



Studiengang: Maschinenbau

Studienrichtung: Energie- und Umweltschutztechnik

**Validierung einer Wärmepumpe mit Hilfe
der MATLAB® Toolbox CARNOT**

Diplomarbeit von Michael Middelbeck

Matrikelnummer: 907362

September 2003

Diese Diplomarbeit wurde betreut von :

Herrn Prof. Dipl.-Ing. C. Schwarzer

Herrn Dr.-Ing. Christian Faber

Herrn Dipl.-Ing. Carsten Wemhöner

Herrn Dipl.-Ing. Ralf Dott

Herrn Dipl.-Ing. Thomas Hartz

**Diese Arbeit wurde von mir selbstständig angefertigt und
verfasst. Es sind keine anderen als die angegebenen
Quellen und Hilfsmittel benutzt worden.**

Jülich, den 3. September 2003 _____

Beginn der Arbeit: 02.06.2003

Ende der Arbeit: 03.09.2003

Danksagungen

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Carsten Wemhöner, Ralf Dott und Thomas Hartz, die mich in der Phase meiner Diplomarbeit hervorragend unterstützten.

Des weiteren möchte ich mich bei meinen Professoren Herrn Faber und Herrn Schwarzer bedanken.

Meiner Frau Claudia möchte ich herzlich für die aufgebrachte Geduld und die ständige moralische Unterstützung danken.

Meiner Tochter Isa möchte ich für Ihr Verständnis danken.

Ein ganz besonderen Dank möchte ich hiermit auch meinen Eltern aussprechen, ohne deren Unterstützung mein Studium nicht möglich gewesen wäre.

Kurzfassung

Das Ziel meiner Diplomarbeit ist die Validierung eines in der MATLAB-Simulink®-Toolbox CARNOT enthaltenen Modells der Wärmepumpe. Die Messdaten zur Validierung stammen von 2 Feldversuchsanlagen der Firma Viessmann.

Zunächst werden die theoretischen Grundlagen der Software MATLAB und Simulink beschrieben und dann wird näher auf die Toolbox CARNOT eingegangen. Die Grundlagen der Wirkungsweise einer Wärmepumpe und deren Komponenten werden von mir beschrieben, und es wird die hydraulische Verschaltung der Wärmepumpe der beiden Feldversuchsanlagen aufgezeigt.

Nachdem die Grundlagen erklärt sind, werden die spezifischen Parameter der beiden Wärmepumpen aus Datenblättern herausgelesen beziehungsweise mit Hilfe von Simulink berechnet. Die Messdaten der Firma Viessmann werden aufbereitet und die sinnvollen Dateien werden zur anschließenden Simulation gespeichert. Dann werden die Modelle der beiden Feldversuchsanlagen erstellt und die Simulationen durchgeführt.

Die Ergebnisanalyse zeigt, dass die simulierten und gemessenen Werte der Feldversuchsanlage Holzmann nur geringfügig voneinander abweichen, wohingegen die simulierten Werte der Feldversuchsanlage Leyhe eine konstant große Abweichung besitzen.

Auch nach anschließender Parameteroptimierung der Zeitkonstanten wird dieser Zustand nicht besser und es wird auf die möglichen Fehlerursachen hingewiesen.

Die Modellgüte ist trotz der beschriebenen Probleme mit einer Abweichung unter 10% sehr gut, so dass die Validierung der Wärmepumpe als erfolgreich zu werten ist.

Abstract

The aim of my diploma-thesis is to validate the heat pump model contained in the MATLAB-Simulink®-Toolbox CARNOT. The validating measurements come from 2 field test plants by the Viessmann company.

First the theory underlying the software MATLAB and Simulink is reviewed, then the basis of the Toolbox CARNOT is described in more detail. The importance of a heat pump and its components is described and the hydraulic interconnection of the heat pumps from the two field test plants is pointed out.

After the fundamental aspects are described, the specific parameters of the two heat pumps are obtained from data sheets or estimated by Simulink. The Viessman company's measurements are entered and stored following simulation. Then the models of the two field test plants are provided and the simulation is accomplished.

Data analysis shows that the simulated and measured values of the Holzmann field test plant deviate only slightly from each other, while those of the Leyhe field test plant possess a consistently large deviation. In regard to possible causes of error, parameter optimization of the time constants does not resolve the deviation.

Despite the described problems with deviation under 10%, the model quality is very good. Therefore, the heat pump model is successfully validated.

Inhalt

0	Verwendete Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes.....	2
1	Einleitung.....	4
2	Aufgabenstellung.....	5
3	Grundlagen.....	6
3.1	Die Software MATLAB	6
3.2	Simulink®	6
3.3	CARNOT	7
4	Die Wärmepumpe.....	9
4.1	Grundlagen	9
4.2	Die Theorie	10
4.3	Das Modell	12
4.4	Versuchsaufbau	15
5	Modellierung und Simulation	20
5.1	Beschreibung der Modellkomponenten in MATLAB.....	20
5.2	Aufbereitung der Messdaten	27
5.3	Simulationsanleitung Wärmepumpe.....	30
5.4	Betrachtung der Zeitkonstanten	35
5.5	Simulation FVA Holzmann	40
5.6	Simulation FVA Leyhe.....	44
6	Ergebnisse und Ausblick	47
7	Zusammenfassung	51
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	52
9	Anhang	54
9.1	Simulationsdiagramme.....	54
9.2	Hilfetext für fminsearch aus MATLAB	56
9.3	Marktübersicht Wärmepumpen	57

0 Verwendete Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes

Formelzeichen

v	Temperatur	[°C]
P	Leistung	[W]
Q	Energie	[W/S]
p	Druck	[Pa]
T	Zeit	[s]
c_p	spez. Wärmekapazität	[J/ (kg * K)]
s	spez. Entropie	[J/(kg * K)]
h	spez. Enthalpie	[J/kg]

MATLAB-Bezeichnungen

T	Temperatur	[°C]
$mdot$	Massenstrom	[kg/s]
cp	spez. Wärmekapazität	[J/ (kg * K)]
$qdot$	Energie	[W/s]
amb	Umgebung	
$K1, K2$	Konstanten der Wärmepumpe	[kW/°C]
$K3$	Konstante der Wärmepumpe	[kW]
$Rows$	engl. Zeile in Tabellen	
$Cols$	engl. Spalte in Tabellen	

Abkürzungen

THV	Thermohydraulischer Vektor
amb	Umgebung
$load$	hier: Heizkreis
$source$	hier: Solekreis
sim	simuliert
$measure$	gemessen
e_{SOL}	absoluter Fehler Solekreis
e_{HK}	absoluter Fehler Heizkreis
FVA	Feldversuchsanlage
THV	Thermohydraulischer Vektor

Verwendete Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes

KW	Kaltwasser
WW	Warmwasser

Indizes

v	Vorlauf
r	Rücklauf
F	Flüssigkeit (von engl. Fluid)
BW	Brauchwasser
SOL	Sole
HK	Heizkreis
el	elektrisch
SP	Speicher
E-Stab	Elektrischer Heizstab
DEH	Durchlauferhitzer, elektrisch
WP	Wärmepumpe
Lade	Ladepumpe
3-Wege	3-Wege-Ventil, elektrisch
A	Umgebung

1 Einleitung

In den letzten 10 Jahren stieg in der Bevölkerung das Bewusstsein für umweltgerechtes Handeln. So wird seitdem mit recycelten Materialien gearbeitet, es werden Motoren mit geringerem Verbrauch und geringerem Ausstoß an Umweltgiften und Klimastörfaktoren wie CO₂ produziert und in allen Lebensbereichen wird mehr auf die Umwelt geachtet.

Ein großer Energieverbraucher und CO₂-Produzent ist der Sektor der privaten Einfamilienhäuser. Hier fühlen sich immer mehr Hausbauer dazu verpflichtet, mit Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung, mit Solaranlagen zur Stromproduktion und mit der Nutzung der internen und externen Gewinne (solar optimierter Grundriss) etwas gegen die weitere Umweltverschmutzung und den fortschreitenden Klimawandel zu unternehmen. Nun gibt es gerade in den so genannten Niedrigenergiehäusern das Problem, dass mit den herkömmlichen Heizkesseln eine unökologische Überproduktion von Wärmeleistung erfolgt. Die Industrie ist somit gefordert, einen umweltfreundlichen Wärmeerzeuger bereitzustellen, der die geforderten Ansprüche an geringer Leistungsaufnahme, niedrigen Kosten und natürlich dem Verlangen an Komfort und Behaglichkeit erfüllt.

Um dieses Verbraucherverhalten zu unterstützen, stehen die Hersteller von heiztechnischen Produkten vor dem Problem geringe Wärmemengen wirtschaftlich bereitstellen zu können. Für Niedrigenergiehäuser heißt das häufig, dass eine kontrollierte Wohnraumbe- und -entlüftungsanlage mit Abluftwärmetauscher und einem Aufheizregister in Form einer Wasser / Luft-Wärmepumpe als Optimum angesehen wird.

2 Aufgabenstellung

Um eine möglichst genaue Aussage über die Leistungsfähigkeit einer Wärmepumpe treffen zu können, ist es erforderlich mit Hilfe einer Modellbildung und eines Simulationsprogramms die Abhängigkeiten von Verbraucherverhalten und zur Verfügung gestellter Energie zu simulieren. Diese Simulation kann schon in die Planungsphase von Gebäuden eingehen, und so können bauliche Gegebenheiten auf die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe hin optimiert werden und umgekehrt.

Als hervorragendes Werkzeug für die Simulation von regenerativen Energiesystemen hat sich das am Solar-Institut Jülich entwickelte Softwaretool CARNOT herausgestellt. Grundlage für CARNOT ist das von „The Mathworks“ entwickelte Programm MATLAB, welches mit Hilfe der Simulink®-Toolbox eine graphische Möglichkeit bietet, Simulationen und deren Prozesse darzustellen. Somit können die haustechnischen Komponenten sowie deren Bauteile und die Wärmeverteilung in einem zu planenden Haus optisch dargestellt und berechnet werden. CARNOT ist eine eigens für SIMULINK® entwickelte Erweiterung der Toolbox.

In CARNOT ist ein Modell einer Wärmepumpe vorhanden, das nun mit Hilfe von Messdaten validiert werden muss.

3 Grundlagen

3.1 Die Software MATLAB

Das Programm MATLAB ist ein numerisches Berechnungswerkzeug, das aus der Programmiersprache FORTRAN hervorgeht und mit einer graphischen Oberfläche gestaltet worden ist [BEU00]. Mit Hilfe der MATLAB Toolbox ist es mit geringen Kenntnissen in der Programmierung möglich, komplexe Vorgänge darzustellen und anschließend zu simulieren.

