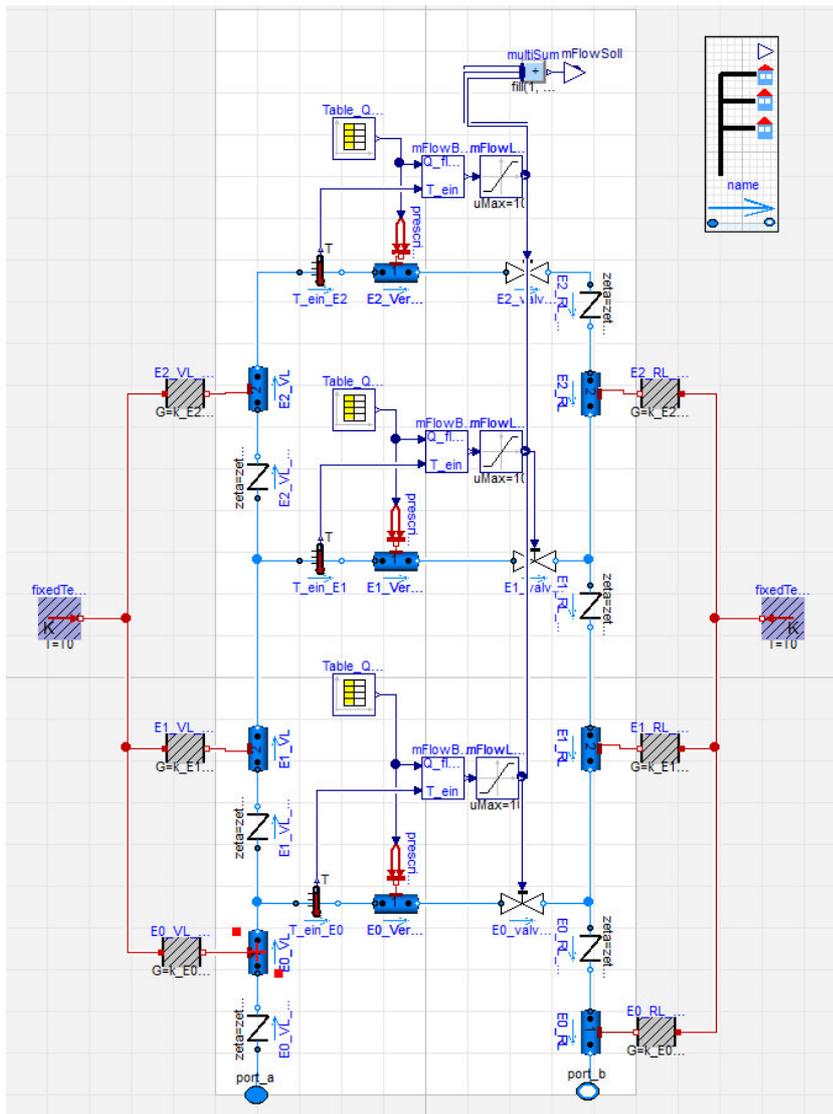


Abbildung 18: Modell eines Teillasts inklusive Icon

Als Parameter können folgende Werte angegeben werden:

- Rohrgeometrien inklusive Wand- und Isolierungsdicke
- Wärmeleitkoeffizienten für die Rohrwand und Isolierung
- Widerstandsbeiwerte Zeta
- Dateipfad zu den Verbraucherfunktionen
- Startwerte für Druck, Temperaturen und Massenströme

7 Netzvereinfachung

Eine Verwendungsmöglichkeit für Fernwärmenetzsimulationen ist die vorausschauende Planung zur Steuerung eines realen Fernwärmenetzes. Dazu muss beim Modell ein geeigneter Mittelweg zwischen einer stark vereinfachten Darstellung, die den Vorteil kurzer Rechenzeiten hat und dem Aufbau eines großen komplexen Netzes, das jedes im Realsystem vorhandene Bauteil enthält, gefunden werden. Letzteres hat den Vorteil, dass an vielen Stellen alle Parameter berechnet und abgelesen werden können. Der Informationsgehalt ist viel höher, dafür ist es unübersichtlicher und die Netzerstellung ist aufwändiger.

Zur Vereinfachung des Fernwärmenetzes Großarl wurde eine Methode von Larsen et al. [24] herangezogen.

7.1 Methode nach Larsen et al.

Larsen et al. [24] gehen von einem verzweigten Fernwärmenetz ohne Maschen aus. Das Netz wird schrittweise vereinfacht. Hier kommen zwei verschiedene Vereinfachungskonzepte zur Anwendung.

Einerseits werden drei Rohrstücke mit zwei Knoten, an denen Verbraucher angeschlossen sind, zu zwei Rohren mit einem Knoten reduziert. Andererseits können verzweigte Rohrenden, die von einem Knoten weg führen, ineinander geklappt und zu einem einzelnen Ende reduziert werden. Die beiden Konzepte werden mehrfach hintereinander auf die unterschiedlichen Teile des Fernwärmenetzes angewendet, bis der gewünschte Vereinfachungsgrad erreicht ist. Da mit jedem Vereinfachungsschritt Information zum Netz verloren geht und der Fehler der anschließenden Simulation im Vergleich zum realen Netz größer wird, wurden nur die Seitenäste vereinfacht. Die Grundstruktur und viele der Verbraucher blieben jedoch erhalten.

7.1.1 Einklappen der Rohrverzweigungen

Ausgangspunkt ist ein verzweigtes Strangende. Vom Knoten 0 führen zwei Rohre weg, mit den Endknoten 1 und 2. Das vereinfachte Ergebnis besteht aus zwei in Serie geschalteten Rohren, die vom Knoten 0 wegführen mit dem Zwischenknoten A und dem Endknoten B. (siehe Abbildung 19)



Abbildung 19: Larsen et al.: Original and equivalent networks [3],
Einklappen der Rohrverzweigungen

Quelle: Helge V. Larsen, Halldór Pálsson, Benny Bøhm, Hans F. Ravn: *Aggregated dynamic simulation model of district heating networks*, *Energy Conversion and Management* 43 (2002) "Original and equivalent networks" Fig.1, S.999

7 Netzvereinfachung

Es werden zwei Annahmen getroffen:

1. Die Zeitdauer, die ein Fluidteilchen braucht um vom Knoten 0 zum Knoten 1 zu kommen, ist kleiner als jene um von 0 zu 2 zu kommen. Ansonsten müssen die Indizes vertauscht werden.
2. Das Verhältnis der Massenströme in den beiden Ausgangsrohren ist über die Zeit konstant.

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \text{const} \quad (15)$$

Das Berechnungskonzept erfüllt folgende Bedingungen:

- Die Rücklauftemperatur im Knoten 0 bleibt nach der Vereinfachung erhalten.
- Die Summe der Leistungsentnahmen in den Knoten 1 und 2 entspricht der Summe in den Knoten A und B.
- Der akkumulierte Wärmeverlust in den Leitungen ist vor und nach der Vereinfachung gleich.
- Das Gesamtvolumen des Wassers in den Rohrleitungen der beiden Varianten bleibt gleich.

7.1.2 Zusammenlegen der Knoten

Ausgangslage ist ein Rohrstrang mit drei aufeinanderfolgenden Rohren 1, 2 und 3. An den Enden des Rohrsegments kann das Fernwärmenetz weiter gehen. Zwischen den drei Rohren sind zwei Knoten, an denen Verbraucher angeschlossen sind. Diese müssen direkt am Netz liegen, ohne weitere Zulaufleitungen. Vereinfachungsergebnis ist ein Rohrstrang, mit zwei aufeinanderfolgenden Rohren A und B und nur einem Zwischenknoten. Das mittlere Rohr 2 wird auf die Rohre 1 und 3 aufgeteilt. Die Last durch die zwei Verbraucher wird auf den neuen Knoten in der Mitte sowie auf die Verbraucher in den Endknoten des ursprünglichen Strangs aufgeteilt (siehe Abbildung 20).

Das Berechnungskonzept erfüllt folgende Bedingungen:

- Die Laufzeit von Fluidteilchen vom Ausgangsknoten zum Endknoten bleibt erhalten.
- Der akkumulierte Wärmeverlust in den Rohren bleibt erhalten.
- Die Gesamtlänge vom Ausgangsknoten zum Endknoten ist vor und nach der Vereinfachung gleich.
- Das Volumen in den Rohren bleibt gleich.
- Die Durchmesser nach der Vereinfachung müssen nicht den Durchmessern der Rohre 1 und 3 entsprechen.
- Das Rohr 2 muss nicht in gleich große Teile geteilt werden.

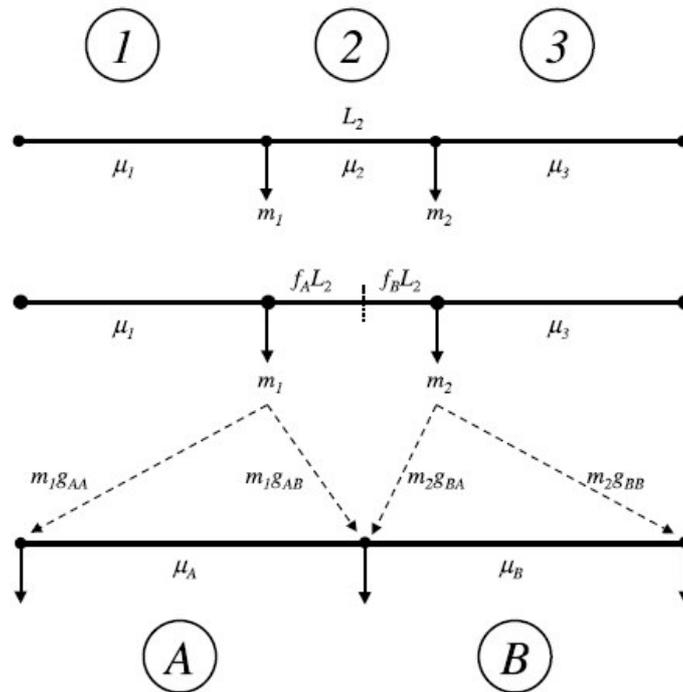


Abbildung 20: Larsen et al.: Collapsing nodes,
Zusammenlegen von Knoten

Quelle: Helge V. Larsen, Halldór Pálsson, Benny Bøhm, Hans F. Ravn: Aggregated dynamic simulation model of district heating networks, *Energy Conversion and Management* 43 (2002) "Collapsing nodes" Fig.3, S.1010

7.2 Umsetzung der Transformation

Die Netzvereinfachung des Fernwärmenetzes Großarl wurde gemeinsam mit Johannes Nagler und Sabrina Dusek im Zuge der Diplomarbeit „Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape“ [1] ausgeführt.

Dabei wurde ein Vereinfachungstool entwickelt, das mit Hilfe von MATLAB und MS Excel arbeitet. In eine vorgefertigte .xlsx Datei werden die Netzdaten eingetragen, anschließend wird der MATLAB-Code ausgeführt. Dabei werden die Daten des vereinfachten Netzes automatisch in die .xlsx Datei eingetragen und können von dort abgelesen werden. Zu den Netzdaten zählen der Aufbau des Netzes, anhand von eindeutig benannten Knoten, die Rohrgeometrien der Leitungen zwischen den Knoten und durchschnittliche Leistungsabnahmen der Verbraucher an den angegebenen Knoten. Weiters wird die Dicke des Stahlmantels und der Rohrisolierung zu den Rohrdurchmessern vorgegeben.

Die Ergebnisse aus dieser Vereinfachung wurden für diese Arbeit übernommen.

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

Erstes Ziel dieser Simulationen war die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Komponenten Hauptleitungsrohr, Verbraucher und Teilast. Weiters sollte überprüft werden, bis zu welcher Netzgröße, mit diesen Komponenten, erfolgreich Berechnungen durchgeführt werden können. Um die Tauglichkeit des Modells für die Beantwortung von Fragen der Betriebsführung zu beurteilen, wurde die Rechenzeit des Modells als Vergleichsgröße gewählt. Bei den Angaben zu Simulationszeiten handelt es sich um die Angabe des Programmes zur „CPU-time for integration“. Die Übersetzungszeiten wurden manuell gemessen.

8.1 Einstellung des Solvers

8.1.1 General

- Start time = 0s
- Stop time = 122300s
- Interval length = 100s
- Algorithm = Dassl
- Tolerance = 1e-06

8.1.2 Translation

- Include a variable for elapsed CPU time during simulation = true
- Warn about parameters with no default = true

8.1.3 Output

- State variables
- Derivates
- Output variables
- Auxiliary variables

Beim betrachteten Fernwärmenetzmodell handelt es sich um ein steifes Gleichungssystem, es finden jedoch keine Ereignisse statt. Die Übergänge von einem Zustand zum nächsten erfolgen langsam, daher wurde mit dem Dassl Algorithmus gearbeitet.

Da die Verbraucherfunktionen in Zeitschritten von 100s vorgegeben sind, wurde auch als Schrittweite (Interval length), in der die Ergebnispunkte gespeichert werden, 100s gewählt.

Um die Simulationsgeschwindigkeiten in verschiedenen Phasen, z. B. stationäre Vorphase und dynamische Phase, vergleichen zu können, wurde die CPU Zeit als Simulationsergebnis abgespeichert.

Da die Menge an zu speichernden Daten einen Einfluss auf die Simulationsgeschwindigkeit haben kann, wurden die oben angegebenen Outputgrößen ausgewählt.

Die stationäre Vorphase geht von $t = 0\text{s}$ bis $t = 36001\text{s}$.

8.2 Zur Verfügung stehende Rechnerleistung, verwendete Programme

Windows 7 Enterprise

64 Bit-Betriebssystem

Prozessor: Intel® Xeon® CPU, W3540 @2.93GHz 2.93 Ghz

Installierter Arbeitsspeicher (RAM): 16,0 GB

Die Simulationen wurden mit Dymola – Dynamic Modeling Laboratory Version 2013 (64-bit), 2012-03-28 durchgeführt.

Zur Auswertung wurde ebenfalls mit Dymola, sowie mit MATLAB Version R2014a (8.3.0.532) (64-bit), 2014-02-11, gearbeitet.

8.3 Funktionstüchtigkeit der Komponente Hauptleitungsrohr

8.3.1 Versuchsbeschreibung

Die Funktionstüchtigkeit des Hauptleitungsstrangs wurde in drei Schritten überprüft:

1. 10 Rohre, unverzweigt

- HL01 bis HL10
- Randbedingungen:
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 8 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 3 \text{ bar}$
Da die Randbedingung hier weiter vorne im Netz liegt, wird von einer größeren Druckdifferenz ausgegangen als bei den Folgeversuchen.
- Vorgabe eines konstanten Massenstroms im Netz von 10 kg/s

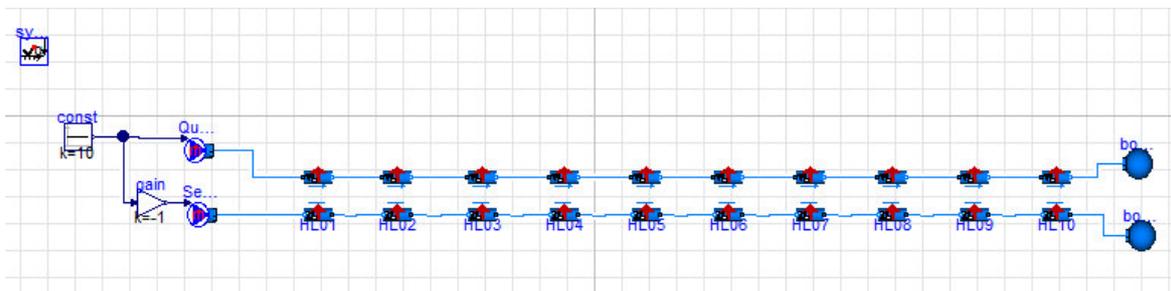


Abbildung 21: 10 Hauptleitungsrohre

2. 68 Rohre, unverzweigt

- HL01 bis HL68
- Randbedingungen:
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 5,5 \text{ bar}$
- Vorgabe eines konstanten Massenstroms im Netz von 6 kg/s

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

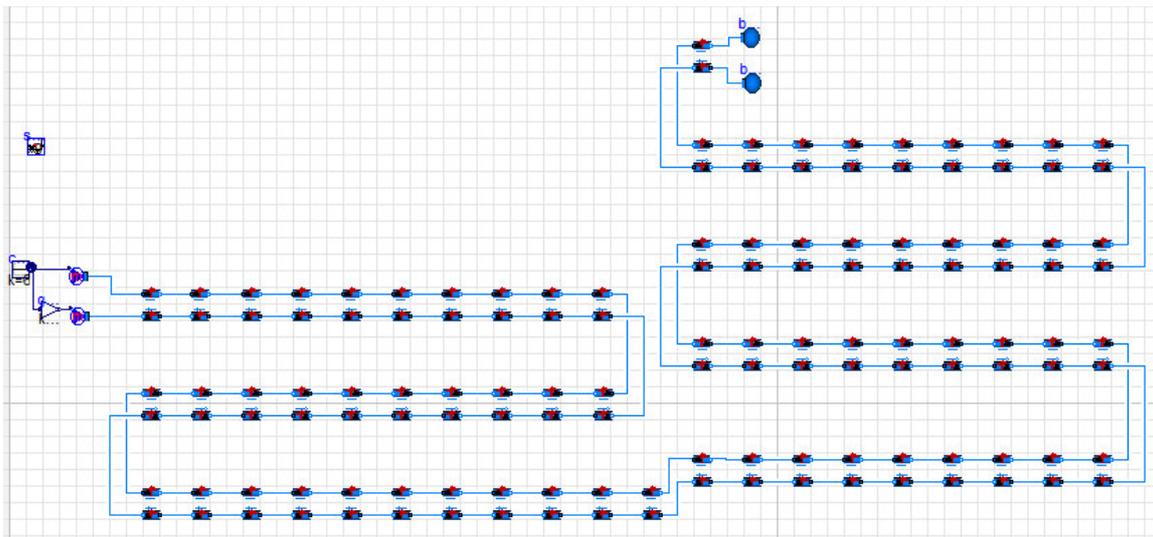


Abbildung 22: 68 Hauptleitungsrohre

3. 90 Rohre, eine Verzweigung

- Alle Hauptleitungsrohre: HL01 bis HL90
- Verzweigung bei HL31
Randbedingung am oberen Astende angebracht. Am unteren Astende eine Massenstromvorgabe mittels Valve_mFlow von 5 kg/s
- Randbedingungen:
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 5,5 \text{ bar}$
- Vorgabe eines konstanten Massenstroms im Netz von 10 kg/s

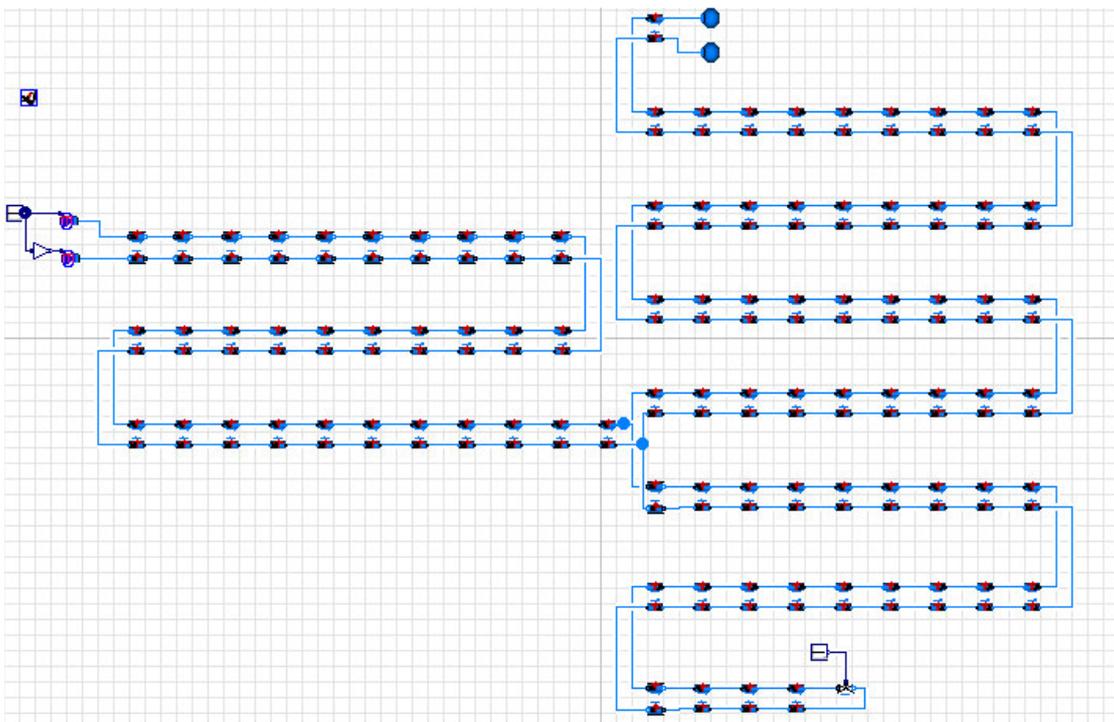


Abbildung 23: 90 Hauptleitungsrohre

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

8.3.2 Ergebnisse

Vergleich der Simulationszeiten:

Tabelle 1:

	Zeit für Translation (manuell gestoppt)	Zeit für Simulation (CPU-time for integration)
10 Rohre, unverzweigt	16 s	6,11 s
68 Rohre, unverzweigt	81 s	22,9 s
90 Rohre, verzweigt	113 s	39,4 s

Beim Versuch 68 Rohre, unverzweigt handelt es sich um ein sehr langes Rohr. Daher ist eine sehr große Druckdifferenz notwendig, um einen großen Massenstrom fließen zu lassen. Deshalb kam es bei der ursprünglichen Einstellung, bei der ein Massenstrom von 10 kg/s vorgegeben wurde, zu Berechnungsproblemen. Der Druck im Rücklauf von HL01 sank unter 1bar ab.

Es gab mehrere Lösungsvarianten: Massenstrom absenken, Rohrleitung verkürzen oder Druck in der Randbedingung für den Rücklauf erhöhen. Es wurde ein Absenken des Massenstroms auf 6 kg/s gewählt.

Beim Versuch 90 Rohre, verzweigt gab es für vier verschiedene Zeitpunkte Warnhinweise, bei denen der Lösungsalgorithmus Berechnungsschwierigkeiten hatte.

Diese hatten die Form: „ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver.[...] at time = 120903 [...] Iteration is not making good progress. [...] Solver will attempt to handle this problem.“

Bei den anderen beiden Versuchen gab es keine Warnhinweise.

8.4 Funktionstüchtigkeit der Komponente Verbraucher

8.4.1 Versuchsbeschreibung kleines Modell

Mit dem Modell Verbraucher werden einzelne Hausanschlüsse dargestellt.

Hier wurden zunächst in drei Schritten Hausanschlüsse in einen kurzen Netzabschnitt, mit 10 Hauptleitungsrohren HL01 bis HL10, eingebaut.