MATLAB rechnet im Gegensatz zu den bekannten Programmen wie Maple oder Mathematica rein numerisch. Der Vorteil dieser Rechenweise ist, dass keine komplexen Datenstrukturen benötigt werden, sondern nur eine Datenstruktur, die Matrix. Diese Datenstruktur gibt dieser Software auch den Namen, denn MATLAB ist die Abkürzung von MATrixLABoratory.

MATLAB beinhaltet eine eigene Skript-Sprache, dessen Befehle direkt in der Kommando-Oberfläche (man kennt dies in Windows als „DOS-Box“) eingegeben werden können. Es können natürlich auch ganze Programme geschrieben werden, in der die Befehle aufgerufen werden – man spricht dann von einem so genannten m-Skript.

3.2 Simulink®

Die graphische Oberfläche zu MATLAB wird Simulink® genannt. Hiermit ist es möglich, dynamische Systeme [HOF98] mit Hilfe einer graphischen Oberfläche darzustellen, und die Simulation direkt in dieser zu beginnen.

Simulink® bietet hierfür schon vorgefertigte Blöcke oder Operatoren wie zum Beispiel einen Integrator an, die in einem „Blockset“ zusammengefasst sind. Diese Tools sind als Blockschaltbilder abrufbar, und werden mit „Drag & Drop“ einfach in die Arbeitsfläche übertragen, so dass komplexe mathematische Operationen grafisch dargestellt werden können.

3.3 CARNOT

CARNOT steht für “Conventional And Renewable eNergy systems Optimization Toolbox” [CAR99]. Dieses Blockset besteht aus Modellen für heizungstechnische Anlagen. Es ist speziell für die Umgebung MATLAB- Simulink® gestaltet worden und ergänzt somit die Simulink®-Toolbox mit Werkzeugen wie „weather“, „collector“ und „storage“. Diese Werkzeuge sind für die Simulation von Heizsystemen notwendig, und es können weitere komplexe Heizsysteme und Regelungsstrategien hiermit simuliert und entwickelt werden.

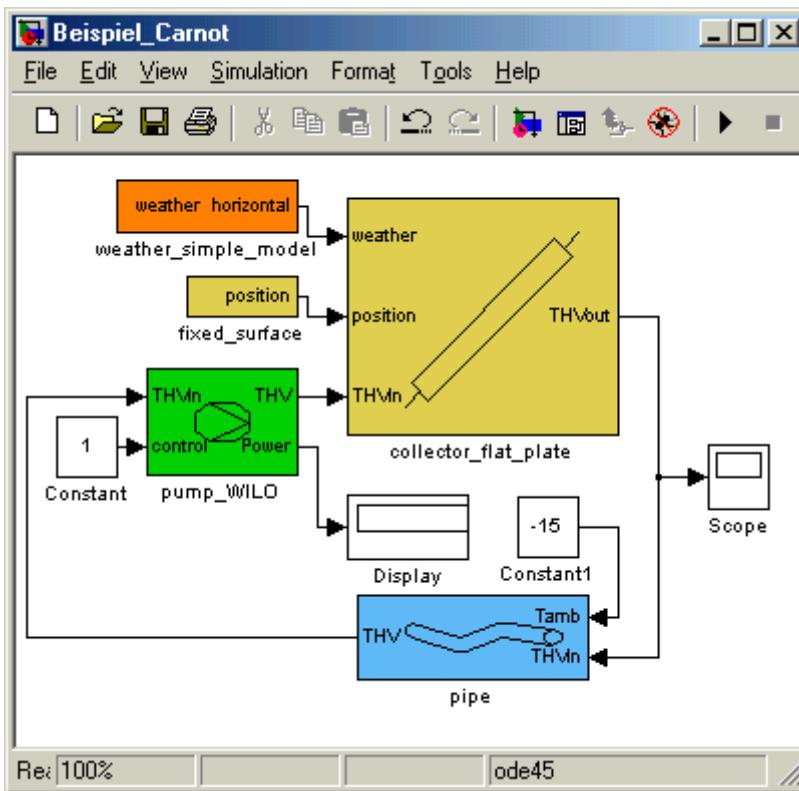


Abbildung 3.1: Modell eines Solarkreislaufes ohne Speicher

In obigen Beispiel wird der Kreislauf einer Solaranlage dargestellt. Durch die grafische Darstellung ist der Kreislauf mit den einzelnen Komponenten gut zu erkennen, und es wird die Wirkungsweise klar. Zentrales Element ist hier der Kollektor, der 3 Eingänge besitzt: Wetter-, Positionsdaten und der so genannte ThermoHydraulische Vektor (Erläuterung siehe Seite 20) des Solarrücklaufes. Den Ausgang bildet der THV für den Solarvorlauf, dessen Komponenten hier im Beispiel mit Hilfe der Anzeige (Scope) visualisiert werden.

Grundlagen

In der Blackbox „pipe“ wirken die Rohrverluste und die Aussentemperatur „Tamb“ auf den THV ein.

Damit der Kreislauf auch funktioniert, ist eine Pumpe notwendig; hier eine Kreiselpumpe des Fabrikates Wilo „pump_wilo“ . Die Pumpe lässt sich regeln und die Leistung der Pumpe in einem „Display“ ablesen.

4 Die Wärmepumpe

4.1 Grundlagen

Die Wärmepumpe ist ein Aggregat, das Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau aufnimmt und unter Zufügen von Antriebsenergie (meist mechanische Energie) diese Wärme auf einem höheren, nutzbaren Temperaturniveau abgibt [REC92]. Damit eignet sich eine Wärmepumpe für die Nutzung von Erdwärme zu Heizzwecken. Wärmeenergie wird aus der Erde mit Hilfe von Wärmetauschern bei Temperaturen von etwa -5 °C bis +10°C aufgenommen und mit ca. 35-55 °C an das Heizsystem abgegeben. Je niedriger dabei der Temperaturhub ist (z.B. 0 °C auf 35 °C) desto weniger Antriebsenergie wird benötigt und desto höher ist die Energieeffizienz (Leistungszahl).

Das Schema einer Kompressions-Wärmepumpe zeigt Abbildung 4.1. In der Praxis sieht der Arbeitsmittelkreislauf folgendermaßen aus: Durch Wärmezufuhr auf niedrigem Temperaturniveau wird ein Medium mit niedrigem Siedepunkt (Kältemittel, heute fast ausschließlich ohne Fluor-Chlor-Kohlen-Wasserstoffe, wie z.B. R407c) verdampft, die gasförmige Phase dann in einem Kompressor verdichtet (in der Praxis bis >20 bar) und dadurch erhitzt. Unter hohem Druck stehend gibt das Arbeitsmittel seine Wärme zur Nutzung ab (Heizungswasser, Luftstrom) und kondensiert dabei. Durch das Expansionsventil tritt das Arbeitmittel wieder in den Teilkreislauf mit geringem Druck ein und wird wiederum dem Verdampfer zugeführt.

Für den Antrieb von Wärmepumpenkompressoren werden überwiegend Elektromotoren eingesetzt. Bei größeren Einheiten (>100 kW Heizleistung) stehen auch Wärmepumpen zur Verfügung, deren Kompressor durch einen Gas- oder Dieselmotor angetrieben wird.

Es gibt auch zweistufige Wärmepumpen, bei denen das Arbeitsmittel in 2 Schritten auf den benötigten Druck gebracht wird. Dies ist erforderlich, wenn ein großer Temperaturhub benötigt wird (bei großen Leistungen).

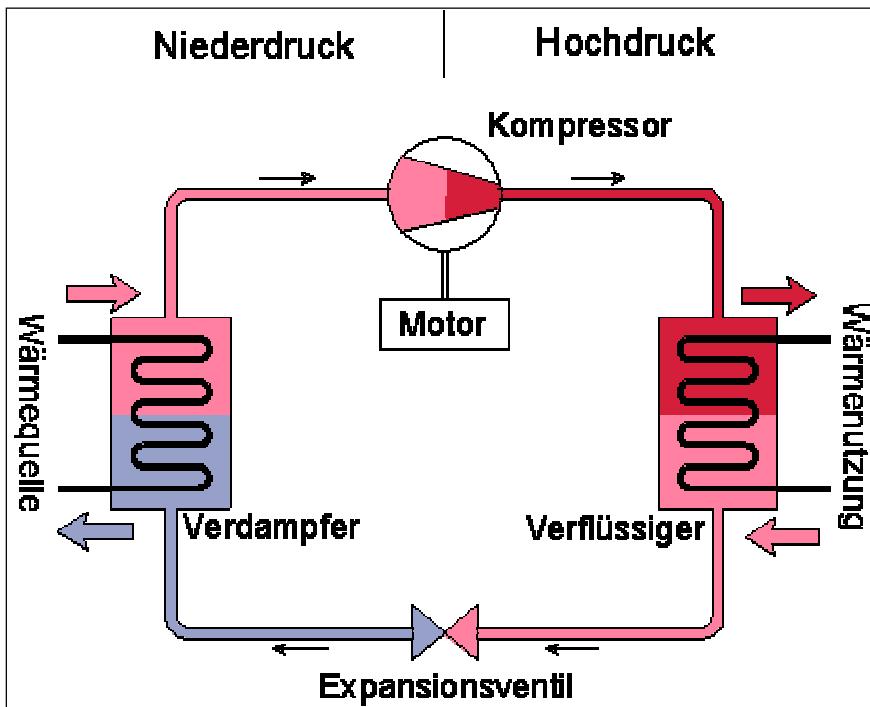


Abbildung 4.1: Schema einer Kompressions-Wärmepumpe

4.2 Die Theorie

Der Wärmepumpenprozess entspricht einem Kreisprozess, in dem Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Niveau gebracht wird. Laut dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist hierfür ein Arbeitsaufwand notwendig [REC92]. Dieser Arbeitsaufwand wird durch mechanische Energie im Kompressor dargebracht.

Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 veranschaulichen den idealen Kreisprozess unter Vernachlässigung von Reibungs- und Dissipationsverlusten:

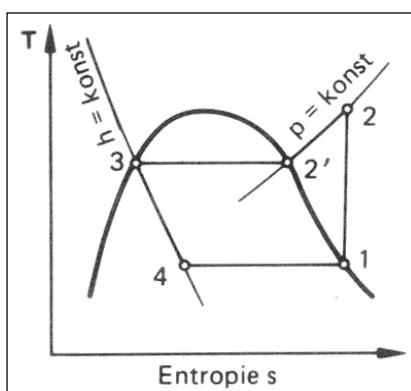


Abbildung 4.2: Theoretischer Wärmepumpenprozess in T,s-Diagramm

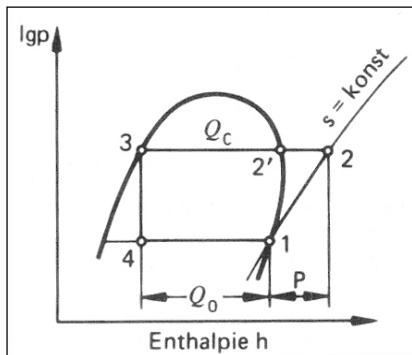


Abbildung 4.3: Theoretischer Wärmepumpenprozess in Ig p,h -Diagramm

Zustandsänderungen

$1 \rightarrow 2$ isentrope Verdichtung

$2 \rightarrow 3$ isobare Wärmeabgabe im Kondensator

$3 \rightarrow 4$ isenthalpe Drosselung

$4 \rightarrow 1$ isobare und isotherme Wärmeaufnahme im Verdampfer [GIE89]

Ein wichtiger Faktor zum Vergleich der Effizienz von Wärmepumpen ist das Verhältnis zwischen der Heizleistung Q_H , die im Kondensator abgegeben wird und der Verdichterleistung P . Dieses Verhältnis ist bekannt unter dem Begriff Leistungszahl ε oder im englischen Sprachraum auch COP (coefficient of performance) genannt.

Es wird hierbei zwischen der theoretischen Leistungszahl ε_{th} , der Carnot-Leistungszahl ε_c und der realen Leistungszahl ε unterschieden. Wobei die Carnot-Leistungszahl aufgrund des idealisierten Kreisprozesses den größten Wert hat.

4.3 Das Modell

Das Wärmepumpenmodell in CARNOT beruht auf einem Modell von Schwamberger [SCH91].

Hier wird mit Hilfe des in der [DIN8900] beschriebenen Leistungsdiagramms die Wärmepumpe abgebildet.

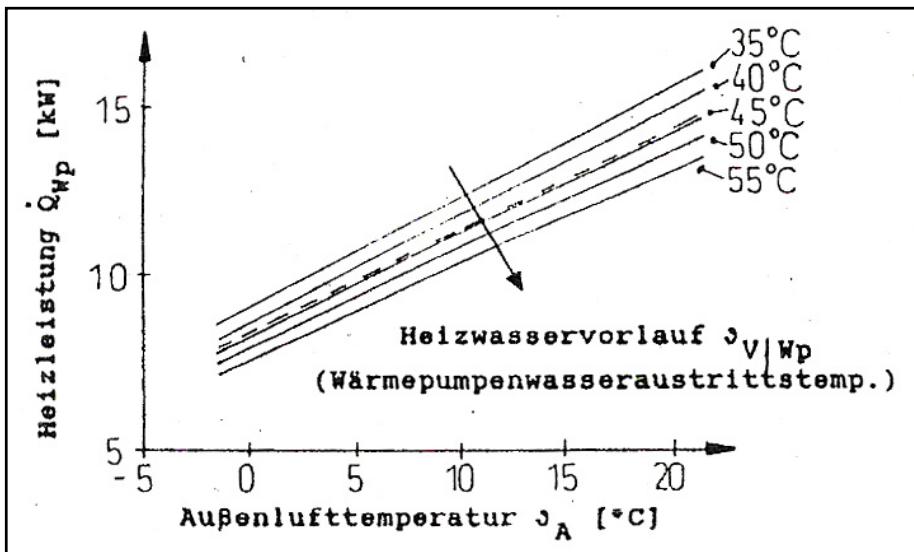


Abbildung 4.4: Statisches Leistungsdiagramm der Wärmepumpe

Das zweidimensionale Diagramm stellt die verschiedenen Kennlinien der Vorlauftemperatur $\vartheta_{V(WP)}$ in Abhängigkeit der Heizleistung Q_{WP} und der Außenlufttemperatur ϑ_A dar. Die Schar der Kennlinien kann folgendermaßen dargestellt werden:

$$\dot{Q}_{WP} = f(\vartheta_A, \vartheta_{V(WP)}) \quad [\text{kW}] \quad \text{GL.1}$$

$$\dot{Q}_{WP} = K_1 * \vartheta_A + K_2 * \vartheta_{V(WP)} + K_3 \quad [\text{kW}] \quad \text{GL.2}$$

Mit $n = 5$ Geraden (-gleichungen) aus dem Diagramm lassen sich mit Hilfe des kleinsten mittleren quadratischen Fehlers die Größen K_1 , K_2 und K_3 bestimmen:

$$e^2 = \sum_{i=1}^n (\dot{Q}_{WP}^{(i)} - K_1 * \dot{g}_A^{(i)} - K_2 * \dot{g}_{V(WP)}^{(i)} - K_3)^2 \quad \text{GL.3}$$

Nach Nullsetzen der Ableitungen und anschließendem Auflösen der Gleichungen lassen sich K_1 , K_2 und K_3 für die obige Kennlinienschar wie folgt bestimmen:

$$K_1 = 0,308 \text{ kW / } ^\circ\text{C}$$

$$K_2 = -0,1028 \text{ kW / } ^\circ\text{C}$$

$$K_3 = 13,052 \text{ kW}$$

Die Rücklauftemperatur der Wärmepumpe $\Delta \dot{g}_{R(WP)}$ folgt aus folgender Beziehung:

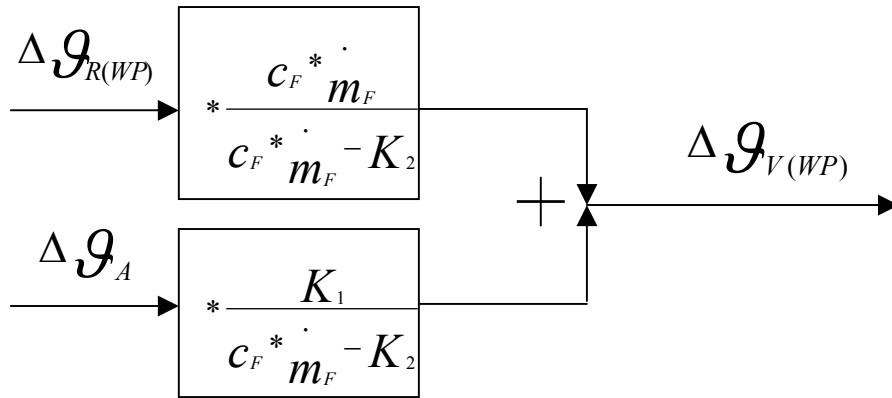
$$\dot{Q}_{WP} = c_F * \dot{m}_F * (\dot{g}_{V(WP)} - \dot{g}_{R(WP)}) \quad [\text{kW}] \quad \text{GL.4}$$

Um den Arbeitspunkt um eine Änderung Δ zu ermitteln, wird \dot{Q}_{WP} in Gleichung GL.4 mit Gleichung GL.2 eliminiert und nach $\dot{g}_{V(WP)}$ aufgelöst. Die Variation von $\Delta \dot{g}_{V(WP)}$ ergibt dann:

$$\Delta \dot{g}_{V(WP)} = \frac{c_F * \dot{m}_F}{c_F * \dot{m}_F - K_2} * \Delta \dot{g}_{R(WP)} + \frac{K_1}{c_F * \dot{m}_F - K_2} * \Delta \dot{g}_{A(WP)} \quad [\text{K}] \quad \text{GL.5}$$

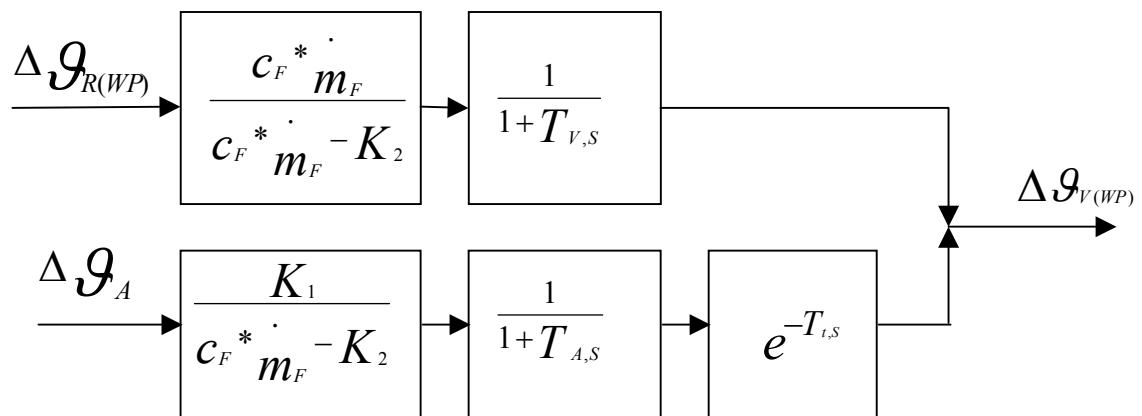
$\Delta \dot{g}_{V(WP)}$, $\Delta \dot{g}_{R(WP)}$ und $\Delta \dot{g}_{A(WP)}$ haben hierbei die Einheit [K] und der Faktor $c_F * \dot{m}_F$ die Einheit [kW / K].

Zur Visualisierung dieses Zusammenhangs dient folgendes Blockschaltbild:



Dieses Blockschaltbild beinhaltet aber noch nicht die Energiespeicherung durch die Bauteile (Verdampfer, Kondensator, Wärmetauscher). So entsteht unter realen Bedingungen ein zeitlicher Versatz zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße, welche laut Gruhle [GRU87] mit einem PT1-Verhalten beschrieben werden kann. Dies gilt für das Einwirken der Rücklauftemperatur $\Delta g_{R(WP)}$ auf die Vorlauftemperatur $\Delta g_{V(WP)}$ und genauso für die Beziehung zwischen Außentemperatur Δg_A und Vorlauftemperatur.

Durch Messungen ermittelte Gruhle die beiden Zeitkonstanten zu $T_{A,S} = T_{V,S} = 120$ Sekunden. Somit ergibt sich folgendes endgültiges Blockschaltbild für die Darstellung der Wärmepumpe:



Nähere Erläuterungen finden sich im Kapitel 8.