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

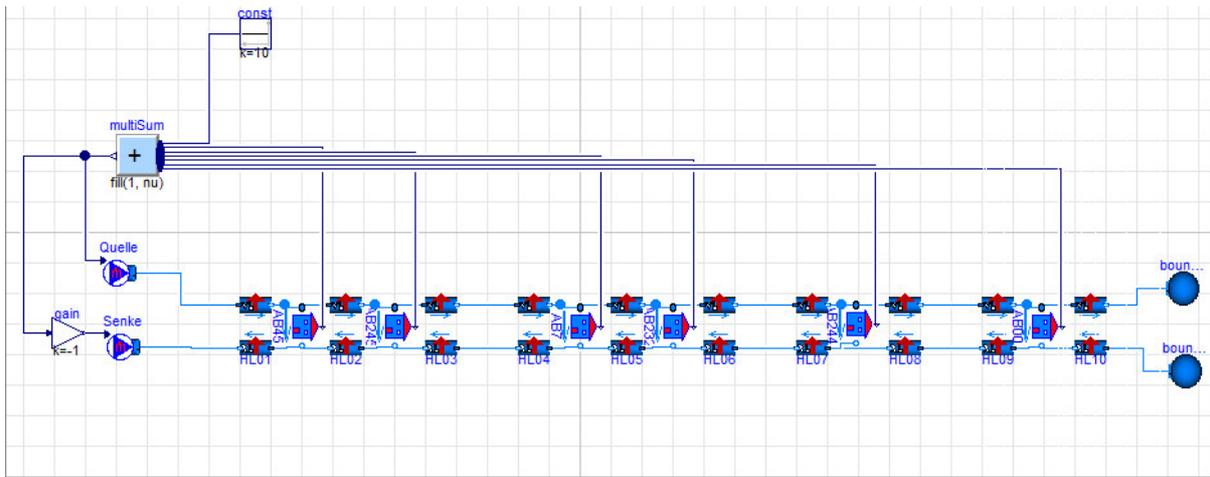


Abbildung 24: 10 Hauptleitungsrohre, 6 Verbraucher

1. 1 Verbraucher (AB45)
2. 2 Verbraucher (AB45, AB7)
3. 6 (=alle) Verbraucher

Bei allen drei Versuchen gilt:

- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme in den Verbrauchern, plus 10 kg/s als Ersatz für das Restnetz.
- Randbedingungen
 Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 8 \text{ bar}$
 Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 3 \text{ bar}$

8.4.2 Ergebnisse kleines Modell

Alle drei Varianten konnten erfolgreich simuliert werden.

Vergleich der Simulationszeiten:

Tabelle 2:

	Zeit für Translation (manuell gestoppt)	Zeit für Simulation (CPU-time for integration)
1 Verbraucher	21 s	175 s
2 Verbraucher	22 s	344 s
6 Verbraucher	29 s	1560 s

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

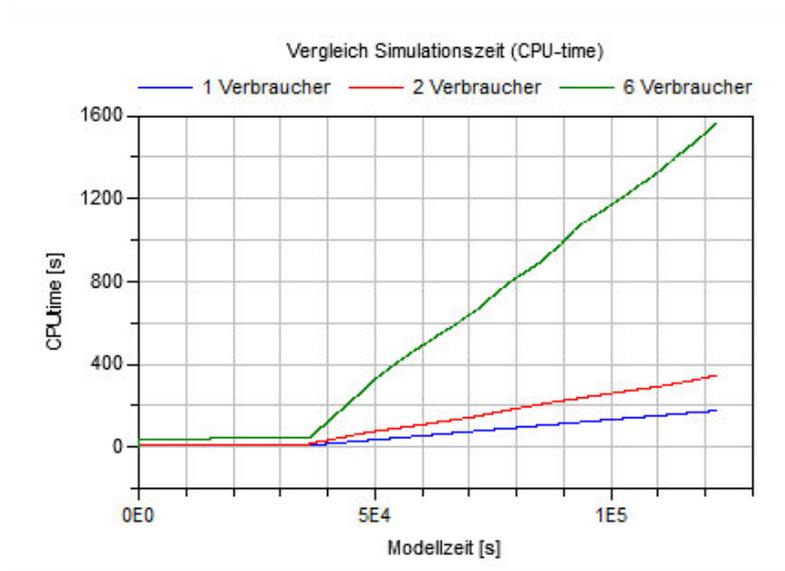


Abbildung 25: Vergleich der Rechenzeiten bei 1, 2 und 6 Verbrauchern

Versuchsbeschreibung erweitertes Modell

Der kurze Rohrstrang wurde weiter ausgebaut. Folgende Versuche sollen hier herausgegriffen werden:

1. Hauptleitungsstrang mit 31 Rohren und 14 Verbrauchern

- HL01 bis HL31
- 14 (= alle) Verbraucher
- Randbedingungen
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 7 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 4 \text{ bar}$
- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme in den Verbrauchern, plus 9 kg/s als Ersatz für das Restnetz.

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

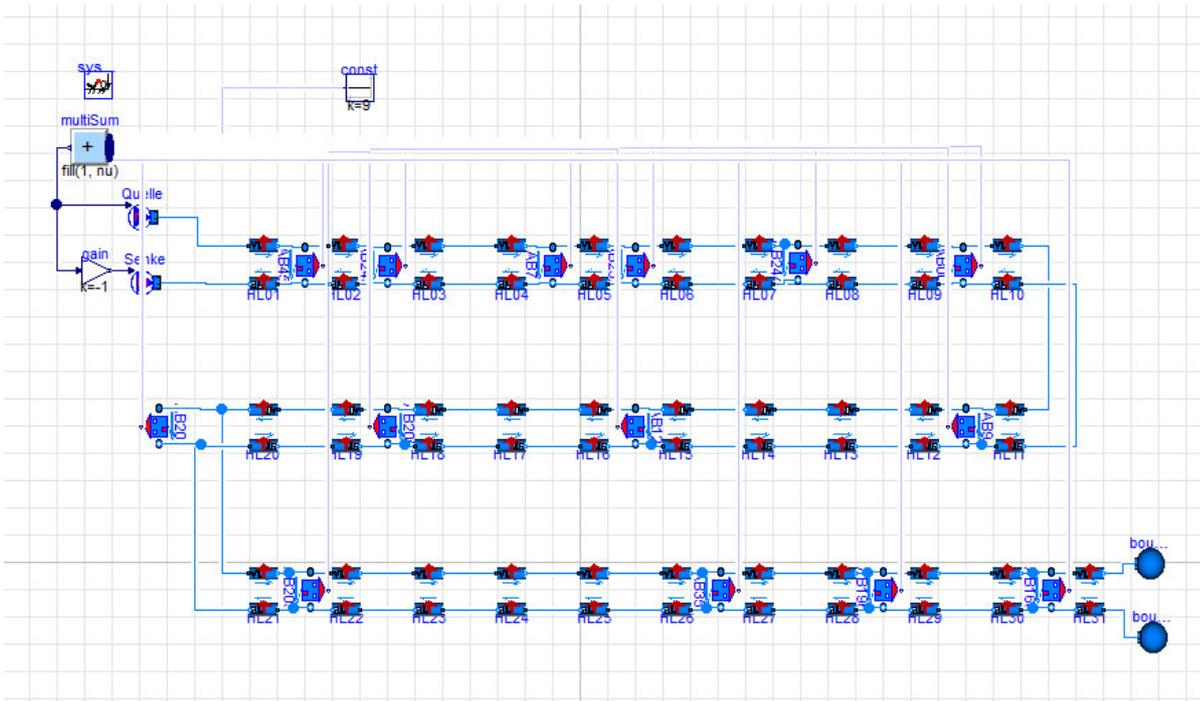


Abbildung 26: 31 Hauptleitungsrohre, 14 Verbraucher

2. Hauptleitungsstrang mit 90 Rohren, verzweigt und 14 Verbrauchern

- HL01 bis HL90
- 14 Verbraucher im ersten Abschnitt
- Randbedingungen
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 5,5 \text{ bar}$
- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme in den Verbrauchern, plus 10 kg/s als Ersatz für das Restnetz.
- Verzweigung bei HL31
Randbedingung am oberen Astende angebracht. Am unteren Astende eine Massenstromvorgabe mittels Valve_mFlow von 5 kg/s .

3. Hauptleitungsstrang mit 68 Rohren und 42 Verbrauchern

- HL01 bis HL68
- 42 (=alle) Verbraucher
- Randbedingungen
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 5,5 \text{ bar}$
- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme in den Verbrauchern, plus 6 kg/s als Ersatz für das Restnetz.

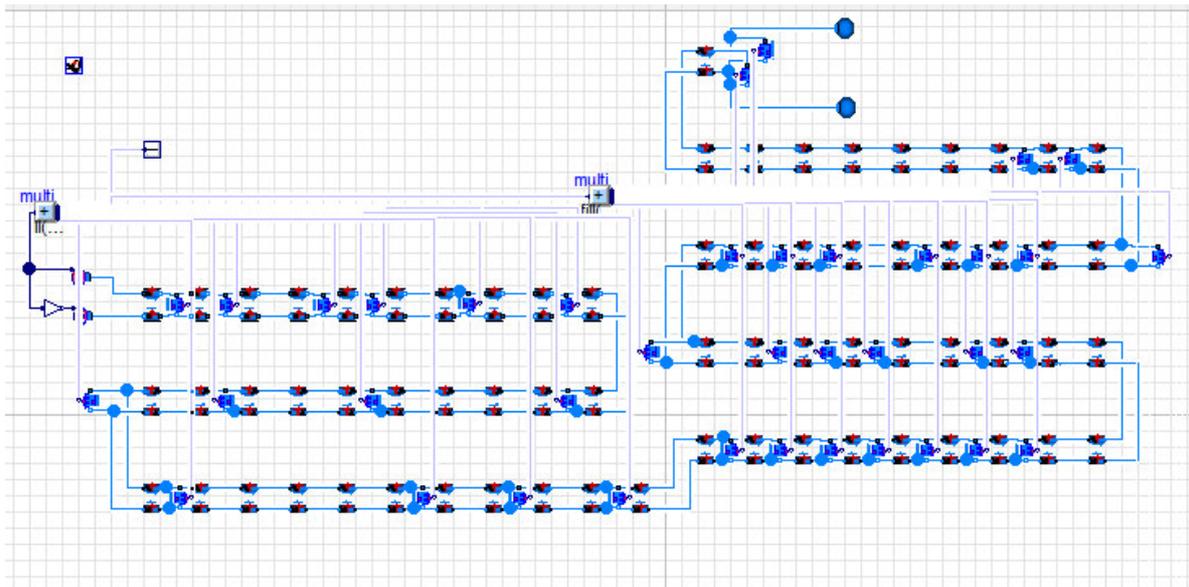


Abbildung 27: 68 Hauptleitungsrohre, 42 Verbraucher

4. Hauptleitungsstrang mit 68 Rohren und 42 Verbrauchern

- HL01 bis HL68
- 42 (=alle) Verbraucher
- Randbedingungen
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 7 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$
- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme in den Verbrauchern, plus 6 kg/s als Ersatz für das Restnetz.

5. Hauptleitungsstrang mit 90 Rohren, verzweigt und 56 Verbrauchern

- HL01 bis HL90
- 56 (= alle) Verbraucher
- Randbedingungen
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 7 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 6 \text{ bar}$
- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme in den Verbrauchern, plus 10 kg/s als Ersatz für das Restnetz.
- Verzweigung bei HL31
Randbedingung am oberen Astende angebracht. Am unteren Astende eine Massenstromvorgabe mittels Valve_mFlow von 5 kg/s .

8.4.3 Ergebnisse erweitertes Modell

Die beiden Versuche mit 14 Verbrauchern lassen sich simulieren. Bei mehr Verbrauchern funktioniert die Simulation nicht.

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

Vergleich der Simulationszeiten:

Tabelle 3:

	Zeit für Translation (manuell gestoppt)	Zeit für Simulation (CPU-time for integration)
31 Rohre, 14 Verbraucher	68 s	8310 s
90 Rohre, 14 Verbraucher	446 s	30000 s
68 Rohre, 42 Verbraucher $p_{VL} = 6 \text{ bar}$, $p_{RL} = 5,5 \text{ bar}$	226 s	-
68 Rohre, 42 Verbraucher $p_{VL} = 7 \text{ bar}$, $p_{RL} = 6 \text{ bar}$	193 s	-
90 Rohre, 56 Verbraucher	235 s	-

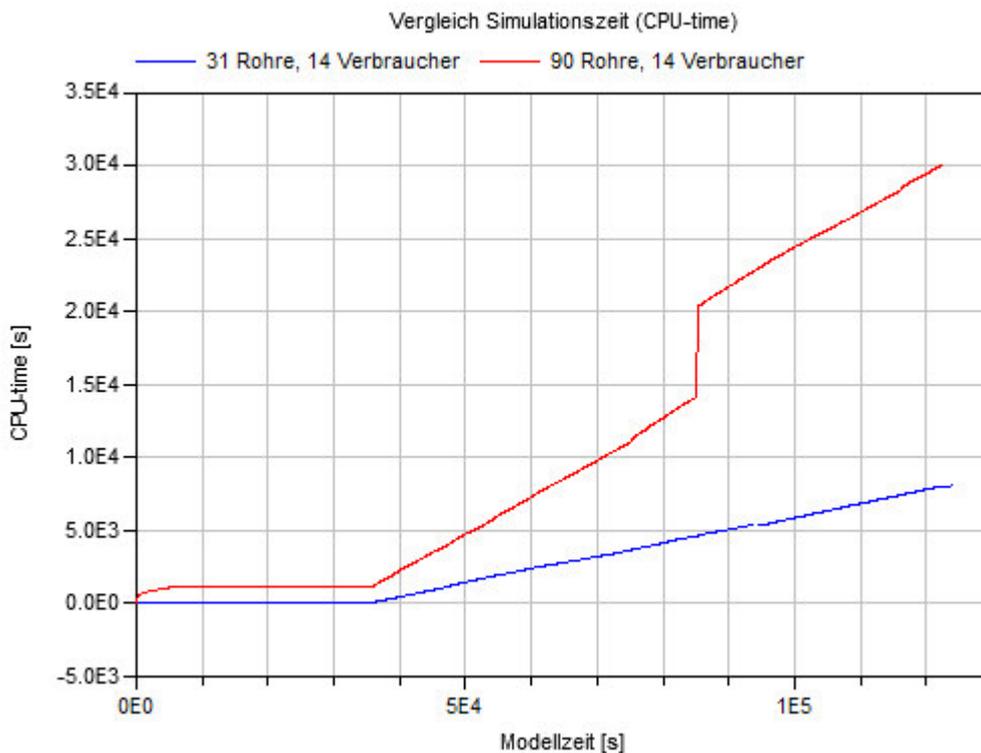


Abbildung 28: Vergleich der Rechenzeiten bei 31 Rohren und 90 Rohren mit jeweils 14 Verbrauchern

31 Rohre, 14 Verbraucher

- Die Simulation konnte erfolgreich abgeschlossen werden.
- In der Initialisierungsphase gab es Warnhinweise zu Berechnungsschwierigkeiten. „ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver.[...] at time = 4.70969E-008 [...] Iteration is not making good progress. [...] Solver will attempt to handle this

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

problem.“

- Bei time = 9,360216e+004 s Unterbrechung der Berechnung mit Fehlermeldung:
„At time T = 9.360216e+004 and stepsize H = 1.277435e-007 the corrector could not converge.
Repeated convergence test failures occurred on the last attempted step in the code. An inaccurate or ill-conditioned Jacobian may be the problem. Integration will be terminated.“
Weiterrechnen mit Befehl „continue“ möglich.

90 Rohre, 14 Verbraucher

- Die Simulation konnte erfolgreich abgeschlossen werden.
- Mehrmals Warnungen
„ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver.[...] Iteration is not making good progress. [...] Solver will attempt to handle this problem.“
- Einmal Warnung
„... Warning message from dymosim
At time T = 8.510100e+004 in current integration interval T_interval = 8.510000e+004 ... 8.520000e+004 a large amount of work has been expended (about 500 steps) in the integrator. Probably the communication interval is too large or the system is stiff.“
An dieser Stelle ist eine Sprungstelle im Verlauf der CPU-Zeit zu sehen.

68 Rohre, 42 Verbraucher

- $p_{VL} = 6$ bar, $p_{RL} = 5,5$ bar: Kann nicht berechnet werden. Der Algorithmus kommt nicht über den ersten Zeitschritt hinweg. Fehlermeldung:
„... Error message from dymosim
At time T = 0.000000e+000 and stepsize H = 1.185245e-010 the matrix of partial derivatives (= Jacobian) is singular. Some of the model equations may be redundant. The code cannot solve the problem as stated. It is possible that the redundant equations could be removed, and then the code could solve the problem. It is also possible that a solution to your problem either does not exist or is not unique. Integration will be terminated.“
- $p_{VL} = 7$ bar, $p_{RL} = 6$ bar: Kann nicht berechnet werden. Der Algorithmus kommt auch hier nicht über die ersten Rechenschritte hinweg. Die Fehlermeldung ist jedoch eine andere:
... Error message from dymosim
At time T = 2.749400e-003 and stepsize H = 1.147916e-010 the corrector could not converge because IRES was equal to minus one. Integration will be terminated. Integration terminated before reaching "StopTime" at T = 0.00275
CPU-time for integration : 549 seconds
Davor werden Warnhinweise „ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver. [...] Iteration is not making good progress. [...] Solver will attempt to handle this problem.“ gegeben.

90 Rohre, 56 Verbraucher

- Kann nicht berechnet werden. Der Algorithmus kommt hier nicht über die ersten

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

Rechenschritte hinweg.

- Warnhinweise und endgültige Fehlermeldung:
„ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver. [...] Solution to systems of equations not found at time = 0.385645 [...] Number of calls to nonlinear solver DymNL has reached or exceeded the maximum allowed number of function calls= 1000 [...]“
Integration terminated before reaching "StopTime" at T = 0.016
CPU-time for integration : 2.66e+003 seconds“

8.5 Funktionstüchtigkeit der Komponente Teilast

8.5.1 Versuchsbeschreibung Einzeläste

Mit der Komponente „Teilast“ werden die, wie im Kapitel 7 erläutert, vereinfachten Netzabschnitte dargestellt.

Es wurde mit einem kleinen Modell begonnen:

- 10 Hauptleitungsrohre HL01 bis HL10
- Genau ein Teilast
- Randbedingungen:
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 8 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 3 \text{ bar}$
- Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme durch den Teilast, plus 10 kg/s als Ersatz für das Restnetz.

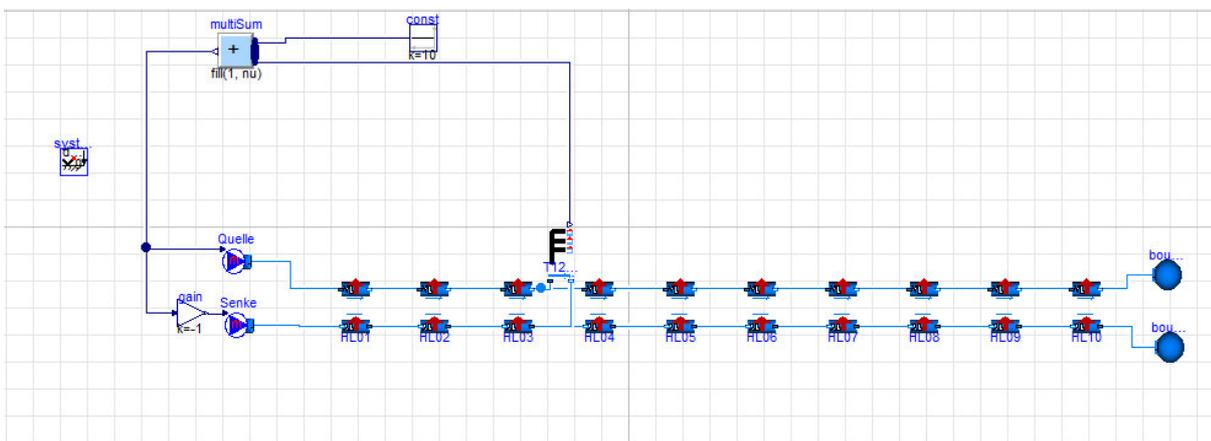


Abbildung 29: 10 Hauptleitungsrohre, 1 Teilast

In dem Abschnitt befinden sich drei verschiedene Teiläste:

- T12_01 zwischen HL08 und HL09
- T12_02 zwischen HL06 und HL07
- T12_03 zwischen HL03 und HL04

8.5.2 Ergebnisse Einzelläste

Für eine erfolgreiche Simulation, mussten ausreichend hohe Massenströme in den Teillasten garantiert werden. Bei jeder Massenstromvorgabe ist ein Limiter eingebaut. In Tabelle 4 sind die eingestellten Mindestmassenströme angegeben.

Weiters war es ausschlaggebend, dass in der Initialisierungsphase ausreichend hohe Massenströme vorliegen. Daher wurde in der stationären Vorphase eine hohe Wärmeentnahme von 14000 W, die zu einem entsprechend hohen Massenstrom führt, vorgegeben. In dieser Konfiguration konnten die Simulationen erfolgreich durchgeführt werden.

Tabelle 4:

	Lim_E0	Lim_E1	Lim_E2
T12_01	0,02 kg/s	0,02 kg/s	0,02 kg/s
T12_02	0,01 kg/s	0,02 kg/s	0,02 kg/s
T12_03	0,02 kg/s	0,02 kg/s	0,05 kg/s

In der Initialisierungsphase gab es Warnhinweise zu Berechnungsschwierigkeiten. „ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver[...] Solution to system of equations not found [...] Solver will attempt to handle this problem.“

Beim Versuch mit Teilast T12_02 kam es jedoch bei time = 5,680110e+004 s zu einer Unterbrechung der Berechnung mit Fehlermeldung: „At time T = 5.680110e+004 and stepsize H = 1.888275e-007 the corrector could not converge. Repeated convergence test failures occurred on the last attempted step in the code. An inaccurate or ill-conditioned Jacobian may be the problem. Integration will be terminated.“

Weiterrechnen mit Befehl „continue“ möglich.

Vergleich der Simulationszeiten:

Tabelle 5:

	Zeit für Translation (manuell gestoppt)	Zeit für Simulation (CPU-time for integration)
T12_01	24 s	509 s
T12_02	23 s	775 s
T12_03	23 s	530 s

8.5.3 Versuchsbeschreibung mehrere Teiläste

Im erweiterten Modell wurden nun alle drei Teiläste gleichzeitig eingefügt.

- 10 Hauptleitungsrohre HL01 bis HL10
- 3 Teiläste: T12_01, T12_02, T12_03
- Randbedingungen:
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 8 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 3 \text{ bar}$

Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme durch die Teiläste, plus 10 kg/s als Ersatz für das Restnetz.