4.4 Versuchsaufbau

Zur Validierung des Modells der Wärmepumpe in CARNOT wurden mir die Messdaten von 2 Feldversuchsanlagen (FVA) von der Firma Viessmann zur Verfügung gestellt. Die Anlagenschemata sind in beiden Fällen im Hinblick auf die eingesetzten Komponenten sehr ähnlich. Nur wird im einen Fall (Holzmann) die Energie mit Hilfe einer Erdsonde dem Boden entzogen und im anderen Fall mit Hilfe eines Erdkollektors.

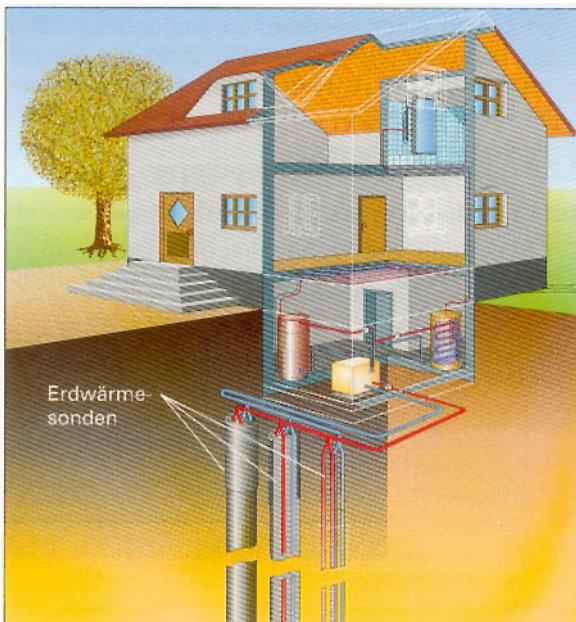


Abbildung 4.5: Wärmepumpe mit Erdsonden (FVA Holzmann)

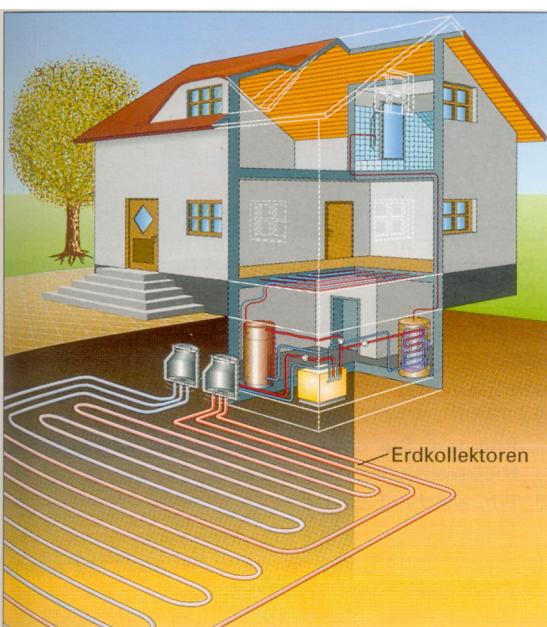


Abbildung 4.6: Wärmepumpen mit Erdkollektoren (FVA Leyhe)

FVA Holzmann

Bei der FVA Holzmann wird als Wärmeerzeuger eine Sole / Wasser-Wärmepumpe des Typs BW106 mit einer Heizleistung von 6,6 kW und einer Kälteleistung von 4,8 kW eingesetzt. Es ist eine witterungsgeführte Regelung des Typs CD 60 eingebaut. Der Solekreislauf ist hier als Erdsonde mit einer Bohrung von 96 m Tiefe ausgeführt. Der Boden besteht hauptsächlich aus Sandstein, und ab einer Tiefe von 25 m ist Grundwasser vorhanden. Die Rohrleitung des Solekreises ist in Bentonit eingeschlämmt und hat eine Dimension von 32 mm bei einer Wandstärke von 3 mm.

Die weiteren Anlagenkomponenten dieser Feldversuchsanlage sind folgende:

Brauchwasserkreis:

- Monovalenter Brauchwasserspeicher mit 350 l Inhalt, Typ: VertiCell mit el. Heizstab
- Plattenwärmetauscher zur Energieübergabe an den Brauchwasserkreis
- Zirkulationspumpe
- Solaranlage

Heizungskreis:

- Niedertemperatur-Radiatoren
- Pufferspeicher mit 600 l Inhalt
- Durchlauferhitzer

Der Heizungsvorlauf aus der Wärmepumpe wird über eine Ladepumpe und ein anschließendes 3-Wege-Ventil so geregelt, dass entweder der Heizungs- oder der Brauchwasserkreis angesteuert werden.

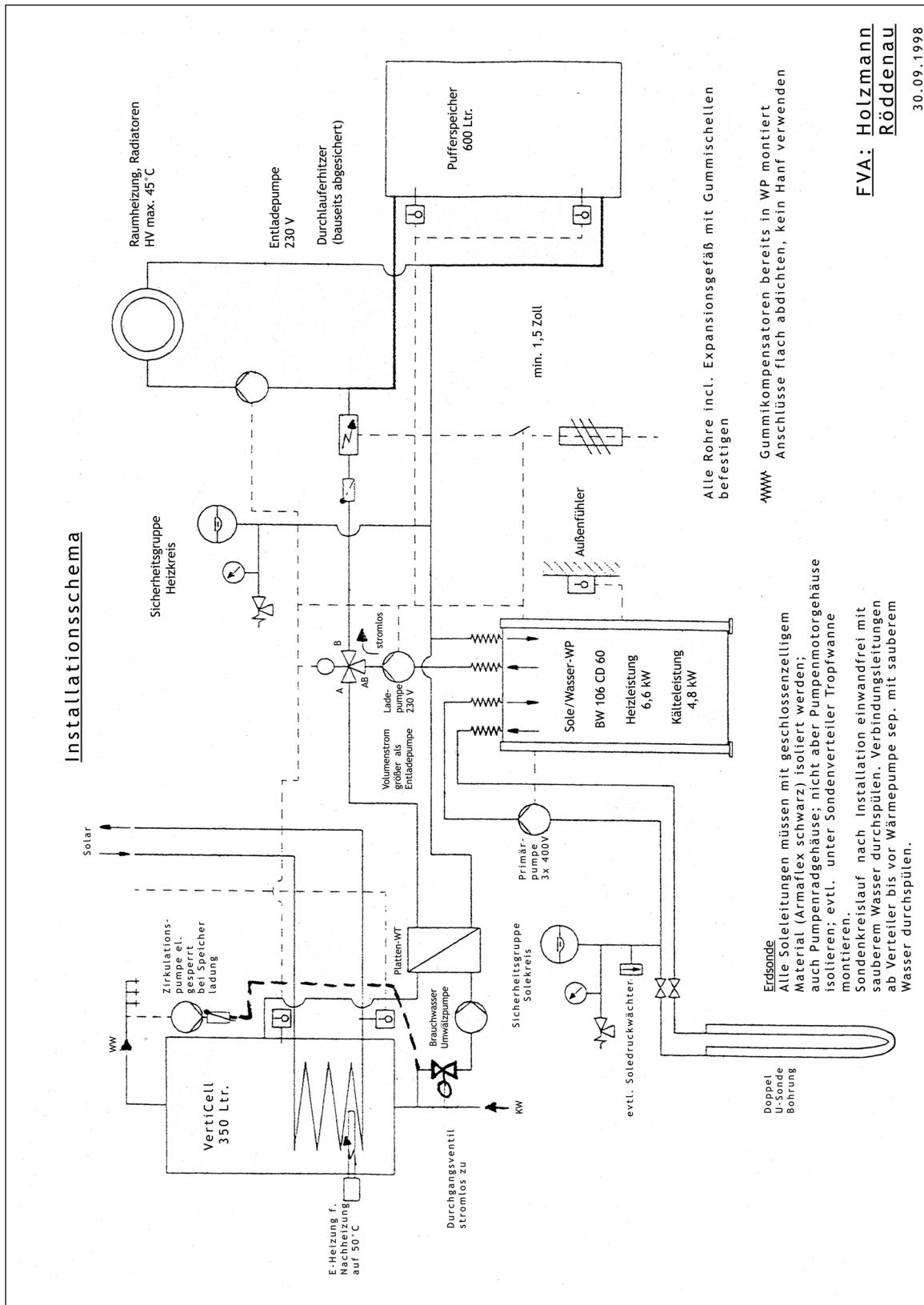


Abbildung 4.7: Installationsschema FVA Holzmann – Wärmepumpe mit Erdsonde

FVA Leyhe

Als Wärmeerzeuger wird hier ebenfalls eine Sole / Wasser-Wärmepumpe verwendet. Hier sind die Leistungen ein wenig größer. Die Heizleistung der Wärmepumpe des Typs BW110 beträgt 10,4 kW und die Kälteleistung 8,4 kW. Als Regelung ist hier ebenfalls eine CD 60 eingesetzt worden. Der prägnante Unterschied zur FVA Holzmann ist die Art der Wärmegewinnung aus dem Erdreich. Hier wird ein Erdreichkollektor eingesetzt, welcher aus 6 Kreisen á 100m Länge besteht. Die Rohre haben die gleiche Dimension wie bei der FVA Holzmann und liegen mit einem Verlegeabstand von 0,5 m in 1,5 m Tiefe. Der Boden ist sandig und feucht, und ab einer Tiefe von 1,5 m befindet sich Grundwasser.

Die Anlagenkomponenten sind folgende:

Brauchwasserkreis:

- Bivalenter Brauchwasserspeicher mit 300 l Inhalt, Typ: CeraCell mit el. Heizstab

Heizungskreis:

- Niedertemperatur-Radiatoren
- Pufferspeicher mit 600 l Inhalt
- Durchlauferhitzer

Der Heizungsvorlauf aus der Wärmepumpe wird über eine Ladepumpe und ein anschließendes 3-Wege-Ventil so geregelt, dass entweder der Heizungs- oder der Brauchwasserkreis angesteuert werden.

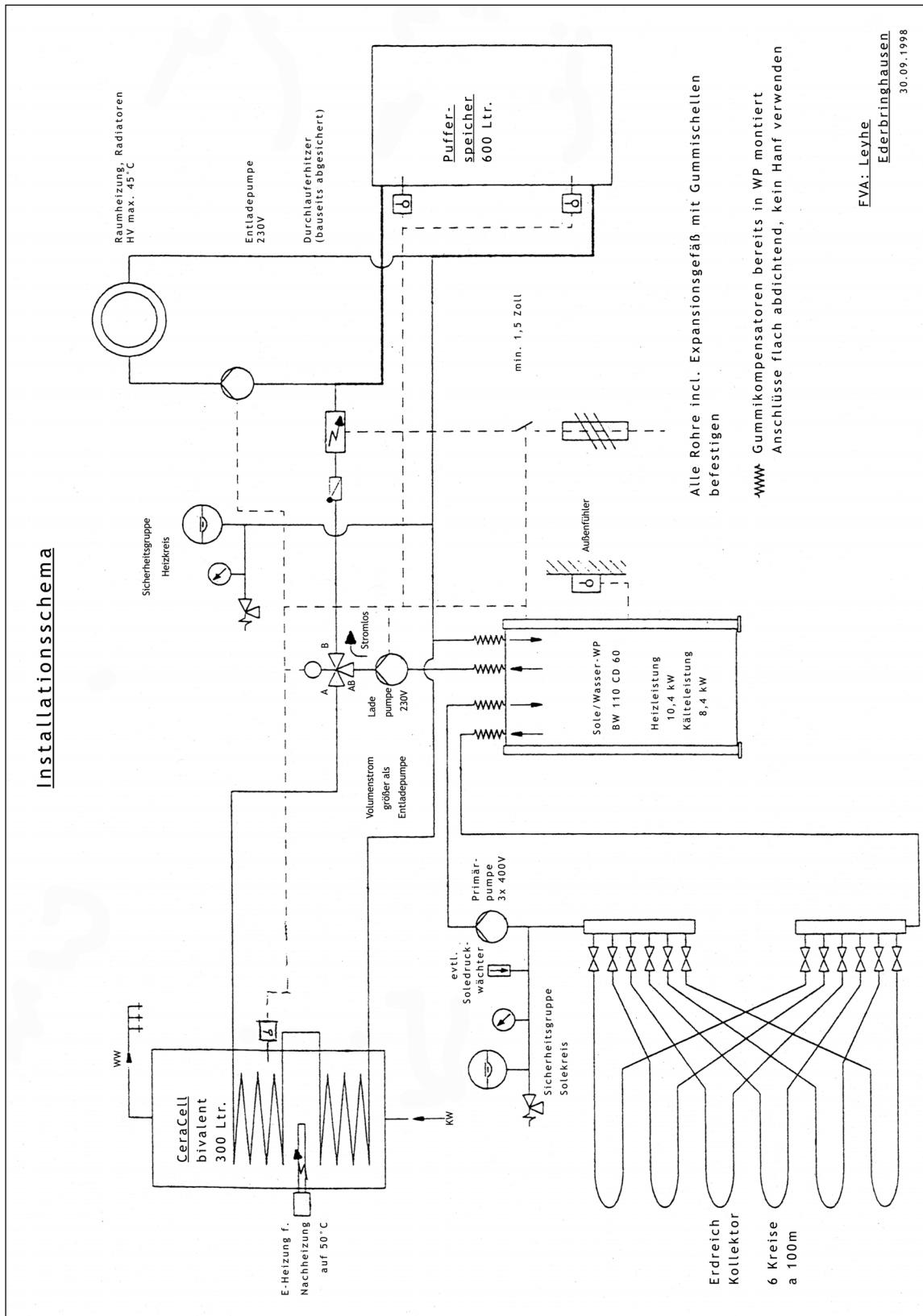


Abbildung 4.8: Installationsschema FVA Leyhe – Wärmepumpe mit Erdkollektoren

5 Modellierung und Simulation

5.1 Beschreibung der Modellkomponenten in MATLAB

In jedem Modell wird die Eingabequelle der Daten benötigt. Dies geschieht in MATLAB durch ein Objekt namens „From Workspace“. Die Funktion, die hinter dem Objekt steht, liest die Matrix (hier: X270700) aus der Arbeitsumgebung ein. Die Daten werden vorher mit Hilfe der m-Funktion „`losxxxxx_x`“ (z.B. `los270700_H`) im MATLAB-Workspace erzeugt.



Demux

Der „Demux“ (senkrechter Balken) bekommt die Matrix „From Workspace“ und stellt dem Modell die einzelnen Kanäle zur Verfügung. Diese Kanäle resultieren aus der Matrix und müssen dem Demux mitgeteilt werden. Das vorhandene Modell hat 30 Demux-Ausgänge, wovon der erste immer die Zeit in Sekunden ausgibt.

Zwischen den Blöcken werden Pfeile zur Informationsweitergabe platziert. Hierbei ist die Pfeilrichtung der Datenrichtung gleichzusetzen. Der Pfeil kann unterschiedliche Informationen enthalten – er gibt diese Informationen nur von einem zum anderen Bauteil weiter.

Der Thermohydraulische Vektor

Der wichtigste Baustein in den meisten CARNOT Heizungsmodellen ist der ThermoHydraulische Vektor oder auch THV genannt. Er hat einen Eingang für die Temperatur T und einen für den Massenstrom \dot{m} . Im Modell ist immer auf die Einhaltung der SI-Einheiten zu achten. Die anderen vier Informationen werden als

stationär betrachtet und nach einem Doppelklick auf das Symbol eingetragen. Hier steht eine benutzerfreundliche Eingabemaske zur Verfügung:

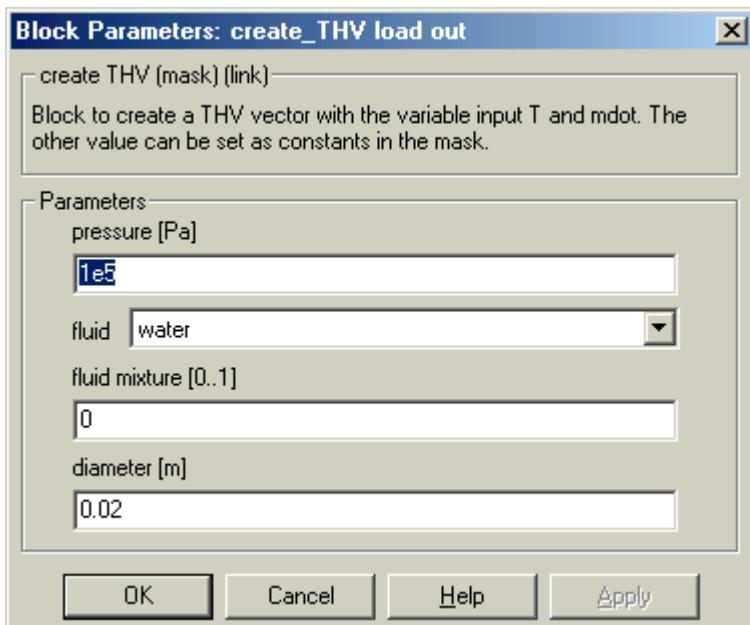
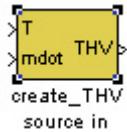


Abbildung 5.1: Parametereingabe des THV

Druck (pressure), Flüssigkeitstyp (fluid) wie Wasser, Wasser/Glycol-Gemisch, Öl, Flüssigkeits-Mischungsverhältnis (fluid mixture) (bei Wasser/Glycol) und Rohrdurchmesser (diameter) werden hier eingetragen, um den THV zu definieren.

Density

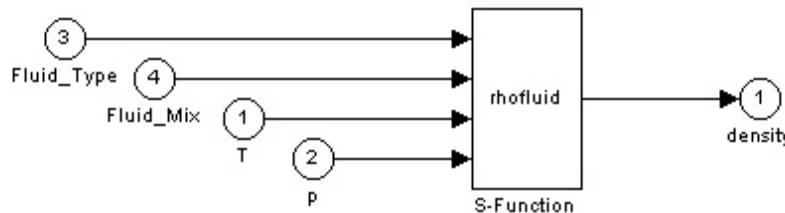
Meist steht der Volumenstrom mdot aus Messungen nicht in den SI-Basiseinheiten zur Verfügung. Dies ist auf die üblichen Messgeräte aus der Heiz- und Klimatechnik zurückzuführen, wo häufig der Volumenstrom in Liter pro Minute oder Liter pro Stunde gemessen wird. Die SI-Einheit für den Massenstrom ist aber [kg / s]. Hier gibt es in CARNOT die Möglichkeit der Umrechnung.

Zunächst muss hierfür die Dichte „density“ des Mediums (Flüssigkeit) berechnet werden:

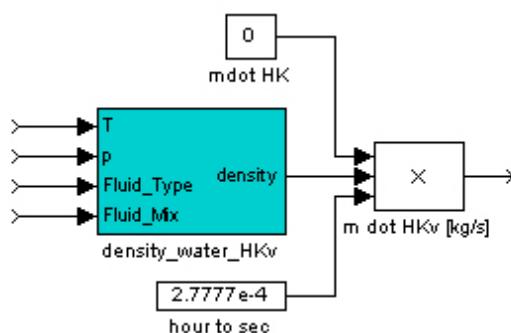
```
>T
>p
>Fluid_Type density
>Fluid_Mix
density_water_HKv
```

Als Eingänge sind Temperatur, Druck, Flüssigkeitstyp und Flüssigkeitsmischungsverhältnis vorhanden.

Wirft man einen Blick unter die Maske erscheint die S-Funktion „rhofluid“, in der die Dichte berechnet wird:

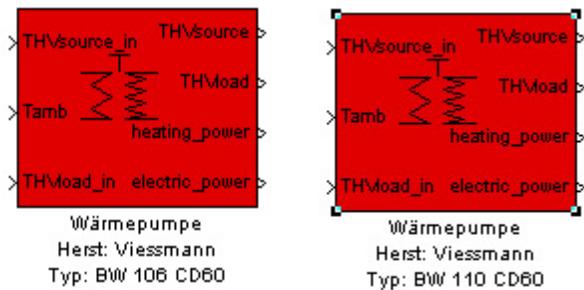


Die Dichte ist nur der erste Teil zur Umrechnung vom Volumenstrom [l / h] zum Massenstrom [kg / s]. Der Zweite ist die Umrechnung der Zeit in die richtige Dimension. Also von Minute auf Sekunde. Diese Konstante $1/3600 = 2,77 \cdot 10^{-4}$, die Dichte und der ursprüngliche Wert des Massenstroms bilden dann den korrekten Massenstrom in der SI-Basiseinheit.