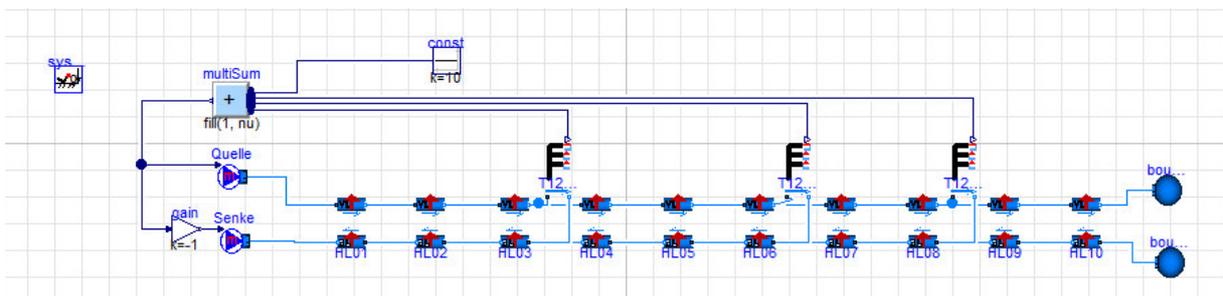


Abbildung 30: 10 Hauptleitungsrohre, 3 Teiläste

Die Mindestmassenströme wurden auf die Werte der Einzelversuche gesetzt. In der Vorphase wurde wieder mit einem hohen Wärmestrom von 14000 W gerechnet.

8.5.4 Ergebnisse mehrere Teiläste

- Die Simulation konnte erfolgreich abgeschlossen werden.
- In der Initialisierungsphase gab es Warnhinweise zu Berechnungsschwierigkeiten. „ERROR: Failed to solve non-linear system using Newton solver.[...] Solution to system of equations not found [...] Solver will attempt to handle this problem.“
- Bei time = $7,570107e+004 \text{ s}$, Unterbrechung der Berechnung mit Fehlermeldung: „At time T = $7.570107e+004$ and stepsize H = $9.441376e-008$ the corrector could not converge. Repeated convergence test failures occurred on the last attempted step in the code. An inaccurate or ill-conditioned Jacobian may be the problem. Integration will be terminated.“ Weiterrechnen mit Befehl „continue“ möglich.
- Zeit für Translation (manuell gestoppt): 34 s
Zeit für Simulation (CPU-time für integration): 6624 s

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

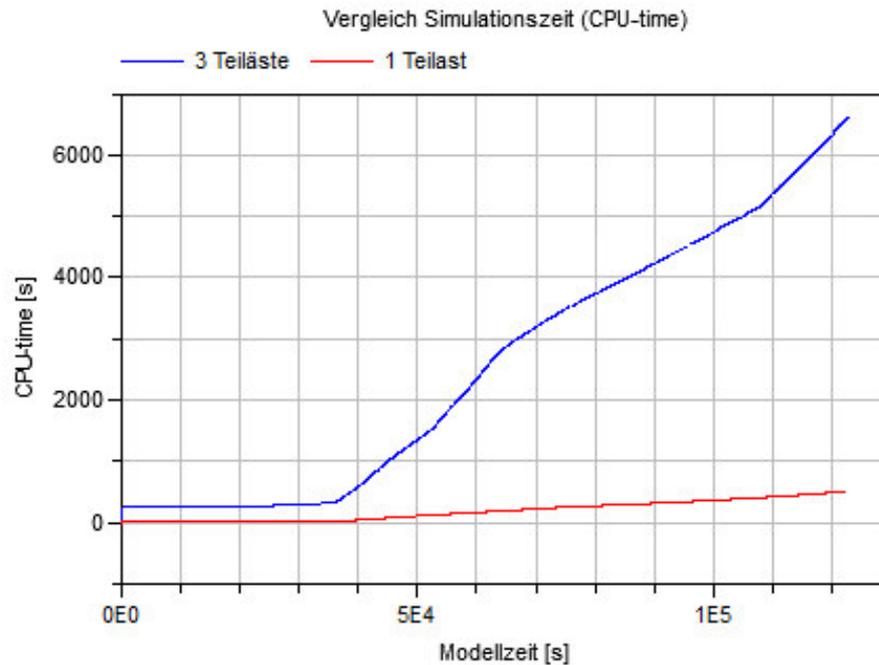


Abbildung 31: Vergleich der Rechenzeiten bei 10 Hauptleitungsrohren mit 1 bzw. 3 Teilästen

8.6 Funktionstüchtigkeit vollständige Netzstruktur

8.6.1 Versuchsbeschreibung kleines Modell

Hier wurde erneut mit dem ersten Netzabschnitt gearbeitet. In diesen wurden nun alle Verbraucher und Teiläste integriert.

- 10 Hauptleitungsrohre HL01 bis HL10
- 6 Verbraucher
- 3 Teiläste: T12_01, T12_02, T12_03
- Randbedingungen:
Vorlauf: $T = 370 \text{ K}$, $p = 8 \text{ bar}$
Rücklauf: $T = 320 \text{ K}$, $p = 3 \text{ bar}$

Der Massenstrom im Gesamtnetz ergibt sich aus der Summe der Massenströme durch die Teiläste und Verbraucher, plus 10 kg/s als Ersatz für das Restnetz. Für die Teiläste wurden die Mindestmassenströme auf die Werte der Einzelversuche gesetzt. In der Vorphase wurde wieder mit einem hohen Wärmestrom von 14000 W gerechnet. Bei den Verbrauchern wurde ein Mindestmassenstrom von $0,02 \text{ kg/s}$ vorgegeben.

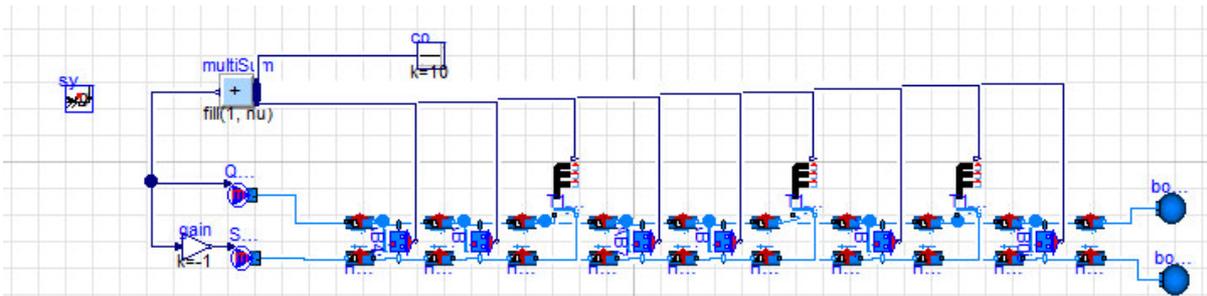


Abbildung 32: 10 Hauptleitungsrohre, 3 Teiläste

8.6.2 Ergebnisse kleines Modell

- Die Simulation konnte erfolgreich abgeschlossen werden.
- In der Initialisierungsphase gab es Warnhinweise zu Berechnungsschwierigkeiten: „The following error was detected at time: [...] error in region computation of IF97 steam tables [...] Non-linear solver will attempt to handle this problem.“
- Zeit für Translation (manuell gestoppt): 42 s
Zeit für Simulation (CPU-time für integration): 18400 s

Ein Modell des kompletten Netzes konnte nicht simuliert werden. Die Berechnungen brechen bereits in der Initialisierungsphase ab. Hier müsste man sehr detailliert für jeden Verbraucher geeignete Startbedingungen und Massenstromlimits auswählen. Eine erfolgreiche Berechnung würde anschließend viele Stunden brauchen.

8.7 Diskussion der Ergebnisse des schrittweisen Netzaufbaus

Die aus den Komponenten der Modelica Standard Library zusammengestellten Bauteile sind grundsätzlich funktionstüchtig.

Die Simulationen des Hauptleitungsstrangs zeigen, dass auch lange Rohrstränge problemlos aus DynamicPipes aufgebaut werden können, solange realistische physikalische Randbedingungen vorliegen. Sobald sich die Rohrstränge verzweigen, kommt es zu Warnhinweisen von Seiten des Lösungsalgorithmus. Es zeigt sich: Je stärker verzweigt ein Netz ist, desto komplizierter die Berechnungen. Gleichzeitig steigen die Berechnungszeiten an. Das ist ungünstig für die Simulation eines Fernwärmenetzes, bei dem jeder einzelne Verbraucher eine abzweigende Rohrleitung bedeutet.

Bei den Tests zur Komponente Verbraucher ist, mit jedem zugeschalteten Bauteil, ein sehr starker Anstieg der Simulationszeit zu beobachten. Ein Einflussfaktor sind die hinzukommenden Verzweigungen der Rohrleitungen. Ein weiterer Faktor ist die Regelung des Massenstroms im Netz. In jedem Verbraucher werden die Massenströme aus den „gemessenen“ Temperaturen berechnet, welche aber vom Massenstrom beeinflusst werden. Die Verbrauchermassenströme regeln wiederum den Gesamtmassenstrom im Netz, dessen Änderung die Druckverhältnisse beeinflusst und somit wieder die Zustandsgrößen in den Verbrauchern usw. Man sieht also, dass sich ein wesentlich komplexeres Gleichungssystem ergibt, als bei der konstanten Massenstromvorgabe, für die Versuche zu den Hauptleitungsrohren. Daraus folgt eine längere Rechenzeit.

Weiters ist an den Rechenzeiten zum kleinen Verbraucher Modell sichtbar, in welchen Phasen der Solver am meisten Schwierigkeiten hat. Je komplexer das Modell, desto schwieriger ist es,

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

von den Startwerten ausgehend, eine geeignete Initialisierung durchzuführen. Das sieht man in Abbildung 25 daran, dass sich der Startzeitpunkt der tatsächlichen Berechnung nach oben verschiebt. In dieser Phase werden auch die meisten Warnhinweise vom Solver gegeben. Die stationäre Berechnungsphase, bei der alle vorgegebenen Werte konstant gehalten werden, kann schnell berechnet werden. Hier ist kaum ein Unterschied zwischen den Modellen zu sehen. Erst in der dynamischen Phase sieht man wieder einen starken Unterschied im Verlauf der Berechnungszeiten. Über die dynamische Phase hinweg, steigt die CPU-Zeit dann (fast) linear.

Wird das Modell weiter vergrößert (s. Verbraucher – erweitertes Modell) so steigt die Rechenzeit weiter an. Bei 31 Rohren und 14 Verbrauchern liegt sie bereits bei 2,3 h. Ab einer Größe von 42 Verbrauchern wurde in der Initialisierungsphase keine Lösung mehr gefunden. Am erweiterten Modell ist zu sehen, dass plötzliche Änderungen im System dem Lösungsalgorithmus Schwierigkeiten bereiten. Beim Versuch 90 Rohre, 14 Verbraucher war eine Sprungstelle im Verlauf der CPU-Zeit zu sehen (s. Abbildung 28).

Es handelt sich um eine Stelle, bei der mehrere Verbraucherfunktionen, nach längerer gleichbleibender Wärmeabnahme, wieder ihr Verhalten verändern. Somit ändert sich auch ihre Massenstromvorgabe. Da in der Berechnung immer von den vorhergehenden Werten ausgegangen wird, führen solche Stellen zu Berechnungsschwierigkeiten.

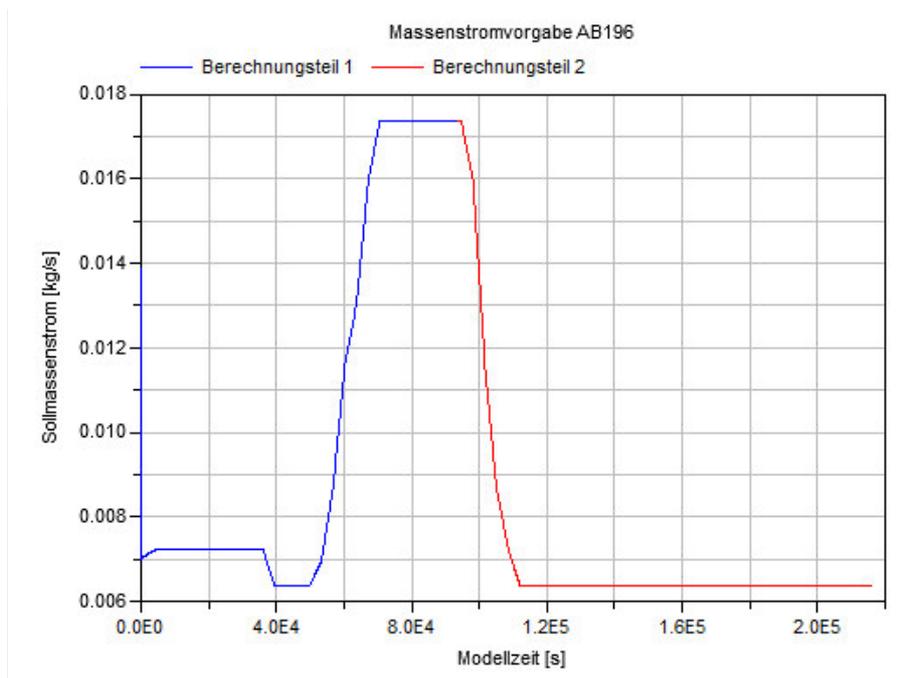


Abbildung 33: Massenstromvorgabe AB196, Knick in der Funktion

Es konnte beobachtet werden, dass große Druckdifferenzen und große Massenströme (im Rahmen des physikalisch möglichen) meist zu einer stabileren Simulation führen. Es war für eine erfolgreiche Simulation notwendig Mindestmassenströme in den Verbrauchern vorzugeben. Grundsätzlich würde die Vorgabe eines Mindestmassenstroms auch im realen Netz sinnvoll sein, um ein Auskühlen der Leitungen, auch ohne Wärmeabnahme vom Verbraucher, zu verhindern. Die, für die erfolgreiche Simulation notwendige, Vorgabe von 0,02 kg/s war jedoch stellenweise hoch, im Vergleich zu den für die Wärmeabnahme notwendigen

8 Simulationen zum schrittweisen Netzaufbau

Massenströmen.

Die Versuche zu den Teillasten bestätigen die oberen Ergebnisse. Mit zunehmender Modellgröße steigt die Rechenzeit. Die größte Hürde ist die Initialisierungsphase, wobei größere Massenströme zu einer stabileren Berechnung führen (daher große Massenstromvorgaben in der Vorphase). Da es sich um vereinfachte Seitenäste handelt, die keine realen Rohrgeometrien aufweisen, ist die Wahl der Mindestmassenströme sehr einflussreich. Besonders durch das letzte Rohrstück muss genug Fluid fließen, um eine stabile Berechnung zu ermöglichen. Hier scheint das System auf physikalische Grenzen zu stoßen. Bei Teilast T12_03 wurde das genauer untersucht: Dieser verlangt einen Mindestmassenstrom von 0,05kg/s im letzten Rohrabschnitt (E2). In diesem Abschnitt sind die Strömungsgeschwindigkeiten, auch bei hohen Massenströmen, geringer als bei den anderen Teillasten. Das liegt an der vereinfachten Rohrgeometrie. Der Abschnitt hat einen verhältnismäßig großen Durchmesser. Es wurde ein Zusatzversuch durchgeführt, bei dem der Durchmesser der Rohre in T12_03_E2 verkleinert wurde. Bei dieser Dimensionierung der Rohrleitungen konnte, auch mit einem geringeren Mindestmassenstrom im Verbraucher T12_03_E2, erfolgreich simuliert werden.

Die Zeit für die Übersetzung (Translation) des Modells hält sich, im Vergleich zur Simulationszeit, in Grenzen. Nur bei sehr kleinen Modellen (reiner Hauptleitungsstrang) übersteigt sie gelegentlich die Simulationszeit. Beim 10-Rohre-Modell liegt sie, egal in welcher Kombination Verbraucher und Teiläste eingebaut wurden, immer in der Größenordnung von einer Minute. Erst wenn das Netz erheblich größer wird, steigt sie in Richtung 10 Minuten an. Im Vergleich zur dazugehörigen Berechnungszeit bleibt sie jedoch kurz.

Die Versuche zur vollständigen Netzstruktur anhand eines kleinen Netzabschnittes zeigen, dass die Komponenten auch im Zusammenspiel funktionieren. Das Modell ist in dieser Form aber für eine Verwendung durch Netzbetreiber nicht geeignet. Die Simulation des kurzen Netzabschnittes benötigt 5 h. Das Netz in Großarl ist ungefähr neun Mal so groß, und es handelt sich um kein großes Fernwärmenetz. Eine Simulation für die Betriebssteuerung, ist somit nicht sinnvoll möglich. Weiters würde die geeignete Parametrisierung des gesamten Netzes (Startwerte, Massenstromlimits), sehr viele Arbeitsstunden und langwierige Zwischentests benötigen.

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

Hier war das Ziel, anhand eines Netzabschnitts mit 15 Verbrauchern, verschiedene Modelle untereinander zu vergleichen:

Das Modell mit Originalverbrauchern und denselben Abschnitt in seiner, nach Larsen et al. [24], vereinfachten Form.

Weiters den Netzabschnitt mit 15 Verbrauchern in Modelica simuliert, mit einem Modell aus MATLAB Simscape. Die Daten zur Simulation in MATLAB stammen von Johannes Nagler [1].

Beim ausgewählten Netzabschnitt handelt es sich um den Seitenast T11 des Fernwärmenetzes in Großarl.

Für Angaben zur Solvereinstellung, der eingesetzten Rechnerleistung und der verwendeten Programme siehe Kapitel 8.

Um am Astein- und -austritt sinnvolle Druck und Temperaturverhältnisse zu erreichen, wurde das restliche Netz, durch drei Hauptleitungsrohre und jeweils einen großen Verbraucher vor und nach der Abzweigung zum Ast, ersetzt. Es gibt jeweils eine Massenstromquelle für den Vor- und Rücklauf, die ihre Massenstromvorgabe aus der Summe der in den Verbrauchern (und Großverbrauchern) benötigten Durchsätze berechnet. Die Differenzdruckregelung am Netzende ist durch jeweils eine Druckrandbedingung am Vorlauf und am Rücklauf gegeben: $p_{VL} = 6 \text{ bar}$, $p_{RL} = 5.5 \text{ bar}$.

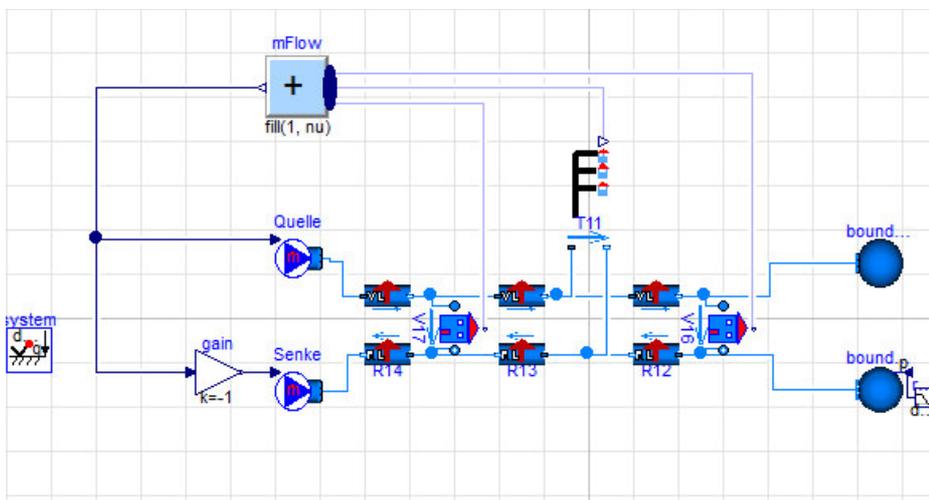


Abbildung 34: Ersatzmodell für das Gesamtnetz anhand des Modells mit vereinfachtem Teillast

In den detaillierten Diagrammen im Anhang B befinden sich umfangreichere Diagramme mit Berechnungsergebnissen der Simulation. Als Ergänzung wird in den Diagrammen die Differenz zwischen den Ergebnisgrößen der beiden Simulationen gebildet:

$$\text{Differenz}(K) = K_{Dymola} - K_{Simscape} \quad (16)$$

K ... verglichene Zustandsgröße

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

Um die Abweichungen besser einzustufen zu können, wurde sie auf den Absolutwert der Zustandsgröße im Dymola-Modell bezogen. So bilden sich die relativen Differenzen:

$$\text{relative Differenz}(K) = \frac{K_{Dymola} - K_{Simscape}}{K_{Dymola}} \quad (17)$$

Es wird immer nur der Zeitbereich der dynamischen Simulation abgebildet. Die stationäre Vorphase wird nicht angezeigt (daher Start bei $t = 36000$ s).

9.1 Vergleich Dymola mit Simscape

Um die beiden Simulationen zu vergleichen, wurden Daten an vier Stellen im Modell ausgelesen: Am Heizwerk, an der Abzweigung des Astes, am letzten Verbraucher V15 und an einem weiteren Verbraucher V7.

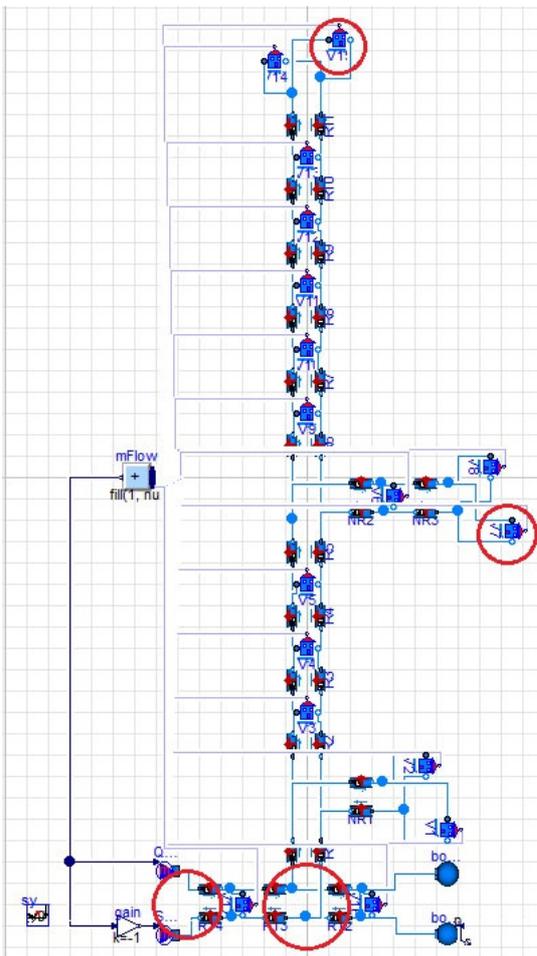


Abbildung 35: 15-Verbrauchermodell in Dymola mit Markierung der verglichenen Stellen

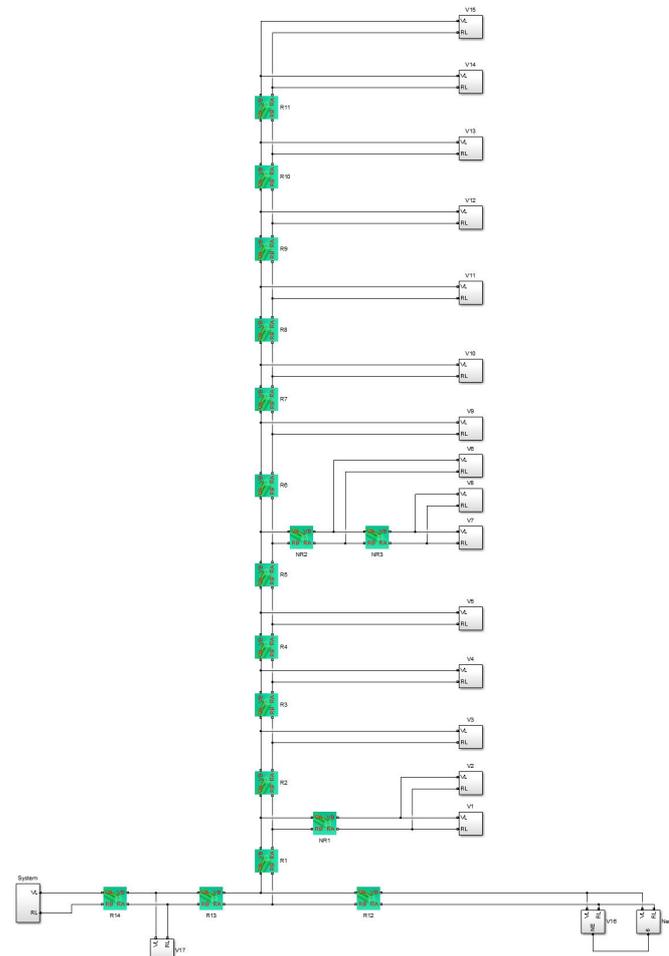


Abbildung 36: 15-Verbrauchermodell in Simscape

Quelle: Johannes Nagler: 15-Verbrauchermodell (2015)

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

9.1.1 Vergleich der Rechenzeiten

Die Simulation des Dymola-Modells braucht $24985 \text{ s} = 7 \text{ h}$. Die Übersetzung braucht 54 s . Die Simulation des Simscape-Modells benötigt 40 s .

Hier zeigt sich erneut, dass die Rechenzeiten des Dymola-Modells jeden sinnvollen Rahmen sprengen.

9.1.2 Vergleich der Massenströme

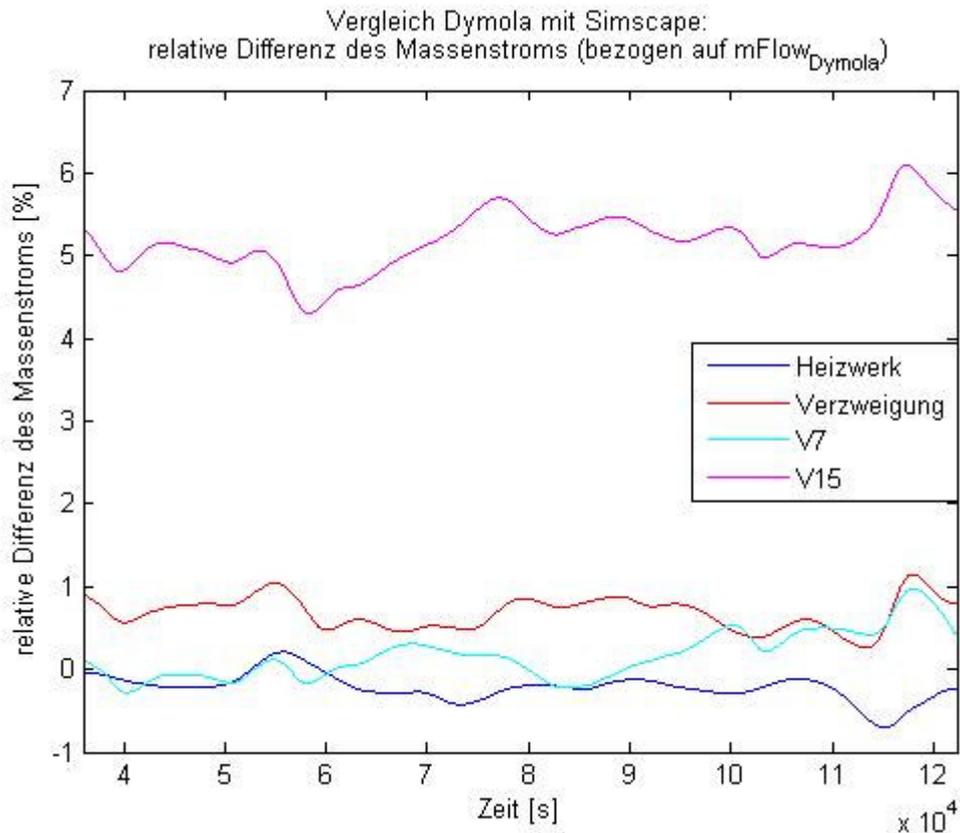


Abbildung 37: Dymola/Simscape: relativer Fehler des Massenstroms

An den meisten Vergleichspunkten weichen die Massenströme in den beiden Modellen um weniger als 1% ab. Ein Ausreißer ist Verbraucher V15. Dort gibt es Fehler von 5% bis 6%. Verbraucher V15 befindet sich an der Spitze des Seitenastes, also am weitesten vom Hauptstrang entfernt. In den detaillierteren Diagrammen in Anhang B ist zu sehen, dass im Simscape-Modell am Verbraucher V15 eine größere Temperaturspreizung vorliegt. Daher liefert das Simscape-Modell einen erheblich geringeren Massenstrom. Hinzu kommt, dass der absolute Massenstrom in diesem Verbraucher sehr gering ist. Er zählt zu jenen, mit der geringsten Wärmeabnahme. Insofern führen geringe absolute Abweichungen schnell zu hohen relativen Abweichungen.

9.1.3 Vergleich der Drücke

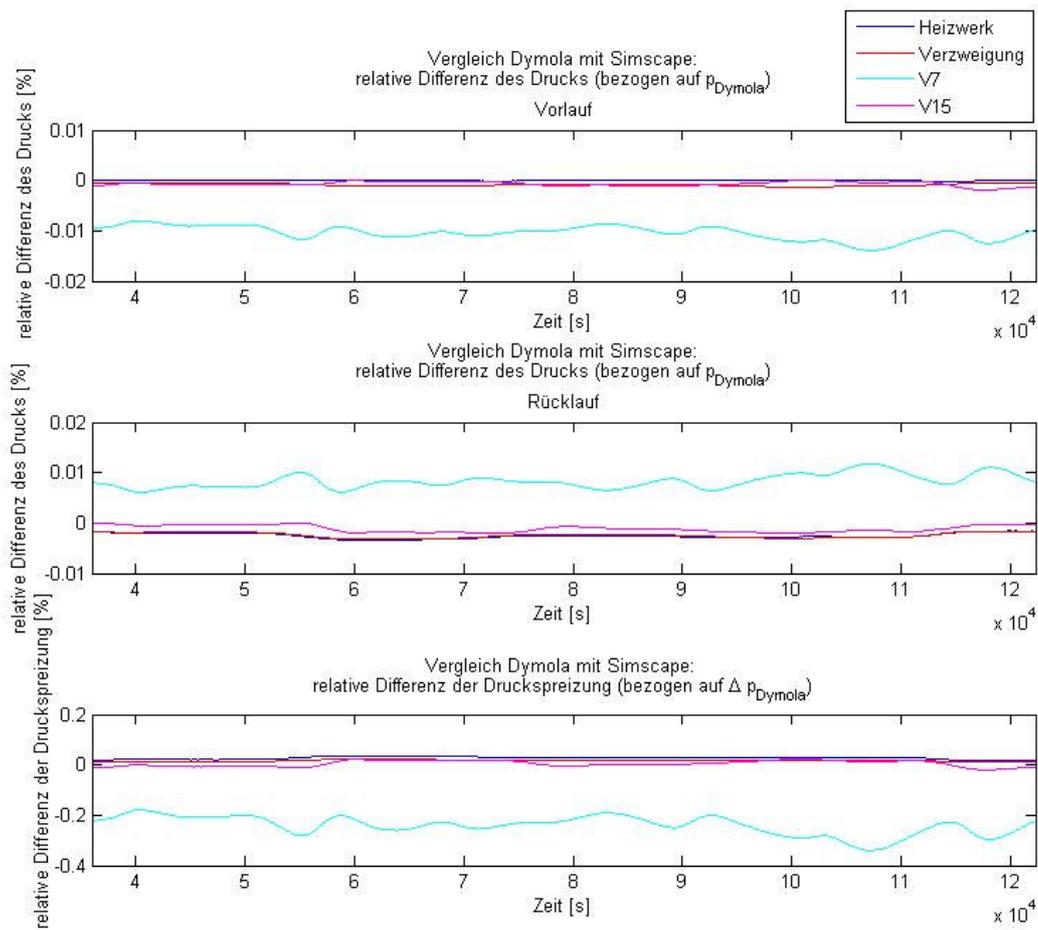


Abbildung 38: Dymola/Simscape: relativer Fehler des Drucks

Die Druckberechnungen führen bei beiden Modellen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Am stärksten unterscheidet sich der Druck in Verbraucher V7. Hier gibt es im Vor- und Rücklauf jeweils eine Abweichung von ca. 0,01%. Daraus resultiert ein Unterschied der Druckspreizung von 0,2%. Der Verbraucher V7 liegt am Ende einer Verzweigung des Teillastes.

9.1.4 Vergleich der Temperaturen

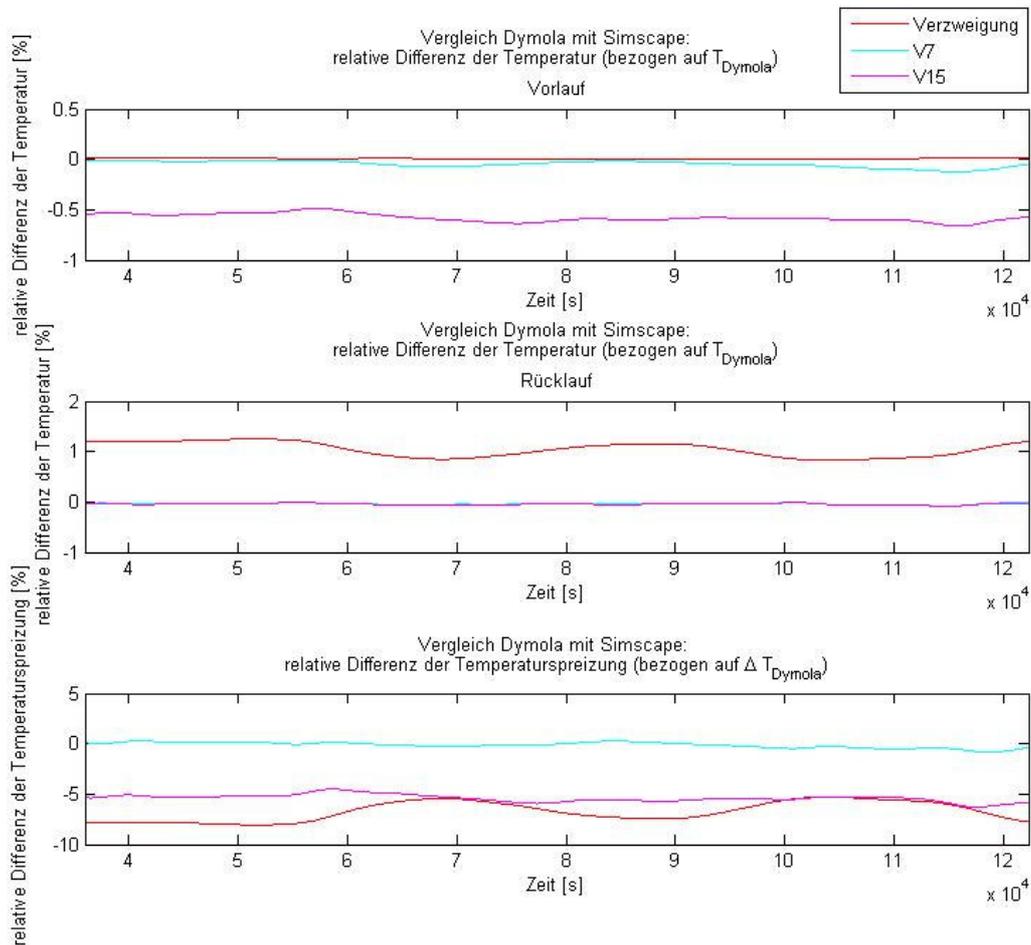


Abbildung 39: Dymola/Simscape: relativer Fehler der Temperatur

Die Abweichung der Temperaturen im Vorlauf ist gering. Die stärkste Abweichung gibt es am Verbraucher V15. Grundsätzlich beträgt diese nur 0,5% und scheint daher vernachlässigbar. Der Vergleich des Massenstroms durch Verbraucher V15 zeigt aber, dass sich in diesem speziellen Fall (geringfügige Unterschiede der Temperatur, die die Temperaturspreizung beeinflussen, bei sehr geringer Wärmeabnahme) diese relative Abweichung stark auswirkt.

Beide Modelle sollten ihren Massenstrom so regeln, dass sich nach dem Verbraucher eine Rücklaufumtemperatur von $T = 320$ K einstellt. Das Simulink-Modell erreicht diesen Wert zu manchen Zeitpunkten genau, schwankt aber stärker als das Ergebnis des Dymola-Modells. Dieses erreicht einen vergleichsweise konstanten Wert von 319,88 K. Man muss dazu sagen, dass sich die Abweichungen zum Soll-Wert in einem Bereich von $\pm 0,15$ K abspielen. Aus thermodynamischer und prozesstechnischer Sicht sind solche Temperaturdifferenzen bei diesem Anwendungsgebiet irrelevant.

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

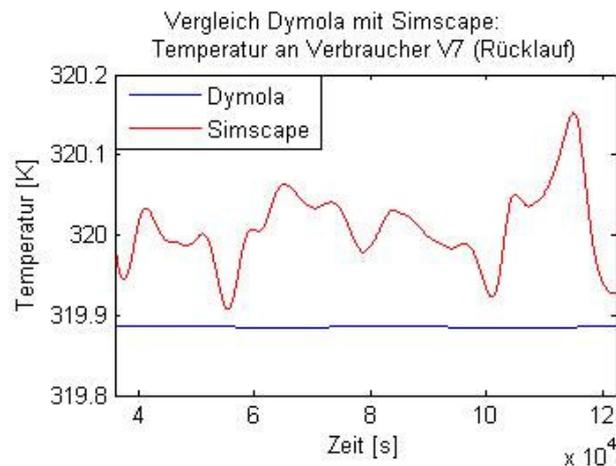


Abbildung 40: Austrittstemperatur aus Verbraucher V7

9.1.5 Vergleich der Verluste über ein Rohr

Hier wurde der Vorlauf von Rohr R1 betrachtet. Das Rohr R1 ist das erste Rohr im Teilst T11.

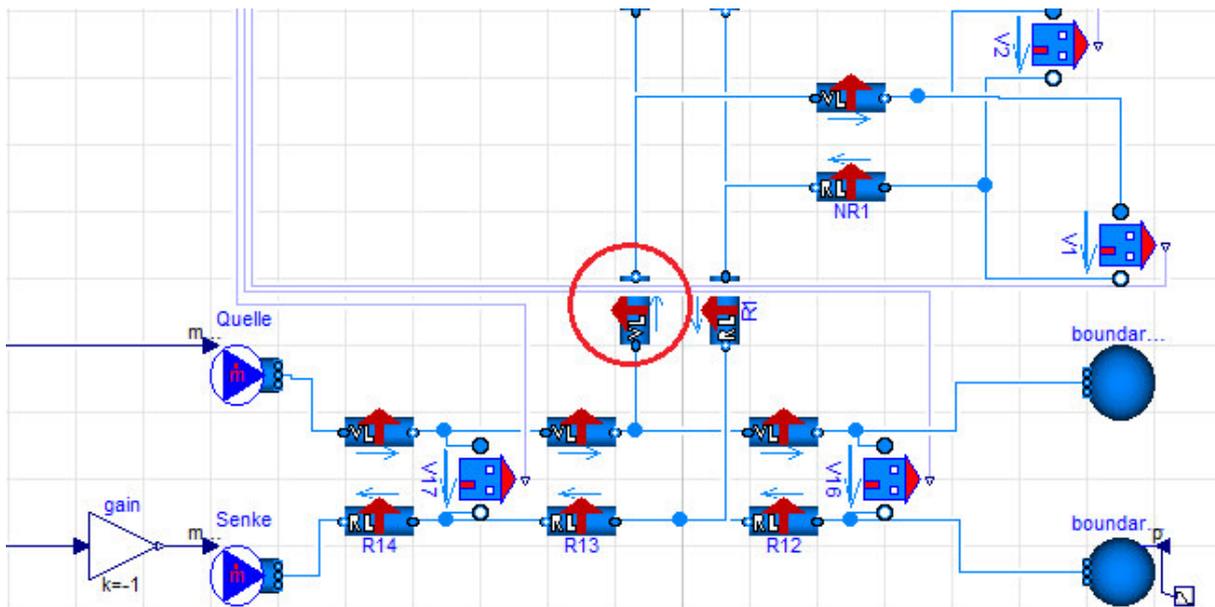


Abbildung 41: Referenzrohr R1, Vorlauf

Es wurden der Druckverlust über die Rohrlänge und der Wärmeverlust betrachtet.

Der Druckverlust wurde ermittelt, indem zu jedem Zeitpunkt, die vom Modell errechneten Datenpunkte des Drucks am Austritt, vom Eintrittsdruck abgezogen wurden.

Der Druckverlust über Rohr R1 unterscheidet sich zwischen den Modellen um ca. 1%. Das ist ein zufriedenstellendes Ergebnis.

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

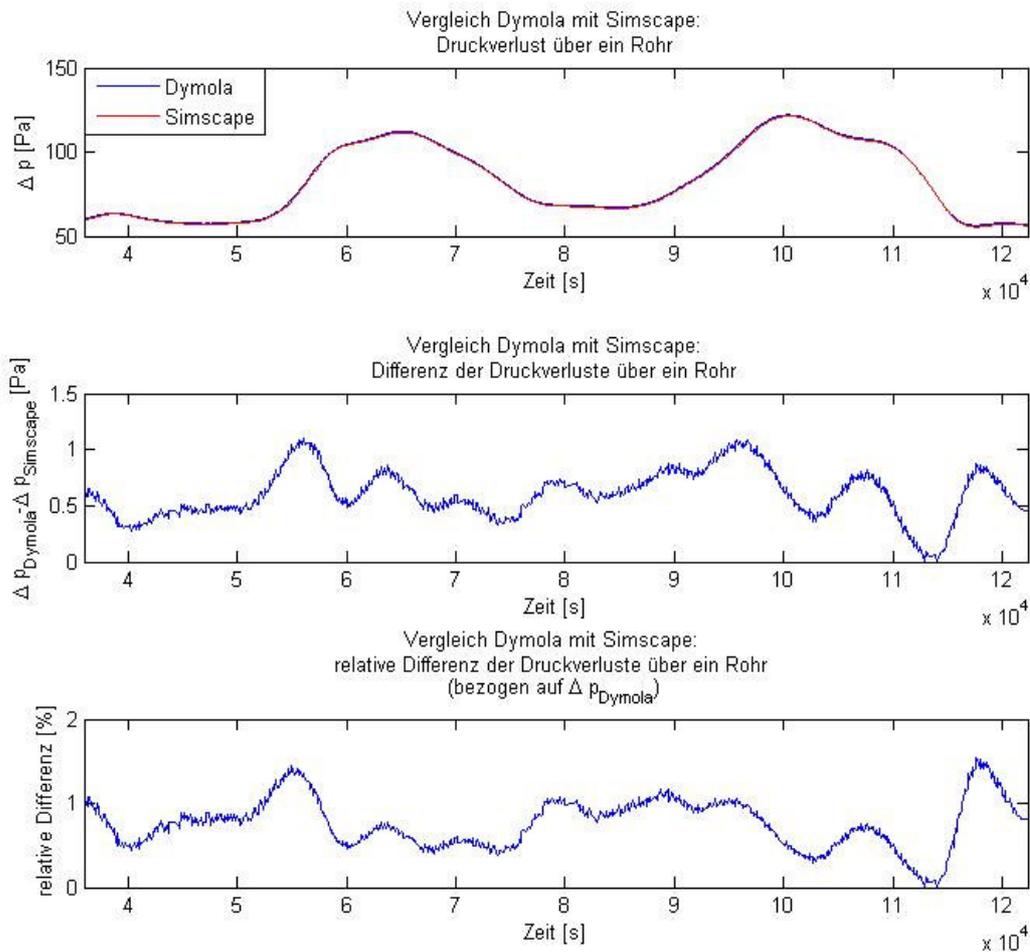


Abbildung 42: Dymola/Simscape: Druckverlust über Rohr R1

Die Datenpunkte des Wärmeverlusts über die Rohrwand im Dymola-Modell wurden direkt während der Simulation vom Modell berechnet. Da dies im Simscape-Modell nicht möglich war, wurde sowohl für das Simscape Modell, als auch für das Dymola-Modell aus den Berechnungsergebnissen eine Enthalpiebilanz aufgestellt. Dabei wurde eine konstante isobare Wärmekapazität für Wasser $c_p=4200 \text{ J}/(\text{kg K})$ angenommen. Die Enthalpiedifferenz zwischen Eintritt und Austritt ergibt sich zu:

$$\Delta H = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{Rücklauf}} - T_{\text{Vorlauf}}) \quad (18)$$

ΔH	... Differenz des Enthalpiestroms	[W]
\dot{m}	... Massenstrom	$[\text{kg s}^{-1}]$
c_p	... spezifische isobare Wärmekapazität	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
T	... Temperatur	[K]

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

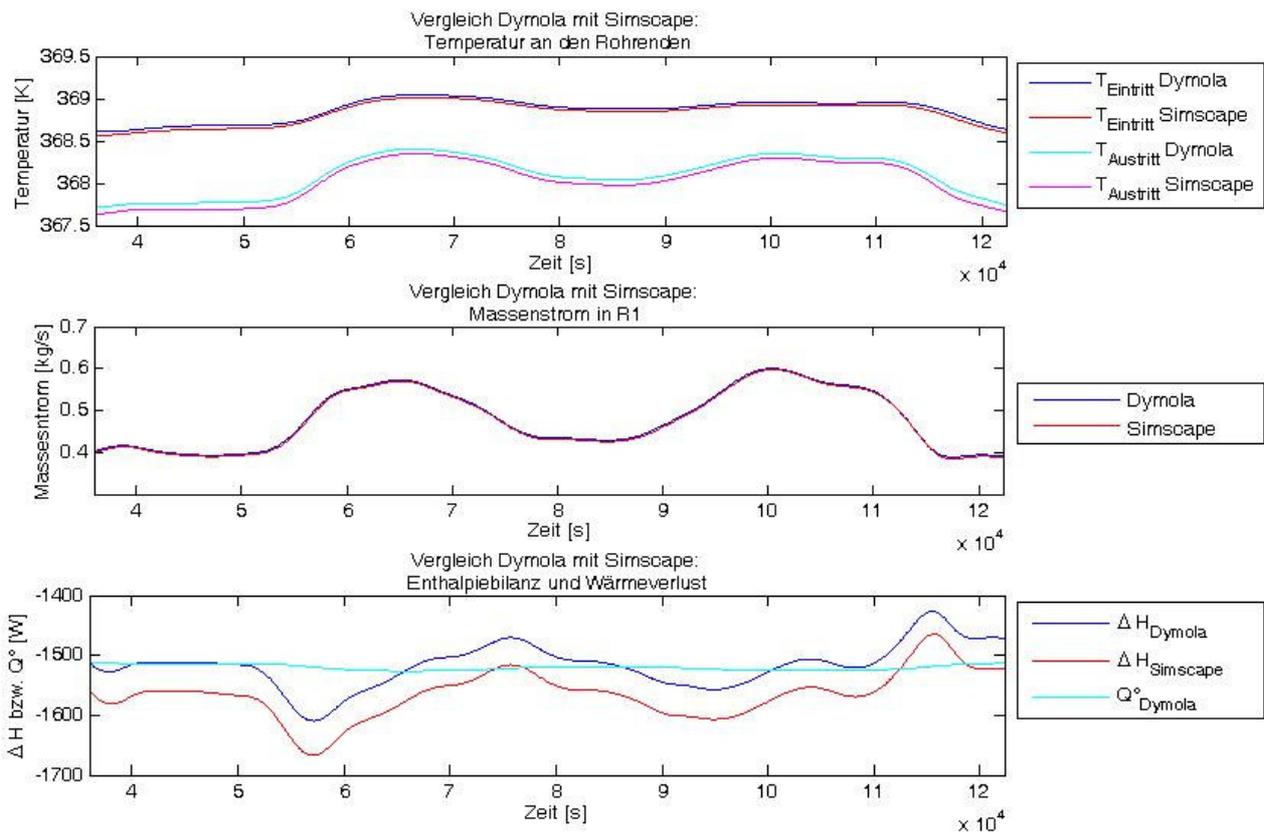


Abbildung 43: Dymola/Simscape: Wärmeverlust über Rohr R1

In Abbildung 43 sieht man, dass sich im Simscape Modell ein höheres ΔH ergibt als im Simscape-Modell. Die beiden Kurven verlaufen jedoch ähnlich. Der Kurvenverlauf im Vergleich zum reinen Wärmeverlust über die Rohrwand ergibt sich aus Abkühl- und Aufheizvorgängen im Rohr. Die Abweichung der Enthalpiebilanzen beträgt ca. 5%.