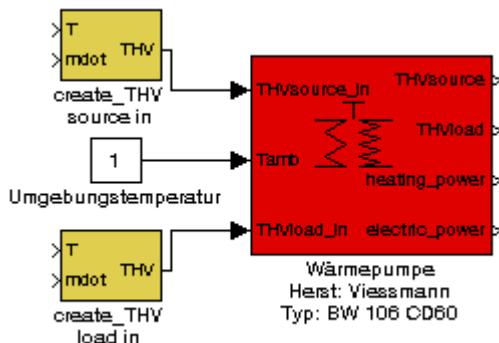


Die Wärmepumpe

Für die FVA Holzmann und die FVA Leyhe werden zwei unterschiedliche Modelle aufgebaut, da sich die Leistungsdaten der beiden Wärmepumpen unterscheiden.



Die Eingänge sind jeweils die Umgebungstemperatur und die THV's der Rücklaufanschlüsse der Sole und des Heizkreises.

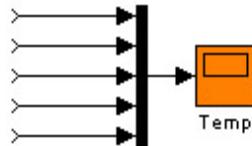


Die Ausgänge sind die THV's der Vorlaufanschlüsse für Sole und Heizkreis, die elektrische Leistung der Wärmepumpe und die Heizleistung der Wärmepumpe.

Um nun die Messdaten mit der Simulation vergleichen zu können, wird aus den THV-Ausgängen mit Hilfe des „vector selector“ eine Einheit selektiert – und zwar die Temperatur.

Diese wird mit der Temperatur aus den Messwerten verglichen.

Um alle Werte in einem Diagramm darstellen zu können, wird der Temperaturanzeige ein „MUX“ vorangestellt, der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie den Volumenstrom der Messung und der Simulation aufnimmt und der Anzeige zur Verfügung stellt.



heatpump

Das Symbol „heatpump“ ist eine so genannte Blackbox, hinter der sich die komplexe Wirkungsweise einer Wärmepumpe verbirgt. Mit dem Menüpunkt „Look under mask“ erscheint das Modell, in dem sich weitere Blackboxen wie das thermodynamische Modell „thermodynamic_model“, Soleaustrittstemperatur „Tcold_out“, quadratischer Druckverlust „quadratic pressure_drop“ und die elektrische Leistung als Funktion von Heizkreistemperatur-Vorlauf und Soleenintrittstemperatur „P_el as function of Thot_out and Tcold_in“ befinden.

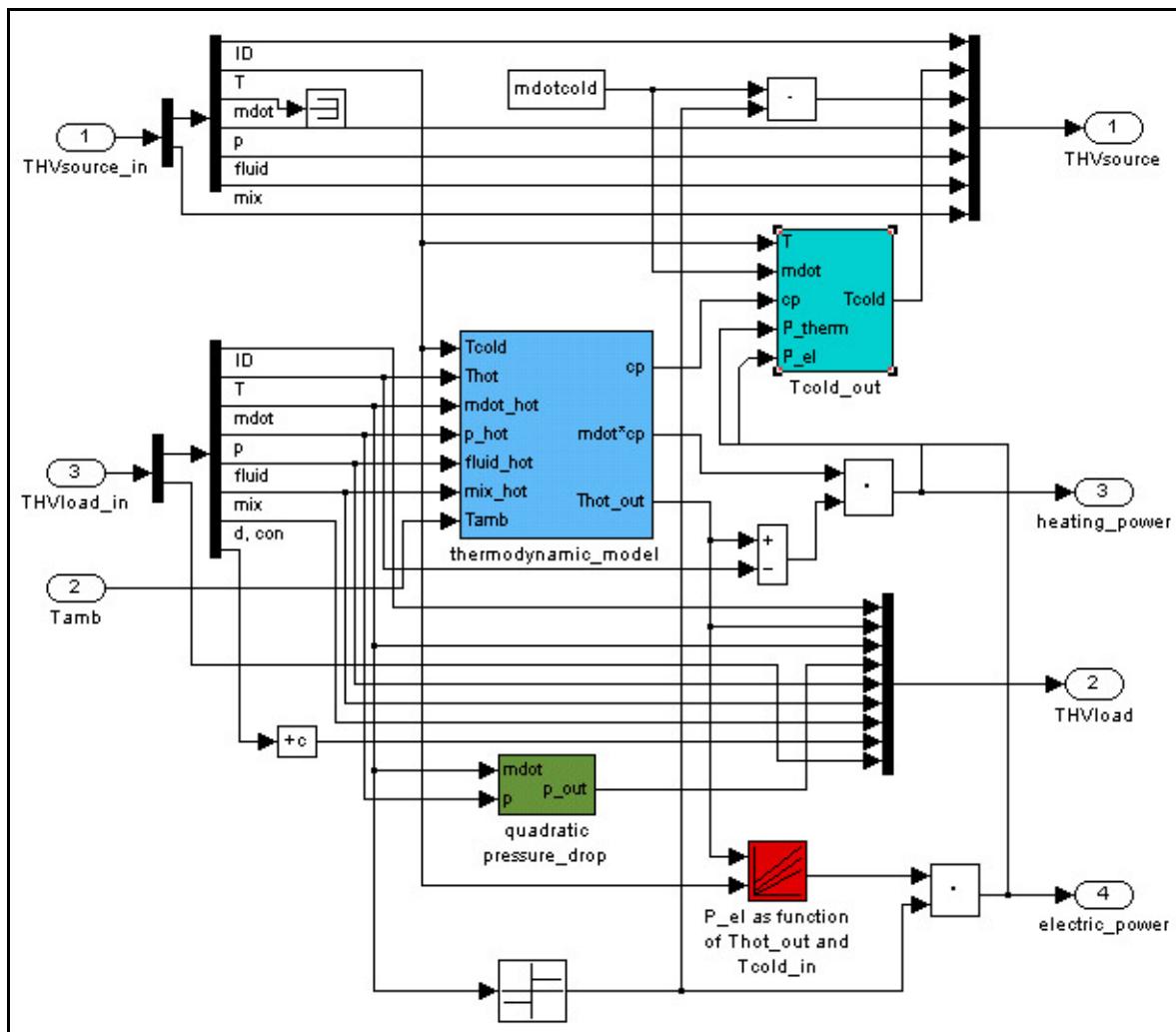
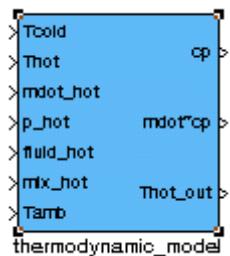


Abbildung 5.2: Das thermodynamische Modell der Wärmepumpe

Zunächst das „thermodynamic_model“

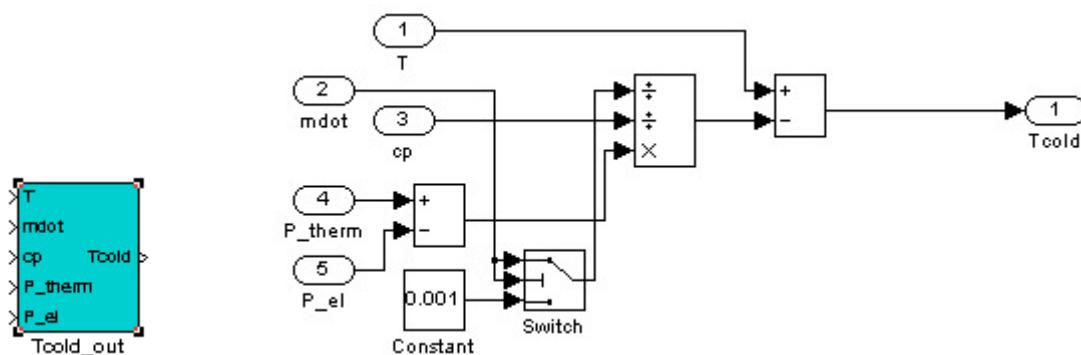
Dieses Modell hat sieben Eingänge, von denen fünf direkt aus dem THV des Heizkreis-Rücklaufes übergeben werden. Dazu kommt die Umgebungstemperatur Tamb und die Solerücklauftemperatur. Aus diesen Informationen generiert die S-Funktion „thermodynamic_model“ die Wärmekapazität c_p , das Produkt aus Wärmekapazität und Massenstrom (den Wärmekapazitätsstrom) und die Heizkreisvorlauftemperatur. Wie das im Einzelnen geschieht wird aufgrund der Übersichtlichkeit später geschildert.



T_cold_out

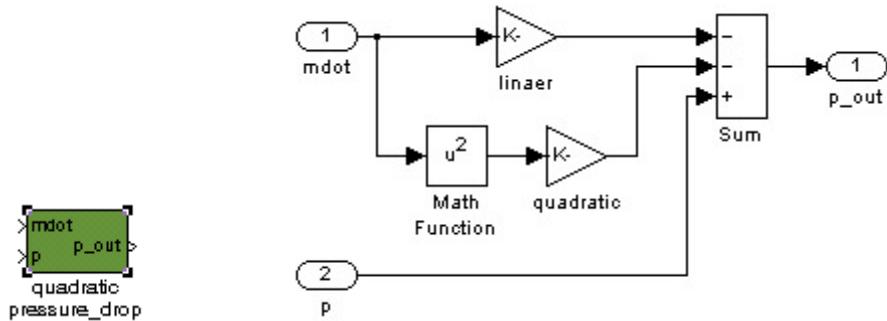
Hinter dieser Blackbox verbirgt sich die nach der Temperatur umgestellte Gleichung der Wärmepumpenleistung.

$$P_{wp} = (P_{therm} - P_{el}) = mdot * cp * (T - T_{cold})$$



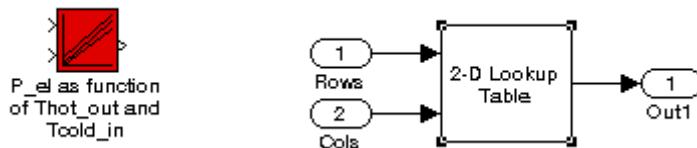
quadratic pressure_drop

Der quadratische Druckverlust beschreibt den Druckverlust in Folge des Massenstroms (dynamischer Druckverlust infolge Rohreibung).



P_el as function of Thot_out and Tcold_in

Diese Blackbox fügt die Spalten und Zeilen der elektrischen Leistung der Wärmepumpenkennlinie, die Anhand von Zahlenkolonnen in das Modell eingegeben werden müssen, zu einer Matrix zusammen.