Beim Dymola-Modell werden folgende Verbesserungsmöglichkeiten gesehen:

Derzeit wird außerhalb der Rohrisolierung eine ideale Umgebung angenommen, mit einem unendlich großen Wärmeübergangskoeffizienten. Realistischer wäre, bei einer Verlegung im Erdreich, eine Erdschicht mit eigener Wärmeleitfähigkeit anzunehmen, um den Koeffizienten G zu ermitteln. Bei Verlegen der Rohre in einem Schacht, müsste man den Wärmeübergangskoeffizient zur Umgebungsluft berücksichtigen. Es wurde eine zusätzliche Vergleichssimulation durchgeführt, bei der ein äußerer Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_a=8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ einbezogen wurde. Dadurch sinken die Wärmeverluste von ca. 1520 W auf 1400 W. Der unendlich große Wärmeübergangskoeffizient wurde jedoch in gleicher Weise im Simscape-Modell angenommen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wurde er daher beibehalten.

Eine weitere Verbesserung wäre das Aufteilen der Wärmeverluste auf mehrere Wärmeentnahmestellen entlang des Rohres. Je detaillierter die Diskretisierung, desto genauer wäre das Ergebnis. Dafür würde der Rechenaufwand weiter steigen.

9.2 Vergleich 15 Verbraucher mit vereinfachtem Teillast T11

Beim Vergleich des 15-Verbrauchermodells mit seiner vereinfachten Variante, dem Teillast T11, wurden die Zustandsgrößen an zwei Stellen im Netz betrachtet: am Heizwerkein- bzw. -austritt und an der Abzweigung des Teillastes. Einzelne Verbraucher können hier natürlich nicht mehr verglichen werden.

Bei den Verbrauchern im 15-Verbrauchermodell wurden keine Massenstromlimiter eingebaut. Beim Modell T11 sind Massenstromlimiter vorhanden. Diese wurden in den ersten beiden Astabschnitten (E0, E1, vergleiche Abbildung 18) auf Null gesetzt. Im letzten Abschnitt (E2), wurde ein Wert von 0,07 kg/s angenommen. Der berechnete Sollmassenstrom lag zu jedem Zeitpunkt über 0,07 kg/s, somit hatte der Limiter hier keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis. (Wenn der Limiter von E2 auf Null gesetzt wurde kam es zum Zeitpunkt $t = 115600$ s zu einem Abbruch der Simulation: „Failed to solve non-linear system“).

Addiert man den Wärmeverbrauch aller Hausanschlüsse im 15-Verbrauchermodell und vergleicht diesen Wert mit der Summe der Wärmeverbrauchskurven für den vereinfachten Teillast, so erhält man zwei gleiche Kurven. Dementsprechend sollte auch der benötigte Massenstrom gleich sein. Das gilt aber nur, wenn die Wärmeverluste über die Rohre und somit die Eintrittstemperaturen am Verbraucher gleich sind. Laut Berechnungsmethode von Larsen et al. [24] soll der akkumulierte Wärmeverlust vor und nach der Vereinfachung gleich sein.

Durch die Vereinfachung reduziert sich die Anzahl der Komponenten im Modell erheblich. Dementsprechend war beim Modell T11 eine kürzere Berechnungsdauer zu erwarten.

9.2.1 Vergleich der Rechenzeiten

Das 15-Verbrauchermodell benötigt 54 s für die Übersetzung und 24985 s = 7 h für die Simulation.

Der vereinfachte Teillast T11 übersetzt in 20 s und liefert ein Simulationsergebnis nach 1334 s = 0,4 h. Das zeigt, dass die Netzvereinfachung zu einer erheblichen Verkürzung der Berechnungszeit führt.

9.2.2 Vergleich der Massenströme

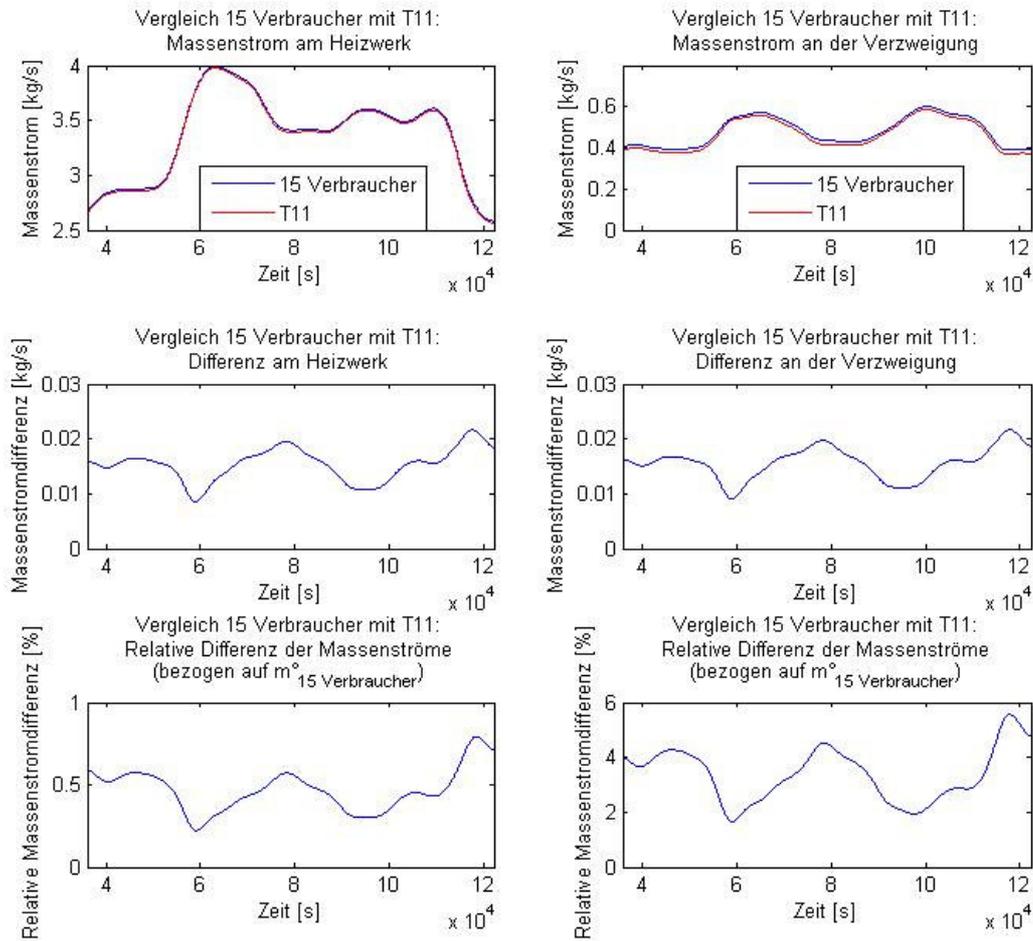


Abbildung 44: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: relativer Fehler des Massenstroms

Während der Massenstrom ins Gesamtnetz zwischen den beiden Modellen nur wenig abweicht, unterscheiden sich der Massenstrom in den Seitenast um ca. 4%. Die Abweichung an der Verzweigung ist hier zur Beurteilung ausschlaggebend. Der Gesamtmassenstrom aus dem Heizwerk wird von den beiden Großverbrauchern, die das restliche Netz ersetzen, dominiert. Diese sind in beiden Modellen identisch. Daher sind Abweichungen beim Massenstrom in erster Linie auf die Unterschiede zwischen Originalverbrauchern und vereinfachter Netzstruktur zurückzuführen. Der akkumulierte Wärmeverbrauch aller 15 Verbraucher entspricht der Summe des Wärmeverbrauchs der drei vereinfachten Verbraucher. Daher muss der Fehler im Wärmeverlust der Zuleitungen entstehen.

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

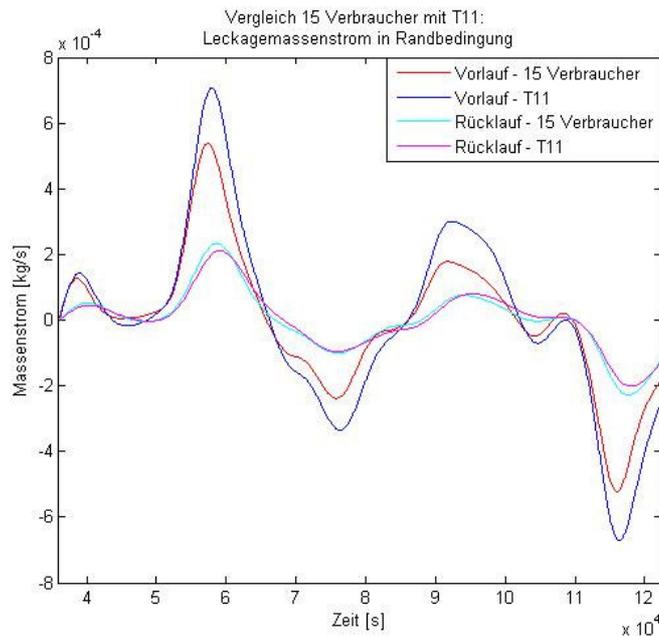


Abbildung 45: 15 Verbraucher/vereinfachter Teillast:
Leckagestrom in den Randbedingungen

Grundsätzlich sollte in die Randbedingungen kein Massenstrom fließen. Der Gesamtmassenstrom im Netz wird aus dem momentanen Massenstrombedarf in den Verbrauchern berechnet. Trotzdem entsteht an den Randbedingungen ein Leckagemassenstrom. Dieser liegt meist bei einer Größenordnung von $2 \cdot 10^{-4}$ kg/s. Im Maximum nähert er sich $8 \cdot 10^{-4}$ kg/s an. Das ist eine vertretbare Menge. Als Vergleichsgröße soll hier der minimale Massenstrom, im Hausanschluss mit dem geringsten Verbrauch, dienen. Dieser beträgt 0,018 kg/s, also das 23-fache vom maximalen Leckagestrom.

9.2.3 Vergleich der Drücke

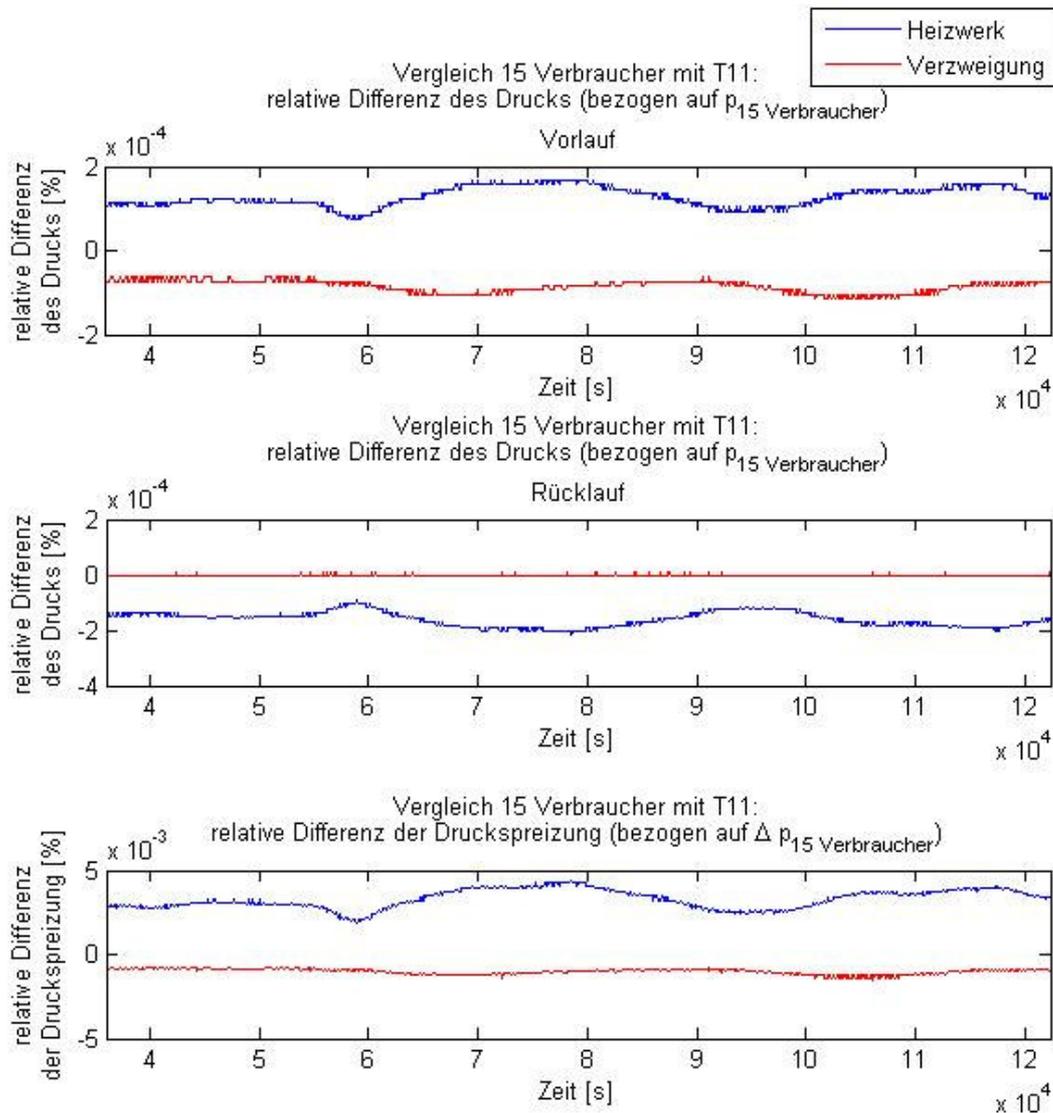


Abbildung 46: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: relativer Fehler des Drucks

Die Abweichungen bei den Drücken sind vernachlässigbar klein. Sie liegen in einer Größenordnung von 10^{-4} %. Die Abweichung bei der Druckspreizung hat die Größenordnung 10^{-3} %. Das ist ebenfalls vernachlässigbar.

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

Vergleich der Temperaturen

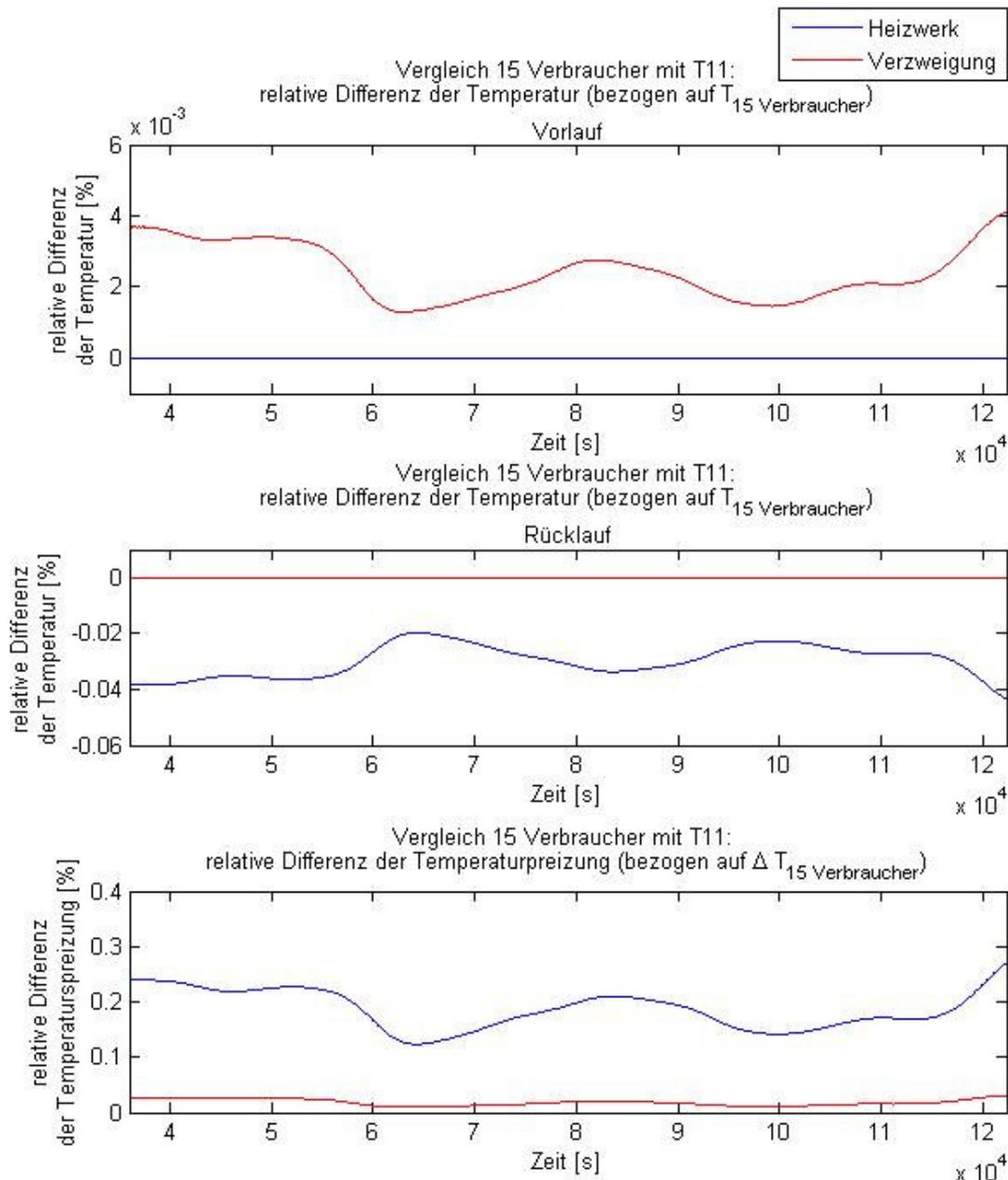


Abbildung 47: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilstast: relativer Fehler der Temperatur

Die Temperatur am Heizwerkaustritt ist als Konstante vorgegeben und daher in beiden Modellen identisch. An der Verzweigung gibt es vernachlässigbare Abweichungen. Diese sind auf die Abweichungen des Massenstroms am Weg zu diesem Knoten zurückzuführen. Die Wärmeverluste am Hinweg sind bei beiden Modellen fast gleich (s. Abbildung 48). Durch den erhöhten Durchfluss weicht somit die Temperatur ab. Aus der Abweichung der Temperaturen ergibt sich auch eine Abweichung der Temperaturspreizungen.

9 Simulation eines 15-Verbrauchermodells zur Validierung

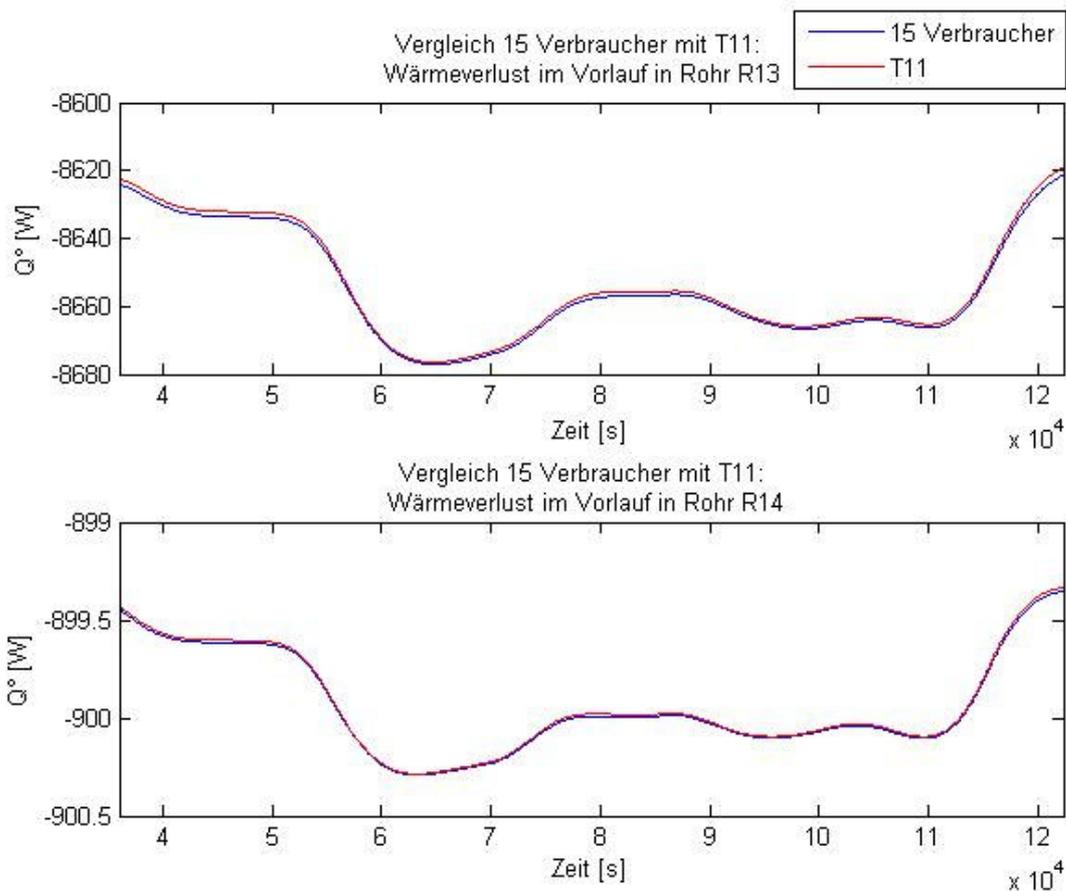


Abbildung 48: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Wärmeverlust über die Rohre R13 und R14

Im Rücklauf ist die Temperatur am Verzweigungsknoten in beiden Modellen identisch. Diese wird von der Rücklauftemperatur des Verbrauchers V16 dominiert, der einen größeren Durchfluss als der Teilast beisteuert. Der Verbraucher V16 ist in beiden Modellen gleich aufgebaut und liefert daher gleiche Temperaturen im Rücklauf. Nachdem der Massenstrom des Teilasts beigemischt und der Weg zum Heizwerk zurück gelegt wurde, sind Temperaturabweichungen zu beobachten. Wie auch im Vorlauf, sind diese auf die unterschiedlichen Massenströme, bei fast gleich bleibenden Wärmeverlusten, zurückzuführen.

10 Fazit

Die aus Komponenten der Modelica Standard Library zusammengeführten Bauteile sind in dieser Form nicht für eine Simulation großer Fernwärmenetze geeignet. Die Rechenzeiten sind zu lang, um im laufenden Betrieb Voraussagen über nötige Regelgrößen zu treffen. Auch ist der Aufwand beim Aufbau des Modells, aufgrund der schwierigen Initialisierung, sehr groß.

Für kleine Modelle ist die Fluid Bibliothek sehr wohl geeignet. Die Rohrleitungsmodelle sind detailliert und ermöglichen es, viele Aspekte von Rohrströmungen zu untersuchen. Es können viele Parameter anwendungsspezifisch eingestellt werden. Für das große Modell des Fernwärmenetzes sind sie jedoch zu komplex, daher die langen Rechenzeiten.

Die Rechenzeiten sind ein klarer Nachteil des Dymola-Modells gegenüber dem Vergleichsmodell aus Simscape. Der Vorteil des Dymola-Modells ist, dass wesentlich mehr physikalische Größen ohne zusätzlichen Rechenaufwand ausgewertet werden können. Ein Vergleich der berechneten Zustandsgrößen in den beiden Modellen hat gezeigt, dass die Ergebnisse meist ausreichend übereinstimmen. Die Abweichungen liegen bei ca. 1%. Nur bei der Modellierung des Wärmeverlustes über die Rohrwand gibt es größere Abweichungen. Daraus ergeben sich auch Folgefehler. Hier besteht noch Optimierungsbedarf. In der Modellierung des 15-Verbraucher-Netzabschnitts haben sich die unterschiedlichen Verluste nicht sehr stark auf die Temperaturen an den Knoten ausgewirkt. Bei der Simulation eines größeren Netzes würde sich der Fehler jedoch aufsummieren und am Ende eine relevante Größenordnung annehmen.

Der Vergleich der Simulation eines originalen Netzabschnitts mit seiner vereinfachten Variante, liefert gute Übereinstimmungen der Zustandsgrößen Temperatur und Druck. Hier liegen die Abweichungen unter 0,3%. Die berechneten Massenströme bilden eine Ausnahme, mit stellenweisen Abweichungen bis zu 4%.

Als weiterführende Untersuchung könnte man ein weiteres Modell mit der Programmiersprache Modelica erstellen, in dem neue Komponenten für die Anwendung Netzsimulation entwickelt werden. Diese sollten dann möglichst einfach aufgebaut werden. Dadurch würden die Rechenzeiten voraussichtlich erheblich verringert werden.

Der Aufbau solcher neuer Komponenten würde auch die Nutzung der Open-Source-Software OpenModelica eröffnen.

11 Quellenverzeichnis

- [1] Johannes Nagler: Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape; Institut für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien; Wien, Juli 2014.
- [2] Klaus Günter Jacobs, Helmut Klein: Fernwärmeversorgung mit Wärme-Kraft-Kopplung; Fernwärme. Umschau Verlag Breidenstein KG, Frankfurt am Main, 1977.
- [3] Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, Brian Vad Mathiesen: 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems; Energy, Volume 68 15 April 2014.
- [4] Urban Persson, Sven Werner: Heat distribution and the future competitiveness of district heating; Applied Energy, Volume 88, Issue 3, March 2011, Pages 568-576.
- [5] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft: Fernwärme; URL: <http://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieversorgung/Seiten/Fernw%C3%A4rme.aspx> [14.03.2015].
- [6] isoplus Fernwärmetechnik: Nah- & Fernwärme; URL: <http://www.isoplus.at/at/tags/nah-fernwaerme/> [03.03.2015].
- [7] isoplus Fernwärmetechnik: Aufbau eines Wärmenetzes; URL: <http://www.isoplus.at/at/tags/nah-fernwaerme/aufbau-waermenetz/> [04.03.2015].
- [8] Knut Hakansson: Handbuch der Fernwärmep Praxis, Grundlagen für Planung, Bau und Betrieb von Fernheizwerken. Vulkan-Verlag Dr. W. Classen Nachf. GmbH & Co. KG, Essen, 1973.
- [9] Bernhard Kunst, Christian Geck: Innovative Regelungskonzepte, Optimierter Netzbetrieb mit drehzahl- veränderlichen Pumpen; EuroHeat&Power, 34. Jg (2005), Heft 6.
- [10] Marktgemeinde Großarl: Zahlen und Fakten; URL: <http://www.grossarl.salzburg.at/system/web/fakten.aspx?menuonr=218732373> [21.04.2015].
- [11] Hackschnitzel- und Heizgenossenschaft reg.Gen.m.b.H.: AM BEGINN steht die Idee; URL: <http://www.heizkraft.at/beginn.html> [21.04.2015].
- [12] Hackschnitzel- und Heizgenossenschaft reg.Gen.m.b.H.: Fernwärmenetz; URL: <http://www.heizkraft.at/fernwaermenetz.html> [21.04.2015].
- [13] Erik Dotzauer: simple model for prediction of loads in district-heating systems; Applied Energy, Vol. 73 (2002)
- [14] Krzysztof Wojdyga: An influence of weather conditions on heat demand in district heating systems; Energy and Buildings, Vol. 40 (2008).
- [15] Likas G. Swan, V. Ismet Ugursal: Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques; Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13 (2009).
- [16] David E. Claridge, Bass Abushakra, Jeff S. Haberl, Atch Sreshthaputra: Electricity Diversity Profiles for Energy Simulation of Office Buildings (1093-RP) URL: <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~satch/research/Electricity-diversity-profiles-09->

11 Quellenverzeichnis

2003%5B1%5D.pdf (17.05.2015).

[17] J. Page, D. Robinson, N. Morel, J.-L. Scartezzini: A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence; *Energy and Buildings*, Vol. 40 (2008).

[18] Martin Otter, Hilding Elmqvist: Modelica Language, Libraries, Tools, Workshop and EU-Project RealSim; German Aerospace Center, Oberpfaffenhofen, Germany and Dynasim AB, Lund, Sweden, Juni 2001; <https://www.modelica.org/documents/ModelicaOverview14.pdf> [04.01.2015].

[19] Peter Fritzson: Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1; Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2004.

[20] Dassault Systèmes AB: Dymola Dynamic Modeling Laboratory User Manual Volume 1; Dassault Systèmes AB, Mai 2012.

[21] Hans Dieter Baehr, Karl Stephan: Wärme und Stoffübertragung; 7. Auflage, Springer, Heidelberg Dordrecht London New York (2010).

[22] Modelica Association: Modelica; Modelica Association, DLR, Telemark University College and Maplesoft (2003-2010).

[23] Günter Wossog (Hrsg.): Handbuch Rohrleitungsbau, Band II: Berechnung, 3.Auflage; Vulkan Verlag, Essen (2014).

[24] Helge V. Larsen, Halldór Pálsson, Benny Bøhm, Hans F. Ravn: Aggregated dynamic simulation model of district heating networks, *Energy Conversion and Management* 43 (2002).

12 Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen, bei denen keine andere Quelle angegeben wurde, wurden für diese Arbeit selbst erstellt.

Abbildung 1: Johannes Nagler: Fernwärmenetz Großarl, rot: Heizwerk, blau: Schlechtpunktverbraucher.....	7
Abbildung 2: Rohrwand.....	21
Abbildung 3: FixedBoundary.....	24
Abbildung 4: MassFlowSource_T.....	24
Abbildung 5: DynamicPipe.....	25
Abbildung 6: SimpleGenericOrifice.....	25
Abbildung 7: ThermalConductor.....	26
Abbildung 8: FixedTemperature.....	26
Abbildung 9: PrescribedHeatFlow.....	26
Abbildung 10: CombiTimeTable.....	26
Abbildung 11: Limiter.....	27
Abbildung 12: RealOutput.....	27
Abbildung 13: System.....	27
Abbildung 14: Valve_mFlow.....	28
Abbildung 15: Massenstrom-berechnung.....	28
Abbildung 16: Modell eines Hauptleitungsrohrs inklusive Icon.....	29
Abbildung 17: Modell eines Verbrauchers inklusive Icon.....	30
Abbildung 18: Modell eines Teilasts inklusive Icon.....	32
Abbildung 19: Larsen et al.: Original and equivalent networks [3], Einklappen der Rohrverzweigungen.....	33
Abbildung 20: Larsen et al.: Collapsing nodes, Zusammenlegen von Knoten.....	35
Abbildung 21: 10 Hauptleitungsrohre.....	37
Abbildung 22: 68 Hauptleitungsrohre.....	38
Abbildung 23: 90 Hauptleitungsrohre.....	38
Abbildung 24: 10 Hauptleitungsrohre, 6 Verbraucher.....	40
Abbildung 25: Vergleich der Rechenzeiten bei 1, 2 und 6 Verbrauchern.....	41
Abbildung 26: 31 Hauptleitungsrohre, 14 Verbraucher.....	42
Abbildung 27: 68 Hauptleitungsrohre, 42 Verbraucher.....	43
Abbildung 28: Vergleich der Rechenzeiten bei 31 Rohren und 90 Rohren mit jeweils 14 Verbrauchern.....	44
Abbildung 29: 10 Hauptleitungsrohre, 1 Teilast.....	46
Abbildung 30: 10 Hauptleitungsrohre, 3 Teiläste.....	48
Abbildung 31: Vergleich der Rechenzeiten bei 10 Hauptleitungsrohren mit 1 bzw. 3 Teilästen.....	49
Abbildung 32: 10 Hauptleitungsrohre, 3 Teiläste.....	50
Abbildung 33: Massenstromvorgabe AB196, Knick in der Funktion.....	51
Abbildung 34: Ersatzmodell für das Gesamtnetz anhand des Modells mit vereinfachtem Teilast.....	53
Abbildung 35: 15-Verbrauchermodell in Dymola mit Markierung der verglichenen Stellen.....	54
Abbildung 36: 15-Verbrauchermodell in Simscape.....	54
Abbildung 37: Dymola/Simscape: relativer Fehler des Massenstroms.....	55

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 38: Dymola/Simscape: relativer Fehler des Drucks.....	56
Abbildung 39: Dymola/Simscape: relativer Fehler der Temperatur.....	57
Abbildung 40: Austrittstemperatur aus Verbraucher V7.....	58
Abbildung 41: Referenzrohr R1, Vorlauf.....	58
Abbildung 42: Dymola/Simscape: Druckverlust über Rohr R1.....	59
Abbildung 43: Dymola/Simscape: Wärmeverlust über Rohr R1.....	60
Abbildung 44: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: relativer Fehler des Massenstroms.....	62
Abbildung 45: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Leckagestrom in den Randbedingungen.....	63
Abbildung 46: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: relativer Fehler des Drucks.....	64
Abbildung 47: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: relativer Fehler der Temperatur.....	65
Abbildung 48: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Wärmeverlust über die Rohre R13 und R14.....	66
Abbildung 49: Verzweigte Rohre.....	73
Abbildung 50: Fehlermeldung "The system is out of memory or resources".....	74
Abbildung 51: Fehlermeldung: "Repeated convergence test failures".....	75
Abbildung 52: Zusammengesetztes Ergebnis einer Simulation.....	76
Abbildung 53: Dymola/Simscape: Massenstrom beim Heizwerk und bei der Verzweigung.....	77
Abbildung 54: Dymola/Simscape: Massenstrom bei den Verbrauchern V7 und V15.....	78
Abbildung 55: Dymola/Simscape: Druck beim Heizwerk.....	79
Abbildung 56: Dymola/Simscape: Druck bei der Verzweigung.....	80
Abbildung 57: Dymola/Simscape: Druck bei Verbraucher V7.....	81
Abbildung 58: Dymola/Simscape: Druck bei Verbraucher V15.....	82
Abbildung 59: Dymola/Simscape: Temperatur bei der Verzweigung.....	83
Abbildung 60: Dymola/Simscape: Temperatur bei Verbraucher V7.....	84
Abbildung 61: Dymola/Simscape: Temperatur bei Verbraucher V15.....	85
Abbildung 62: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Druck beim Heizwerk.....	86
Abbildung 63: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Druck bei der Verzweigung.....	87
Abbildung 64: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Temperatur beim Heizwerk.....	88
Abbildung 65: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Temperatur bei der Verzweigung.....	89

13 Anhang

13.1 Anhang A: Arbeiten mit Modelica: Hürden und Tipps

13.1.1 Wahl der Startwerte

Besonders bei großen, komplexen Modellen ist die Wahl der Startwerte für die Iteration sehr wichtig. Dies gilt insbesondere, wenn man mit der Fluidbibliothek arbeitet. Wenn keine geeigneten Startwerte vorgegeben werden, so findet das Programm keine erste Lösung, von der aus dann weiter gerechnet werden kann. Folgende Ideen und Tricks wurden im Zuge der Modellierung verfolgt:

1. Wenn nicht alle Startwerte manuell vorgegeben werden, so wählt Dymola automatische Startwerte. Diese sind entweder „default“-Werte, die in der Programmierung der Komponenten vorgegeben wurden, oder der Wert Null. In der Fluidbibliothek werden viele „default“-Werte aus der Komponente „system“ übernommen.
Um sich anzeigen zu lassen, welche Startwerte von Dymola gewählt wurden, muss folgender Befehl im Commandwindow eingegeben werden:
`Advanced.LogStartValuesForIterationVariables = true`
Weiters sollte im Simulation Setup, unter Translation, die Checkbox bei „Log selected default initial conditions“ aktiviert werden.
Wenn die automatischen Startwerte ungeeignet sind, so kann man bei jeder Variable einen Startwert im Quellcode vorgeben. Hier ein Beispiel für die Vorgabe eines Drucks von 5 bar, in einem Austrittsconnector:
`port_b(p(start=500000));`
2. Da der Solver von den Startwerten ausgehend zu rechnen beginnt, braucht es eine Vorlaufphase, in der sich die richtigen Rechenergebnisse einstellen. Im vorliegenden Modell wurde daher eine Vorphase, mit stationären Bedingungen, eingeführt.
3. Das Modell wurde schrittweise aufgebaut. Dabei wurden die einzelnen Komponenten in den Zustand der stationären Vorphase gebracht. Anschließend wurde simuliert. Sollte die Simulation nicht über die ersten Sekunden hinaus kommen, so wurden die Startwerte, speziell in den von Dymola genannten Komponenten, händisch auf die Situation der letzten funktionierenden Simulation angepasst.
4. Wenn es die Möglichkeit gibt, ein vereinfachtes Modell (z. B. linearisiertes Modell) für die Initialisierung zu verwenden, sollte man sich mit dem `homotopy()` – Operator auseinandersetzen. Mit diesem wird, in einer vorgelagerten Initialisierungsphase, das komplexe, vom Solver nicht lösbare Modell durch das vereinfachte Modell angenähert. Erst wenn eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen dem vereinfachten und dem komplexen Modell herrscht, wird mit Hilfe der so erhaltenen Startwerte, mit der eigentlichen Simulation begonnen.

13.1.2 Verzweigung von DynamicPipes

Bei der Komponente der Modelica.Fluid.Pipes.DynamicPipe stehen mehrere Konfigurationen zur Auswahl. Diese sind als Parameter im Tab Advanced als ModelStructure auswählbar. Das Rohrmodell besteht aus den beiden Fluidconnectoren port_a und port_b. Dazwischen befindet sich ein Fluidvolumen, das in eine beliebige Anzahl (nNodes) von Zonen, entlang des Rohres, geteilt werden kann. Die ModelStructure gibt nun vor, ob die Zustandsgrößen in erster Linie im Inneren des Rohrs berechnet werden (a_v_b) oder ob diese Zustandsgrößen an den Connectoren, als Wert nach außen hin festgelegt werden (av_vb). Hier wird sozusagen das letzte Fluidvolumen mit dem danebenliegenden Connector zusammengefasst.

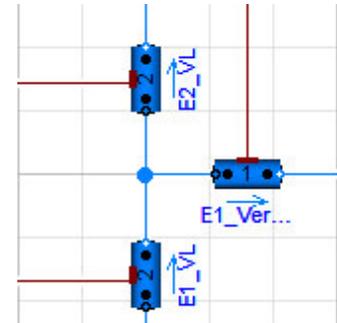


Abbildung 49:
Verzweigte Rohre

Wenn man Rohrleitungen in Serie schaltet, kann man relativ frei wählen welche Konfiguration man bevorzugt. Bei der Verzweigung von Rohrleitungen scheint es dem Solver jedoch schwerer zu fallen eine Lösung zu finden, wenn zu viele Connectoren, die mit dem Volumen verbunden sind (av_ bzw. _vb), in einem Knoten zusammenstoßen.

Im vorliegenden Modell stoßen immer maximal 3 Rohre aufeinander. Es wurde darauf geachtet, dass in den Knoten immer die Rohrenden av_, _vb und a_ beziehungsweise av_, _vb und _b zusammen treffen. Dabei wurde gelegentlich auf die Sonderkonfiguration av_b bzw. a_vb, bei der nur ein freier Connector vorhanden ist, zurückgegriffen.

13.1.3 Auslesen von Zustandsgrößen von DynamicPipes

Hier muss, je nach Rohrleitungsmodell, besonders beim Auslesen der Temperaturen, aufgepasst werden. Die Zustandsgrößen in den Konnektoren werden, wegen des Modells der Knoten, von den Folgebauteilen beeinflusst. Teilweise ist daher der Wert an dieser Stelle nicht der gesuchte Wert. Wenn man sicher gehen möchte, dass man den richtigen Zustand an einer Stelle ausliest, kann man ein Thermometer bzw. andere Messgeräte als Auslesehilfe einbauen.

13.1.4 Arbeiten an der oberen Belastungsgrenze des PCs

Sobald das Modell sich der vollen Größe angenähert hat, kam es gelegentlich, nach Befehl zur Simulation, aber noch während der Übersetzung, zu folgendem Fehler: „The system is out of memory or resources“

Der genaue Auslöser des Fehlers konnte nicht ermittelt werden. Vermutlich ist das System für einen Augenblick an seine Belastungsgrenze gekommen und daher wurde abgebrochen. Generell empfiehlt Dymola [20] einen Arbeitsspeicher von 2-4 GB RAM für die 32-bit Version bzw. 3-6 GB Ram für die 64-bit Version.

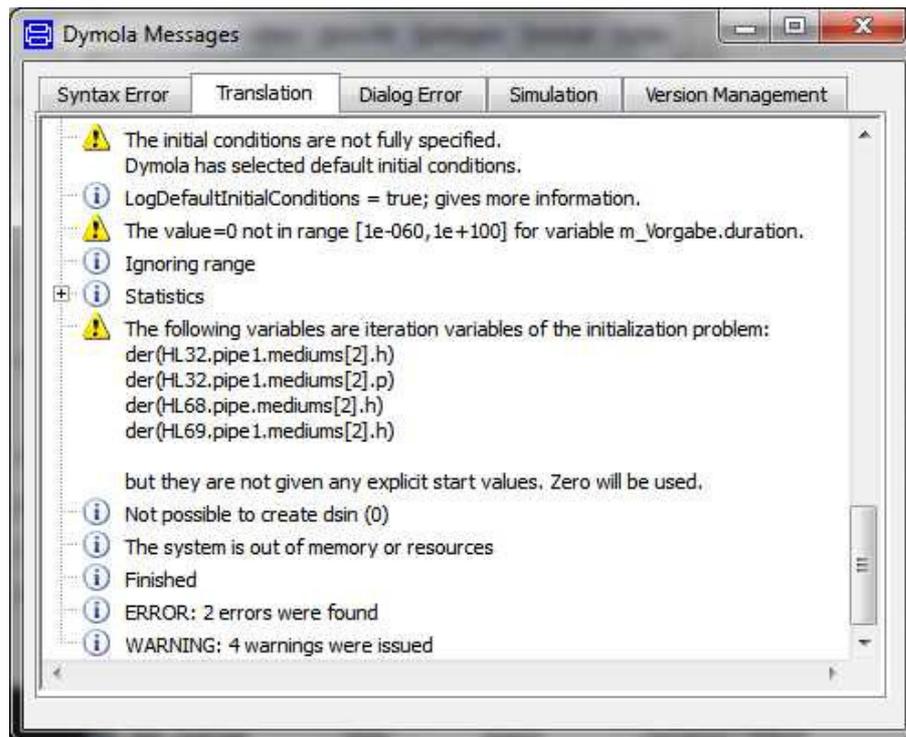


Abbildung 50: Fehlermeldung "The system is out of memory or resources"

Folgende Maßnahmen waren in diesem Fall hilfreich:

1. Reduzieren der Datenmenge, die das System speichern soll. Hier sollen vor allem die Einstellungen im Simulation Setup überprüft werden, z. B. bei Translation Logging unwichtige Infos deaktivieren und unter Output alle Outputvariablen die nicht benötigt werden deaktivieren.
2. Zuerst Klick auf „Translation“ und erst nach erfolgreicher Übersetzung, Befehl zur Simulation, anstatt beide Befehle in einem auszulösen.
3. Oben empfohlenen Befehl Advanced.LogStartValuesForIterationVariables zurück auf = false.