Hierfür steht zur Vereinfachung eine grafische Eingabeoberfläche zur Verfügung:

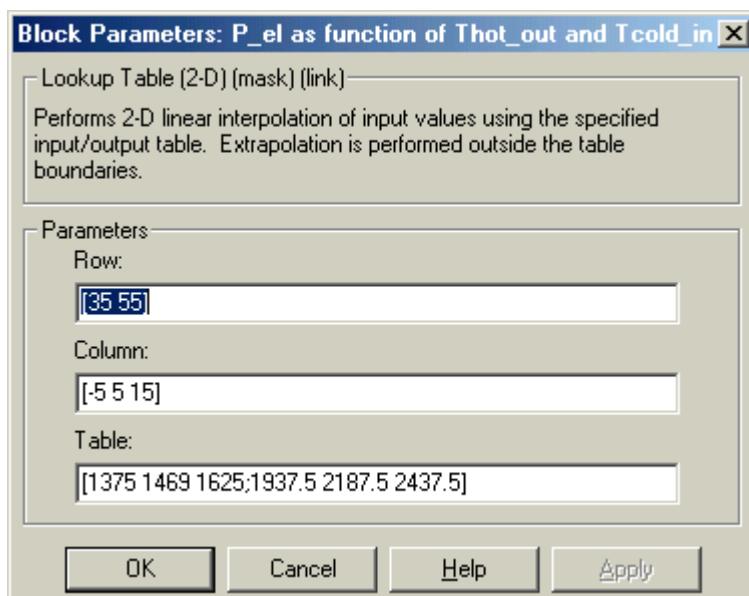


Abbildung 5.3: Blockparameter “P_el as function of Thot_out and Tcold_in”

5.2 Aufbereitung der Messdaten

Das so genannte „Pre-Processing“ ist das Vorbereiten der Daten zur anschließenden Simulation. Dieser Vorgang steht am Anfang einer jeden Simulation.

Die Messwerte der Firma Viessmann zeigten sich nach näherem Hinsehen zu ungenau, als dass man später die ganze Anlage mit allen einzelnen Komponenten exakt simulieren könnte.

Nach näherer Betrachtung der Messwerte stellte sich heraus, dass nur die Simulation der Wärmepumpe möglich ist, da weder Benutzer (Verbrauchs-) Profile bekannt sind, noch Aussagen über Kollektorkreis und Heizkreis aufgrund fehlender Messstellen getroffen werden können.

Die Daten mussten für das Pre-Processing folgendermaßen aufbereitet werden:

- Die Datei darf keinen Text oder Semikolons enthalten.
- Überflüssige Messkanäle sollten entfernt werden, da diese nur „Nullen“ enthielten.
- Die Dateien aller Sensoren (insgesamt acht Dateien pro Tag) mussten zusammengeführt werden, sodass eine Datei für jeden Messtag entstand.
- Die erste Spalte muss die Zeit in Sekunden enthalten.

Um diese Kriterien erfüllen zu können, wurden von mir folgende MATLAB Scripts geschrieben:

m-Script 1: „prepro1.m“

```
% Dieses m-Script sondiert alle überflüssigen Zeichen aus den Originaldateien und fügt
% sie zu einer vorläufigen Tagesdatei zusammen
for j = 1:12 % Anzahl der Tagesdateien pro Monat
    datename = {'010100' '020100' '030100' '040100' '110100' '120100' '130100' '140100'
    '150100' '160100' '170100' '180100'}; % Variablendefinition
    var1 = datename(j);
    for i=1:4 % Diese 4 Dateien enthalten die
        sensorname = {'1' '4' '5' '7'}; % benötigten Informationen
        name = strcat(var1,'_',sensorname(i),'.sol'); % name wird zu Datei "010100_1.sol"
        zusammengesetzt % Einlesen des Inhaltes der Datei
        read = fopen(char(name),'r');
        if (read < 0) % Fehlermeldung, wenn Datei keine Daten
            disp('Fehler beim öffnen der Datei') % enthält
            end % Bildschirmausgabe des Fehlers
            for n = 1:2 % Für die ersten 2 Zeilen in der
                line = fgetl(read); % Datendatei gilt:
                linenew = strrep(line,';',' ');
                linenew = strcat('% ',linenew); % 1. Einlesen
                testname = strrep(char(name),'.sol','.dat'); % 2. Semikolon durch Leerzeichen
                fid2 = fopen(testname,'a'); % ersetzen
                fprintf(fid2,'%s \n',linenew); % 3. Zeilen mit "%" kommentieren
                linenum = n; % 4. Dateiendung "sol" durch "dat"
                end % 5. Hilfsvariable fid2 entspricht der
                    % neuen Datei
                    while (linenum < 1438) % So lange die Zeilenanzahl kleiner als
                        line = fgetl(read); % 1438 ist, gilt
                        linenew = strrep(line,';',' ');
                        linenew = strrep(linenew,',','.');
                        fprintf(fid2,'%s \n',linenew); % 1. Einlesen
                        linenum = linenum + 1; % 2. Semikolon durch Leerzeichen
                        end % 3. Komma durch Punkt ersetzen
                            % 4. Alles in eine neue Zeile schreiben
                            % 5. Variable linenum um 1 erhöhen
                            % end while
                            fclose(fid2);
                            B = load(testname);
                            A(:,(((i-1)*19)+1):(i*19)) = B(:,2:20);
                            end % end for loop sensornames
                            matrix = [B(:,1) A];
                            filename = strcat(datename,'.dat');
                            save(char(filename(j)), 'matrix', '-ascii');
                            end % aus dem ersten Teil von B und der
                                % Rest von A wird die Matrix gebildet
                                % Neuer Dateiname wird gebildet
                                % und gespeichert
                                % end for loop datenamen
                                fclose(read);
```

m-Script 2: „prepro2.m“

```
% Dieses m-Script lädt die vorläufigen Tagesdateien und löscht die überflüssigen
% Sensorinformationen. Es rechnet auch die erste Spalte von Stunden in Sekunden um
% Das Ergebnis ist eine optimierte Datendatei, die von MATLAB eingelesen werden kann
%
load 030300.dat                                % Tagesdatei ohne Semikolon und ohne
                                                % die ersten 2 Zeilen
cd('D:\Diplom\origin~1\Messwe~1\DATEN');      % Pfad der vorläufigen Tagesdatei
comm = 'dir';                                    % Der Variable comm wird der Inhalt
arg = '*.dat';                                  % des Pfades zugeordnet
filenames=feval(comm,arg);                      % arg ist das Argument
                                                % Zuordnung
for i = 1:length(filenames)                     % Von 1 bis Zeilenende
    load(filenames(i).name)                      % 1. Zeile einlesen
    name = strrep(filenames(i).name,'.', ' ')    % 2. Den Punkt im Namen durch ein
    name = strtok(name)                          % Leerzeichen ersetzen
                                                % 3. Die neue Datei zur Verfügung
                                                % stellen
    remainder1 = strcat('x',name,'(:,7:21)')     % remainder1 beinhaltet Spalten 7 bis
    remainder1 = eval(remainder1);                 % 21
    remainder2 = strcat('x',name,'(:,55:66)')     % remainder2 beinhaltet Spalten 55 bis
    remainder2 = eval(remainder2);                 % 66
    remainder3 = strcat('x',name,'(:,83:86)')     % remainder1 beinhaltet Spalten 83 bis
    remainder3 = eval(remainder3);                 % 86
    time = strcat('x',name,'(:,1)');              % variable time wird die erste Spalte
    time = eval(time);                           % time wird in eine Matrix gewandelt
    b = time.*3600;                             % Die Stundenwerte werden zu Sekunden
                                                % Matrix D wird zusammengesetzt
    d = [b remainder1 remainder2 remainder3];      % D wird als ASCII in eine Neue Datei
    save(filenames(i).name,'d','ascii');          % gespeichert
end
```

Das Ergebnis waren 192 Dateien, die nun zur Simulation der Wärmepumpe verwendet werden konnten.

5.3 Simulationsanleitung Wärmepumpe

Damit Hersteller ihre Wärmepumpen leichter testen können, ist es vorteilhaft, die benötigten Daten und die Schritte bis zur fertigen Simulation aufzulisten.

Benötigt werden folgende Daten:

- Leistungsdaten (Nenn-Wärmeleistung, Kälteleistung und elektr. Leistungsaufnahme)
- Heizleistung, Kälteleistung und elektrische Leistung [W] in einem Leistungsdiagramm mit unterschiedlichen Betriebspunkten der Soletemperatur [°C]
- Massenstrom [kg/s] und Inhalt [kg] Solekreis (Kalte Seite)
- Inhalt [kg] Heizkreis (heiße Seite)
- Druckverlust Heizkreis [Pa]
- Die Zeitkonstanten der heißen und der kalten Seite werden zunächst mit 120 Sekunden vorgegeben. Die vollständige Berechnung erfolgt in Kapitel 5.4.

Diese Daten können aus den Herstellerdatenblättern [VIE99] entnommen werden, da diese zur Spezifizierung der Wärmepumpen (DIN 8900) dienen. Anbei das Datenblatt der Firma Viessmann für die Wärmepumpe des Typs BW 106 der FVA Holzmann und des Typs BW 110 der FVA Leyhe:

Vitocal 300 (einstufig) Sole/Wasser-Wärmepumpe Technische Angaben							
Technische Angaben							
		Holzmann	Leyhe				
Vitocal 300 (einstufig)	Typ	BW 104	BW 106	BW 108	BW 110	BW 113	BW 116
Leistungsdaten							
Nenn-Wärmeleistung	kW	4,8	6,4	8,3	10,8	14,0	16,3
Betriebspunkt B0/W35*1							
gemäß EN 255							
Kälteleistung	kW	3,7	5,0	6,5	8,4	11,0	12,7
Elektr. Leistungsaufnahme	kW	1,1	1,4	1,8	2,4	3,0	3,6
Leistungszahl ε (COP)		4,36	4,57	4,61	4,50	4,67	4,53
Sole (primär)							
Inhalt	Liter	1,7	2,3	2,8	3,7	4,7	4,7
Durchsatz	Liter/h	1150	1600	2100	2700	3600	3900
Durchflußwiderstand	mbar	90	90	90	90	90	105
max. Eintrittstemperatur	°C	25	25	25	25	25	25
min. Eintrittstemperatur	°C	-5	-5	-5	-5	-5	-5
Heizwasser (sekundär)							
Inhalt	Liter	1,4	1,6	2,2	2,7	3,3	3,3
Durchsatz	Liter/h	420	530	700	950	1200	1400
Durchflußwiderstand	mbar	40	40	40	40	40	60
max. Vorlauftemperatur	°C	55	55	55	55	55	55
Elektrische Werte							
Wärmepumpe							
Nennspannung				3/N/PE ~ 400 V/50 Hz			
Nennstrom (max.)	A	3,9	4,8	6,6	7,9	10,0	13,3
Anlaufstrom	A	19	27	20*2	30*2	30*2	35*2
Anlaufstrom	A	22,0	31,0	43,5	51,0	59,5	70,5
(bei blockiertem Rotor)							
Absicherung (träge)	A	3 x 10		3 x 16			3 x 20
Schutzart				IP 20			
Steuerstromkreis							
Nennspannung				230 V~ 50 Hz			
Absicherung (intern)	A			6,3			
Kältekreis							
Arbeitsmittel				R 407C			
Füllmenge	kg	1,7	1,9	2,2	2,6	3,1	3,4
Verdichter	Typ			Scroll	Vollhermetik		
Abmessungen							
Gesamtlänge	mm	727	727	727	727	727	727
Gesamtbreite	mm	610	610	610	610	610	610
Gesamthöhe	mm	970	970	970	970	970	970
Zul. Betriebsüberdruck							
Heizkreis (primär)	bar	4	4	4	4	4	4
Heizkreis (sekundär)	bar	4	4	4	4	4	4
Anschlüsse							
Primärvor- und -rücklauf	R (innen)	1	1	1	1 1/4	1 1/4	1 1/4
Heizungsvor- und -rücklauf	R (innen)	1	1	1	1	1	1
Gewicht	kg	105	110	120	140	160	165

*1Betriebspunkt: B0=Soleeintrittstemperatur 0°C / W35=Heizwasseraustrittstemperatur 35 °C.
Weitere Betriebspunkte siehe Leistungsdiagramme.
*2Mit Anlaufstrombegrenzer.