13.1.5 Lange Tabellen auslesen

Bei den Simulationen kam es gelegentlich zu folgender Problemstellung: Die Simulation beginnt, die Übersetzung ist erfolgreich. Es wird ein längerer Zeitabschnitt simuliert. Dann bricht die Berechnung mit einer Fehlermeldung ab. Das kam vor, wenn sich das System in einer stationären Phase befand und die berechneten Ergebnisse als konstant angezeigt wurden. Auch wurden keine weiteren „Berechnungshürden“ vom Solver verzeichnet. Die Fehlermeldung lautet: „Repeated convergence test failures occurred on the last attempted step in the code. An inaccurate or ill-conditioned Jacobian may be the problem. integration will be terminated.“

```

Dymola Messages
Syntax Error Translation Dialog Error Simulation Version Management

Log-file of program ./dymosim
(generated: Wed Apr 22 07:32:09 2015)

dymosim started
... "dsin.txt" loading (dymosim input file)
... "U:/Dymola_modelle/Verbraucherfunktion.txt" loading (tables for interpolat:
... "U:/Dymola_modelle/Verbraucherfunktionen/T12_real_sd.txt" loading (tables f
... "U:/Dymola_modelle/Verbraucherfunktionen/T12_v_sd.txt" loading (tables for :
... "DasViertel102.mat" creating (simulation result file)

Integration started at T = 0 using integration method DASSL
(DAE multi-step solver (dassl/dasslrt of Petzold modified by Dynasim))

... Error message from dymosim
At time T = 1.660104e+004 and stepsize
H = 3.051758e-008 the corrector could not converge.
Repeated convergence test failures occurred on the last attempted step
in the code. An inaccurate or ill-conditioned Jacobian may be the
problem. Integration will be terminated.

Integration terminated before reaching "StopTime" at T = 1.66e+004
CPU-time for integration      : 356 seconds
CPU-time for one GRID interval: 193 milli-seconds
Number of result points      : 2193
Number of GRID points        : 1846
Number of (successful) steps : 3433
Number of F-evaluations      : 40212
Number of H-evaluations      : 5547
Number of Jacobian-evaluations: 2900
Number of (model) time events : 170
Number of (U) time events    : 0
Number of state events       : 13
Number of step events        : 0
Minimum integration stepsize  : 6.14e-009
Maximum integration stepsize  : 49.2
Maximum integration order     : 5
Calling terminal section
... "dsfinal.txt" creating (final states)

```

Abbildung 51: Fehlermeldung: "Repeated convergence test failures"

Es hat sich gezeigt, dass das Auftreten dieses Fehlers, mit der aus ASCII-Files ausgelesenen Datenpunkte in den Komponenten CombiTimeTable, korreliert. Wenn mit der gleichen Anzahl an Datenpunkten Vorgaben bis zu einem späteren Zeitpunkt getroffen werden, kann auch bis zu einem späteren Zeitpunkt berechnet werden.

Folgende Behelfslösung wurde gefunden: Nachdem der Solver die Berechnung unterbrochen hat, wird sie vom letzten funktionierenden Ergebnis aus wieder aufgenommen. Dies geschieht mit Hilfe des Befehls Simulation → Continue → Continue.

Der Solver hatte hier keine Probleme, vom letzten Punkt aus, weiter zurechnen. Anschließend konnten die Berechnungsergebnisse im Plot-Window überlagert und somit zusammengeführt werden. Achtung! Man sollte die bereits erhaltenen Ergebnisse mit dem Befehl „Keep Result“ fixieren, damit sie nicht bei mehreren Teilsimulationen verloren gehen.

13 Anhang

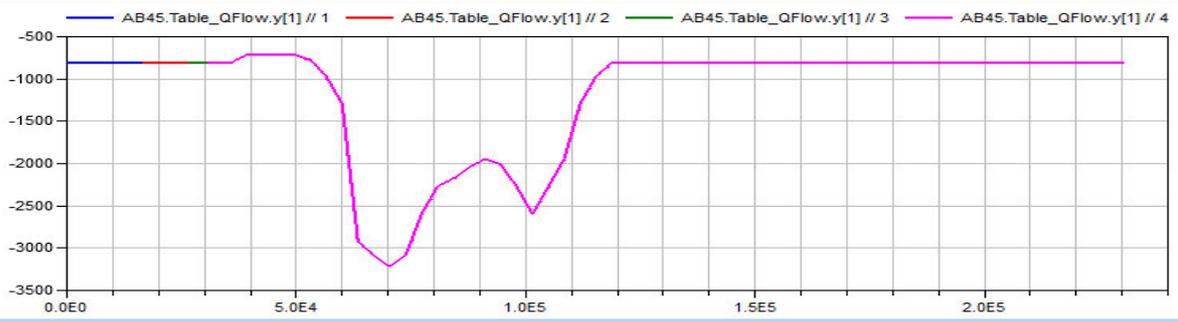


Abbildung 52: Zusammengesetztes Ergebnis einer Simulation

13.2 Anhang B: Simulationsergebnisse

13.2.1 Vergleich Dymola mit Simscape

Vergleich der Massenströme

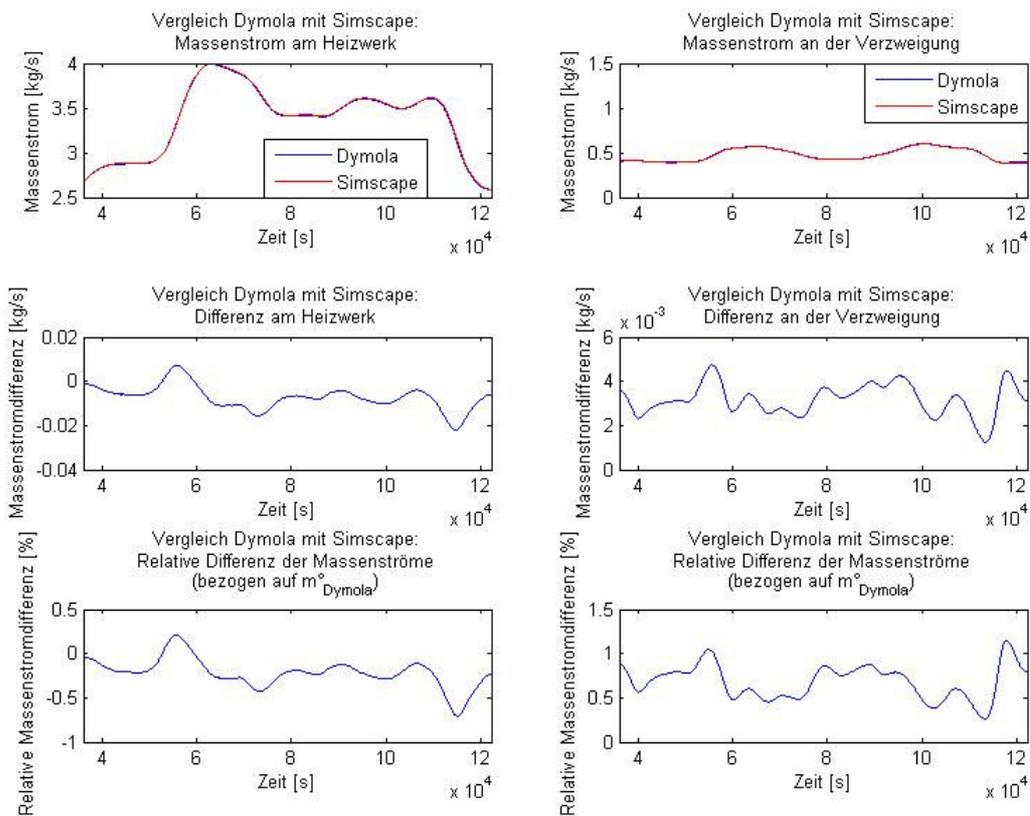


Abbildung 53: Dymola/Simscape: Massenstrom beim Heizwerk und bei der Verzweigung

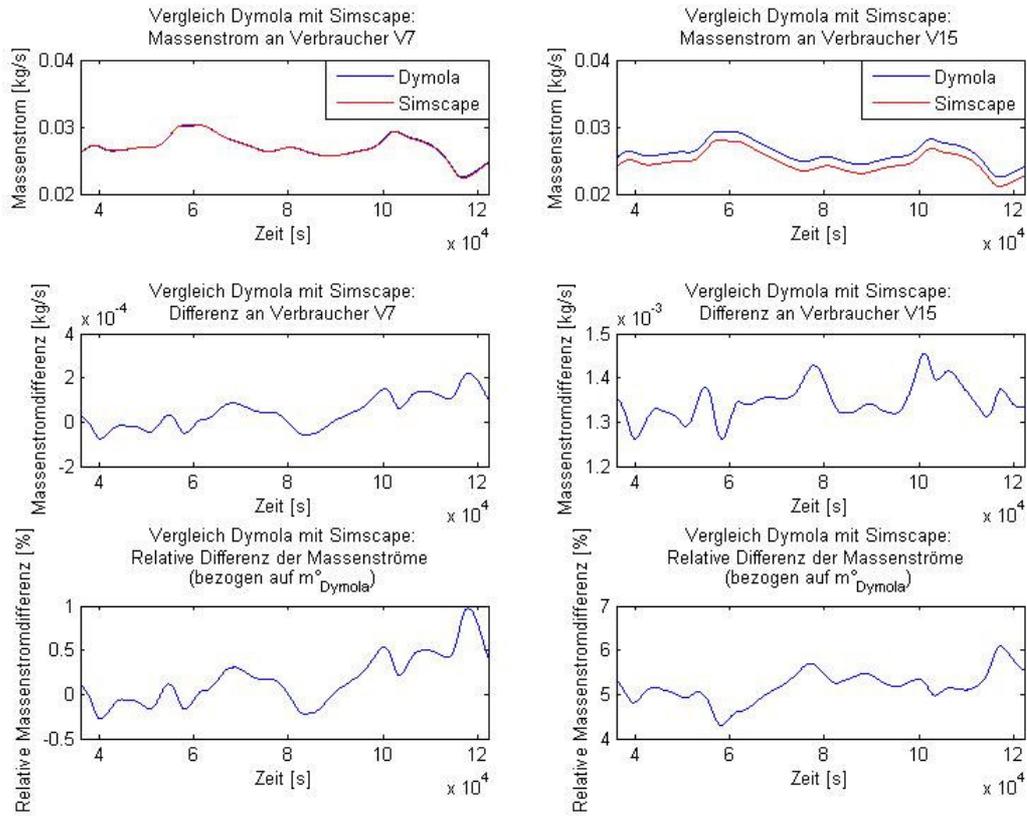


Abbildung 54: Dymola/Simscape: Massenstrom bei den Verbrauchern V7 und V15

13 Anhang

Vergleich der Drücke

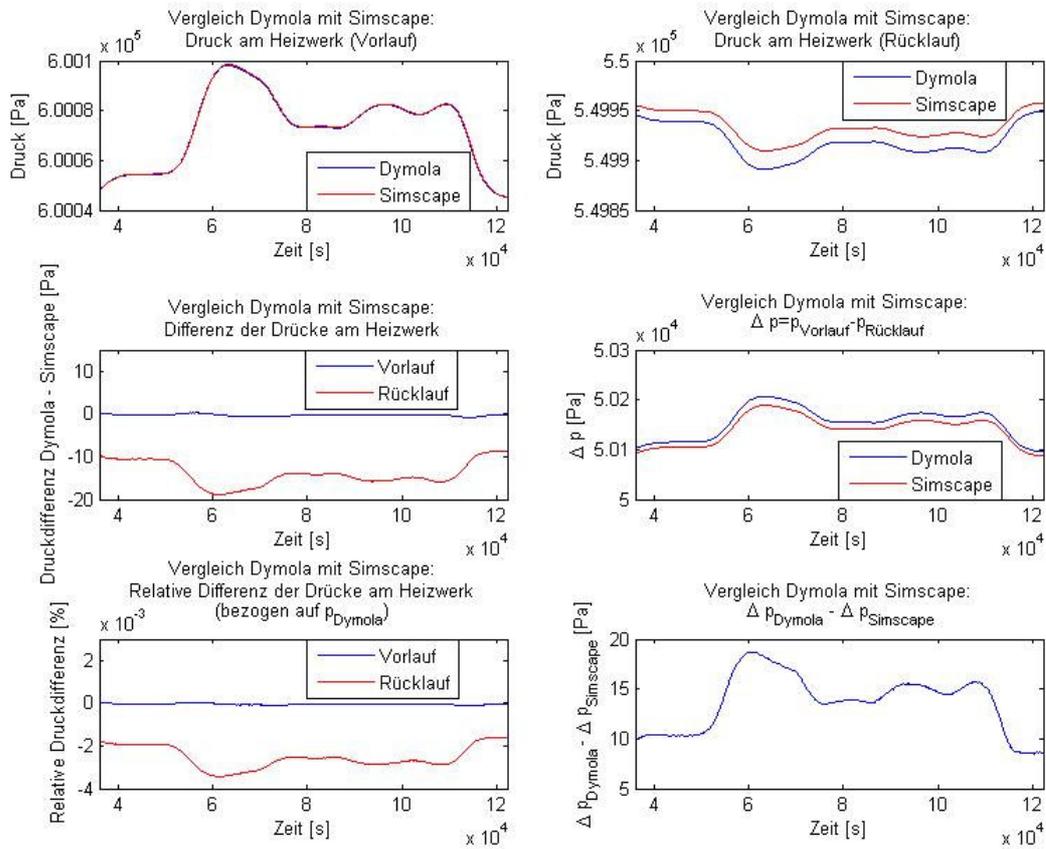


Abbildung 55: Dymola/Simscape: Druck beim Heizwerk

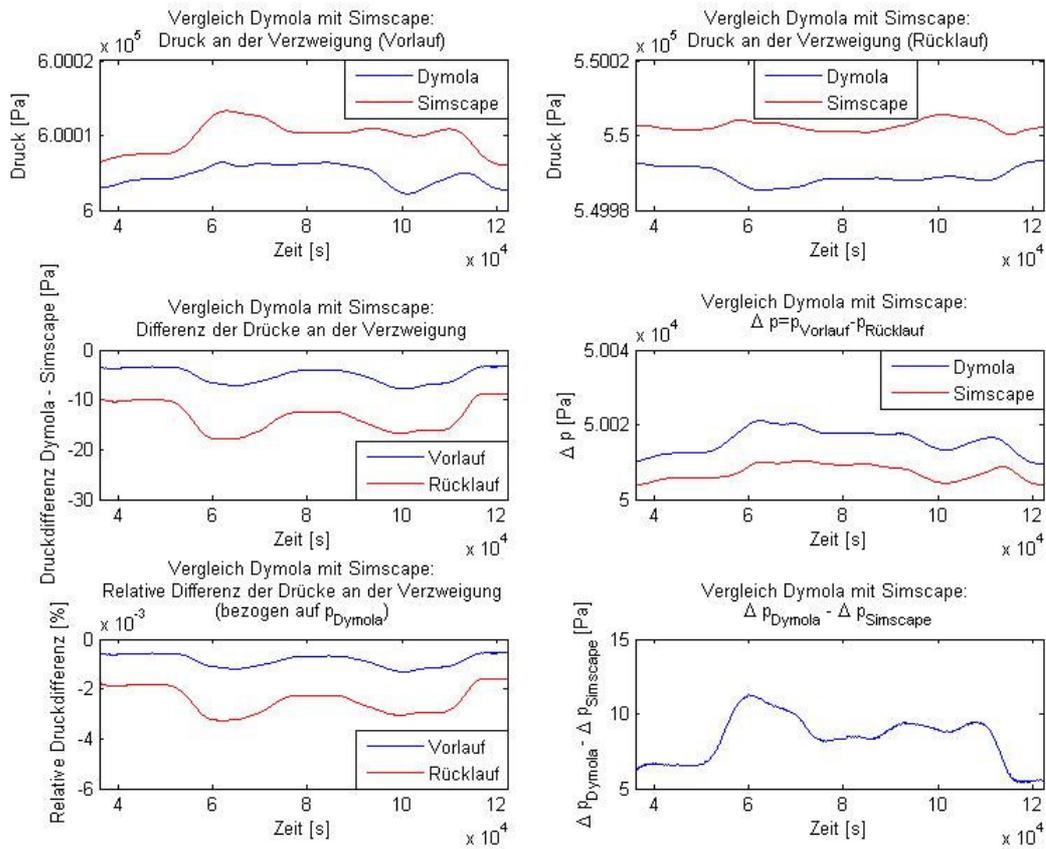


Abbildung 56: Dymola/Simscape: Druck bei der Verzweigung

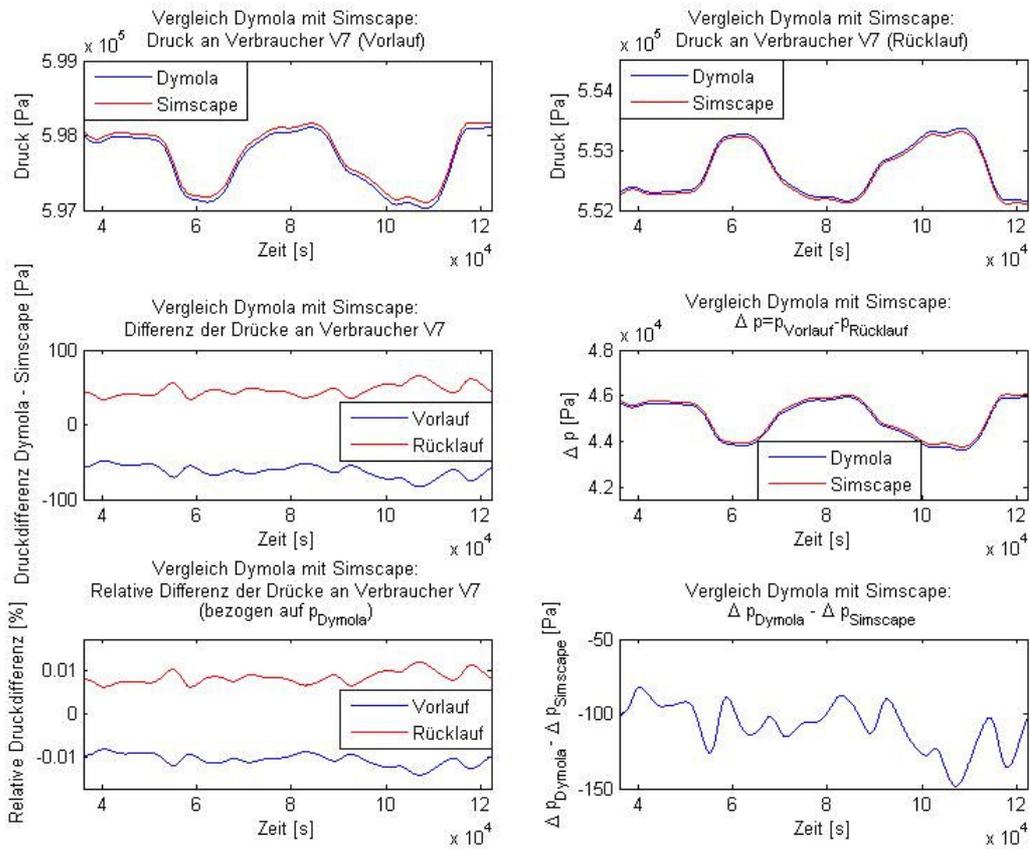


Abbildung 57: Dymola/Simscape: Druck bei Verbraucher V7

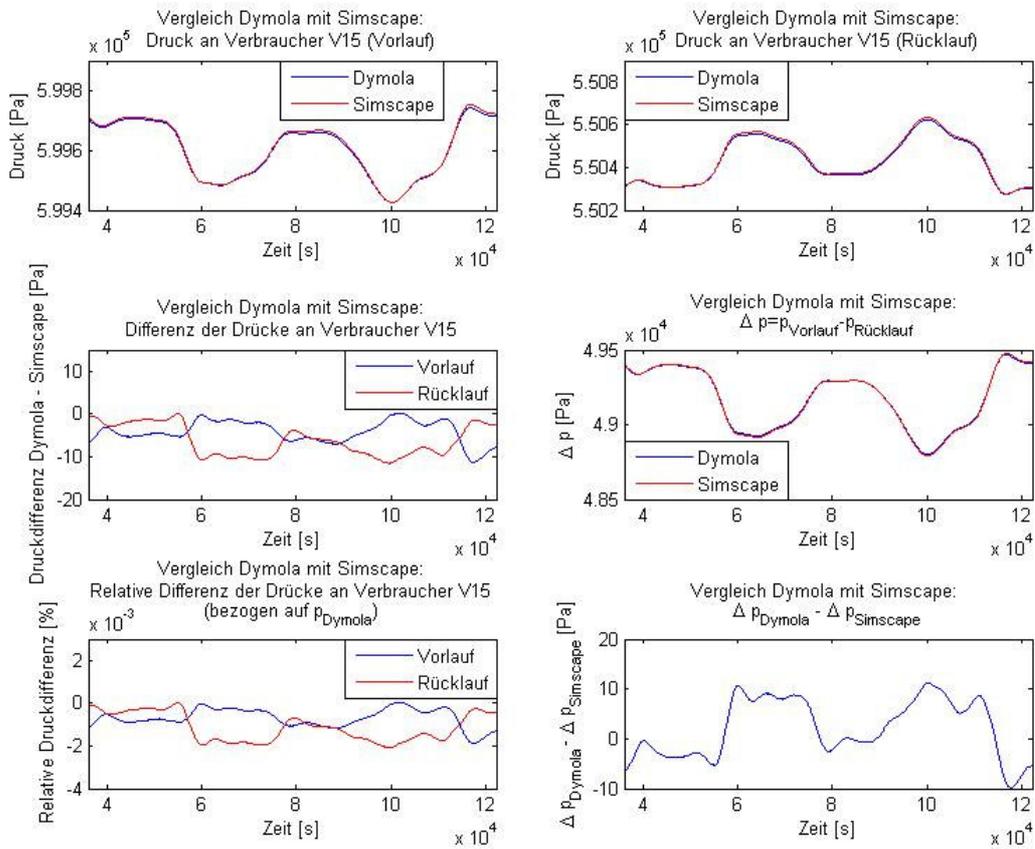


Abbildung 58: Dymola/Simscape: Druck bei Verbraucher V15

13 Anhang

Vergleich der Temperaturen

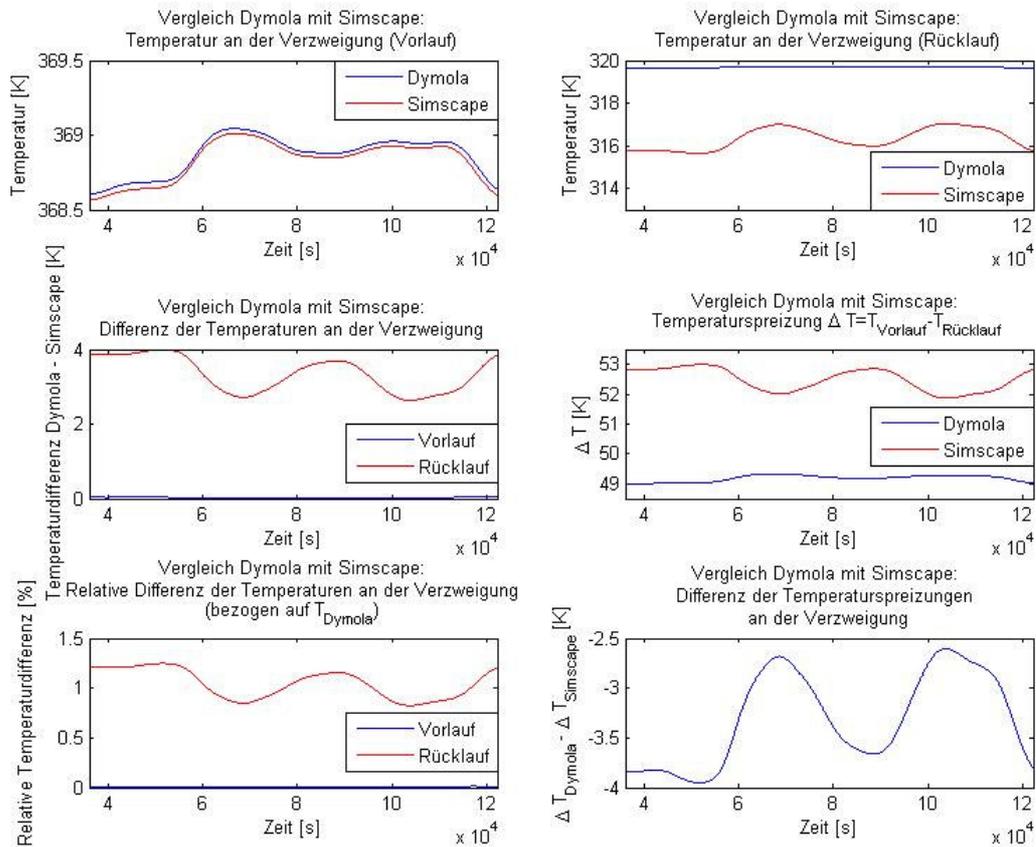


Abbildung 59: Dymola/Simscape: Temperatur bei der Verzweigung

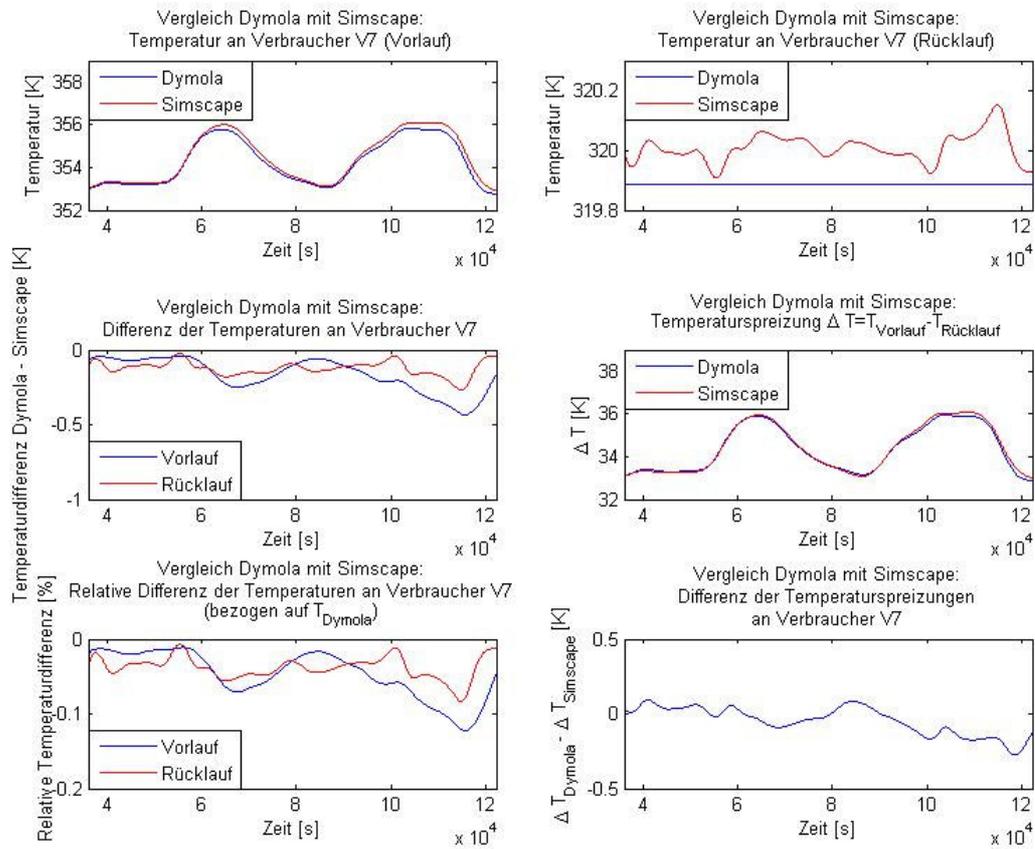


Abbildung 60: Dymola/Simscape: Temperatur bei Verbraucher V7

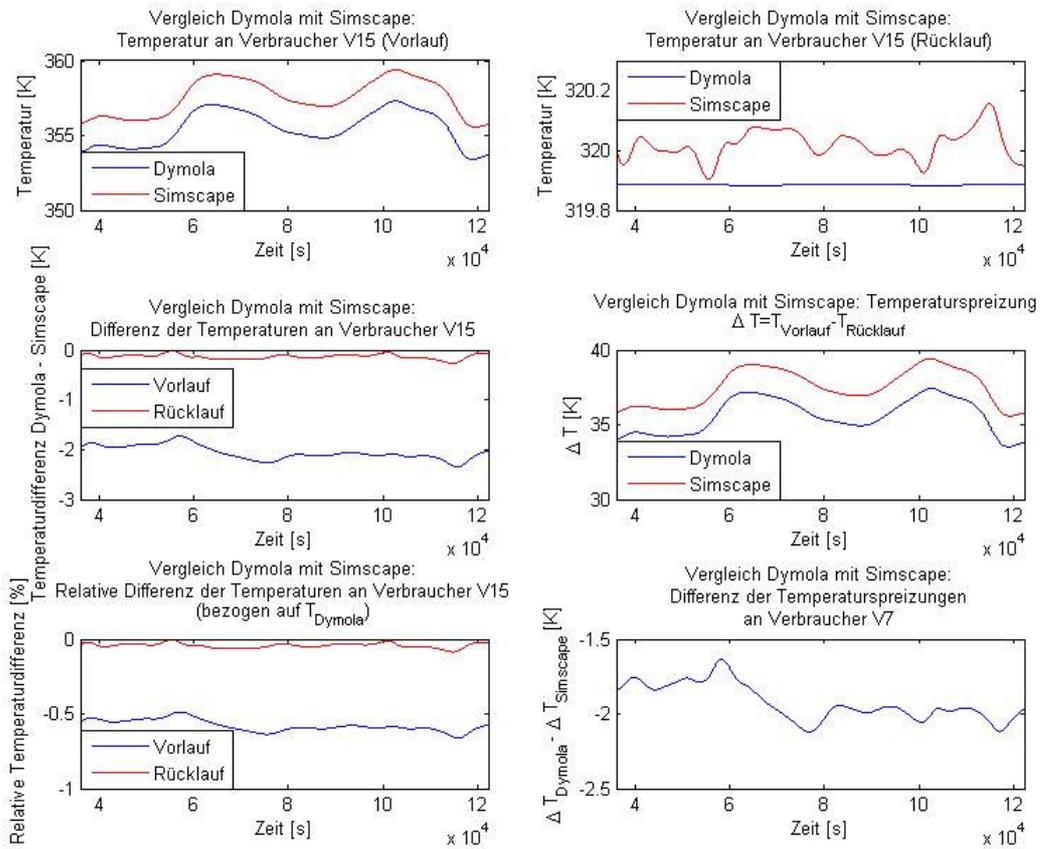


Abbildung 61: Dymola/Simscape: Temperatur bei Verbraucher V15

13.2.2 Vergleich 15 Verbraucher mit vereinfachtem Seitenast T11

Vergleich der Drücke

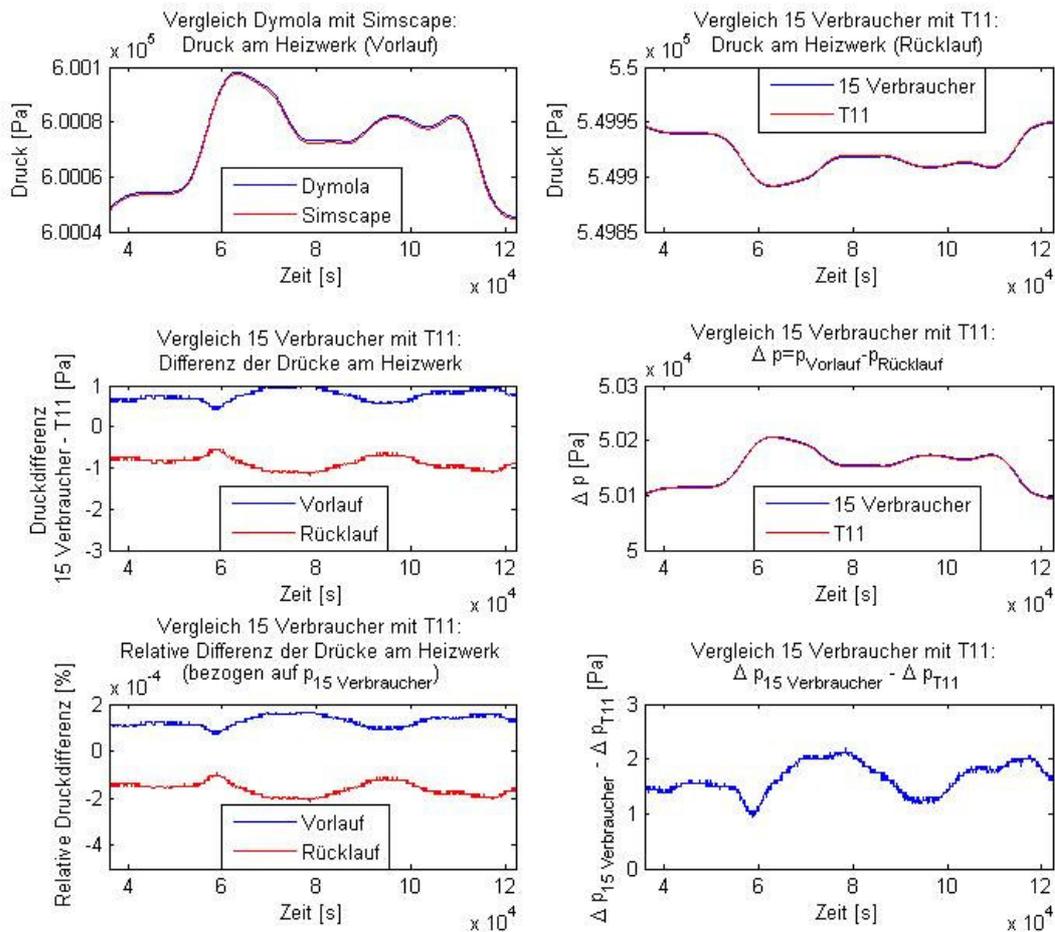


Abbildung 62: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Druck beim Heizwerk

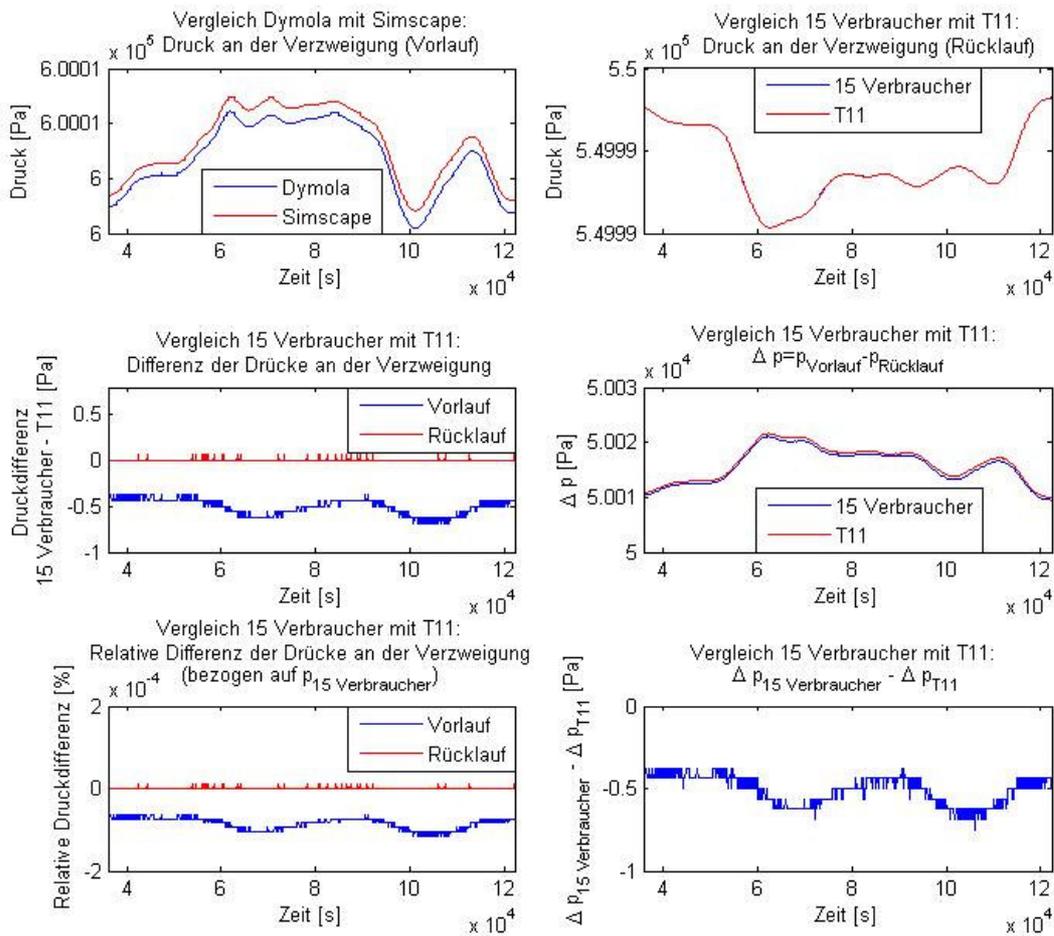


Abbildung 63: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Druck bei der Verzweigung

13 Anhang

Vergleich der Temperaturen

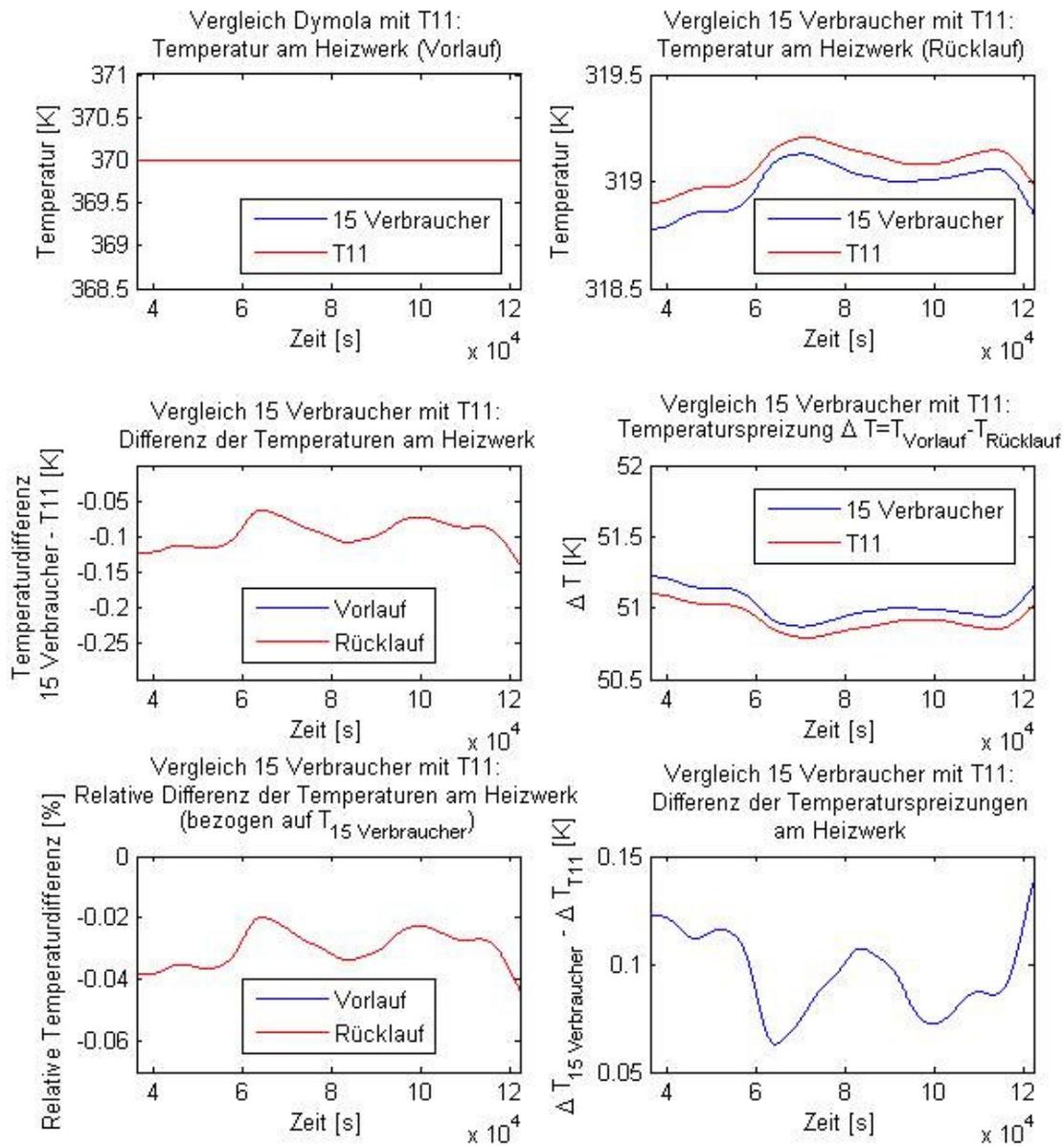


Abbildung 64: 15 Verbraucher/vereinfachter Teillast: Temperatur beim Heizwerk

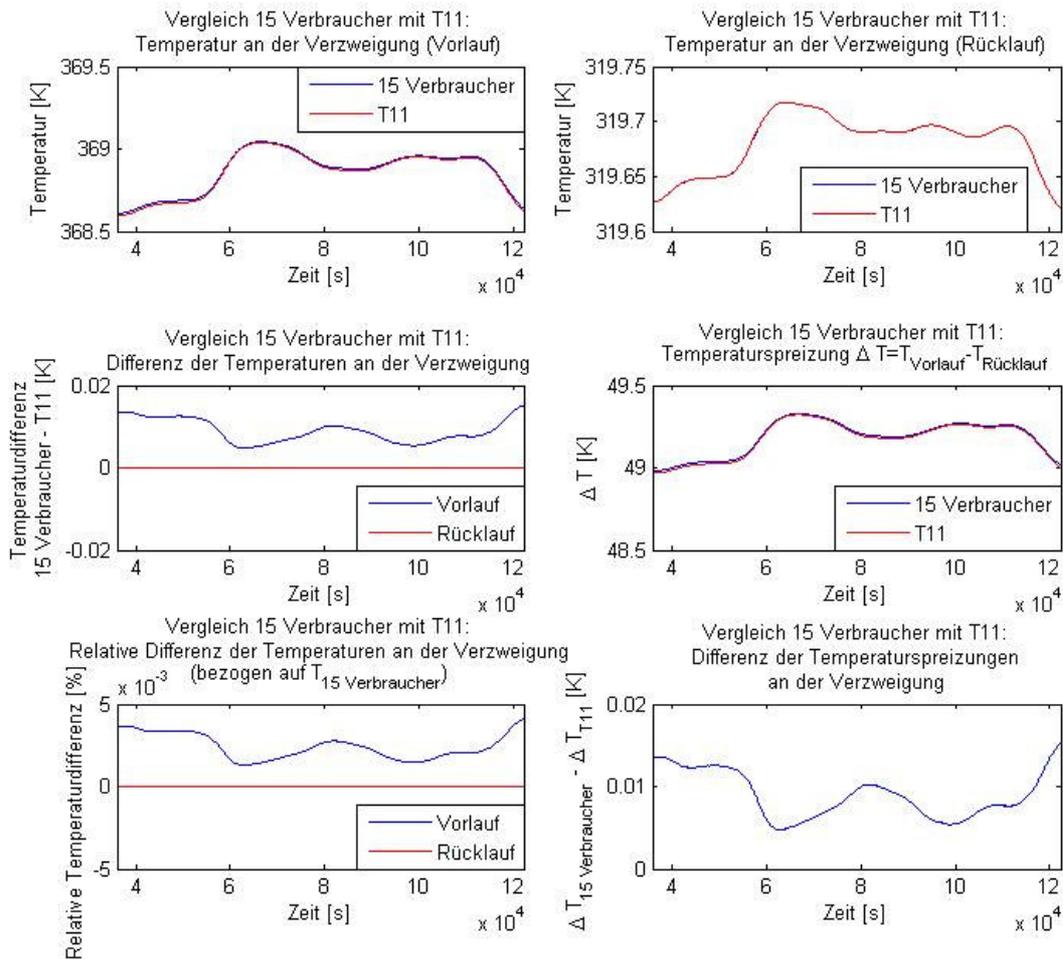


Abbildung 65: 15 Verbraucher/vereinfachter Teilast: Temperatur bei der Verzweigung

13.3 Anhang C: Rohrgeometrien

In der folgenden Tabelle sind die Geometrien zu den Rohren und Verbrauchern des 15-Verbrauchermodells sowie des vereinfachten Teillasts T11 enthalten.

Bezeichnung	Länge [m]	Durchmesser [m]	Dicke Stahlmantel [m]	Dicke Isolierung [m]	Zeta [-]
R1	55,38	0,08	0,0032	0,0326	1,042
R2	50,90	0,08	0,0032	0,0326	2,250
R3	12,15	0,08	0,0032	0,0326	1,000
R4	14,07	0,08	0,0032	0,0326	1,000
R5	2,33	0,08	0,0032	0,0326	1,000
R6	48,57	0,08	0,0032	0,0326	2,250
R7	1,54	0,08	0,0032	0,0326	1,000
R8	12,6	0,08	0,0032	0,0326	1,000
R9	33,40	0,05	0,0029	0,0294	1,000
R10	10,33	0,04	0,0026	0,0279	1,000
R11	19,39	0,04	0,0026	0,0279	1,000
R12	64,50	0,20	0,0045	0,0439	1,000
R13	194,98	0,20	0,0045	0,0439	1,000
R14	20,00	0,20	0,0045	0,0439	1,000
NR1	13,59	0,032	0,0026	0,0308	1,000
NR2	269,97	0,032	0,0026	0,0308	6,400
NR3	14,11	0,032	0,0026	0,0308	1,000
V1	3,24	0,025	0,0023	0,0251	1,000
V2	26,03	0,025	0,0023	0,0251	4,750
V3	16,56	0,025	0,0023	0,0251	1,000
V4	45,07	0,032	0,0026	0,0308	2,250
V5	11,84	0,025	0,0023	0,0251	1,000
V6	11,96	0,025	0,0023	0,0251	1,000
V7	13,38	0,025	0,0023	0,0251	1,000
V8	39,07	0,025	0,0023	0,0251	3,500
V9	6,13	0,025	0,0023	0,0251	2,250
V10	4,35	0,032	0,0026	0,0308	1,000
V11	50,09	0,050	0,0029	0,0294	4,750

13 Anhang

V12	40,28	0,032	0,0026	0,0308	3,500
V13	2,30	0,025	0,0023	0,0251	1,000
V14	31,67	0,025	0,0023	0,0251	3,500
V15	30,34	0,025	0,0023	0,0251	2,250
V16	10,00	0,100	0,0036	0,0396	1,000
V17	10,00	0,100	0,0036	0,0396	1,000
T11_E0	55,38	0,080	0,0032	0,0326	1,000
T11_E1	61,11	0,080	0,0035	0,0233	2,953
T11_E2	427,61	0,055	0,0033	0,0200	51,697