Abbildung 5.4 : Technische Angaben zu den Wärmepumpen

Die erforderlichen Werte können mit einem Doppelklick auf das Modell der Wärmepumpe leicht in die Eingabemaske eingetragen werden - siehe Abbildung 5.5.

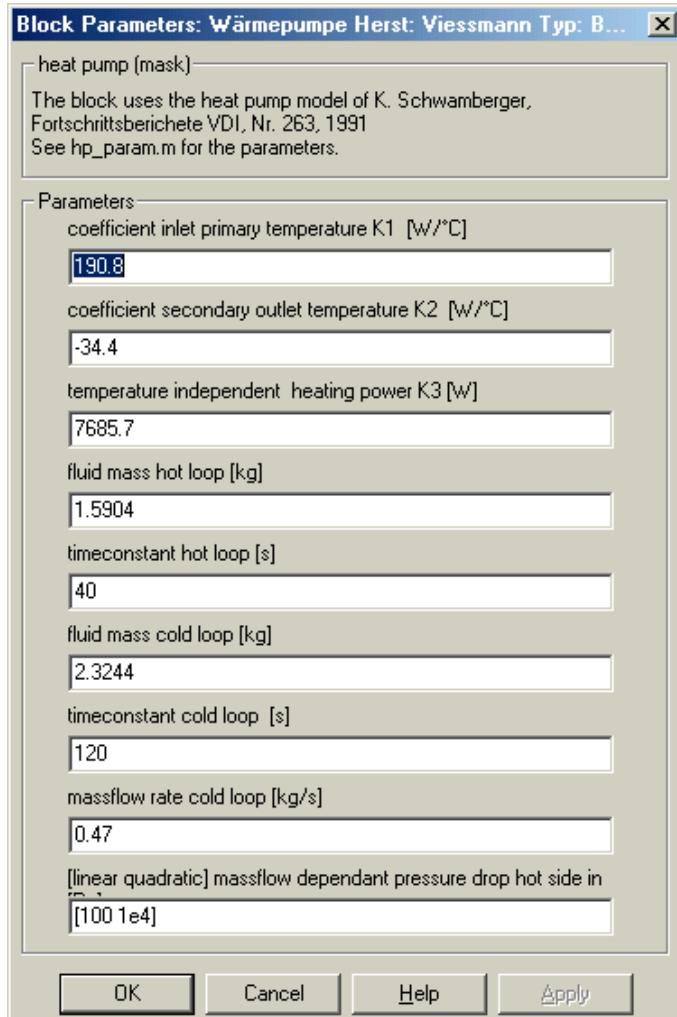


Abbildung 5.5: Blockparameter der Wärmepumpe

Die Konstanten K1, K2 und K3 werden durch das m-Script „HP_PARAM“ ermittelt: HP_PARAM berechnet die Wärmepumpenparameter K(1), K(2) und K(3) des Simulink® CARNOT-Tools „heatpump“. Dieses Modell arbeitet mit einer linearen Charakteristik, welches die Heizleistung nur am höchsten und niedrigsten Punkt betrachtet. Die anderen Werte werden interpoliert.

power_tamb_tout :

Dies ist eine Matrix mit 3 Spalten, welche die relevanten Daten des Leistungsdiagramms der Wärmepumpe enthält:

Das erste Element ist die Heizleistung

qdot = power_tripel(:,1);

Zweites Element ist die zugehörige Umgebungstemperatur - in diesem Fall die Soletemperatur

```
tamb = power_tripel(:,2);
```

Das dritte Element ist die zugehörige Vorlauftemperatur des Heizkreises
tout= power_tripel(:,3);

Im MATLAB Workspace wird die Kurve der Heizleistung für 55, 45, 35 °C Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Soletemperaturen -5, 5, 15 °C eingetragen (hier Beispiel für Wärmepumpe FVA Leyhe):

```
P1 = [8500 -5 55;11500 5 55;14438 15 55]  
P2 = [8825 -5 45;12000 5 45;15125 15 45]  
P3 = [9188 -5 35;12500 5 35;15875 15 35]
```

Es wird die Matrix gebildet:

```
power_tin_tout = [P1;P2;P3]
```

Nun werden die Konstanten der Wärmepumpe ermittelt:

```
K =hp_param(power_tin_tout)
```

```
K =
```

```
1.0e+003 *  
0.0315 -0.0052 1.2761
```

K1 = 315 W / °C

K2 = -52 W / °C

K3 = 1276,1 W

Sind die Daten korrekt in den SI-Einheiten eingetragen, wird die Eingabemaske geschlossen.

Zur Angabe der elektrischen Leistung der Wärmepumpe wird mit Hilfe des Kontextmenüs des Wärmepumpenmodells (rechte Maustaste auf das Modell) und der Auswahl „Look under Mask“ die Kurve der elektrischen Leistung in Abhängigkeit der Soletemperatur bei zwei verschiedenen Heitzvorlauftemperaturen eingetragen.

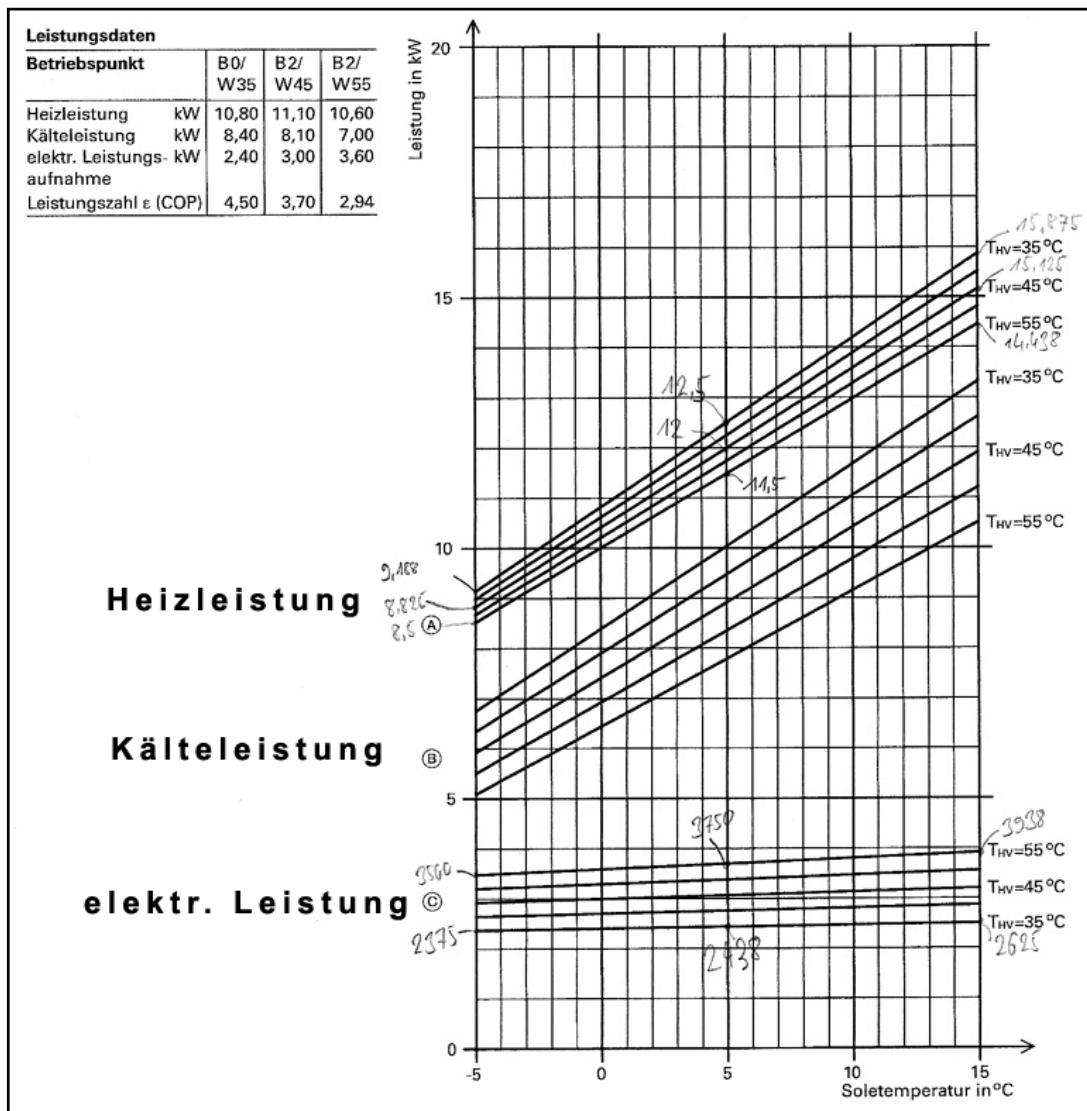


Abbildung 5.6: Leistungsdiagramm der Wärmepumpe FVA Leyhe

Die Eingabemaske erscheint, wenn man das Untermodell „P_el as function of Thot_out and Tcold_in“ mit einem Doppelklick öffnet:

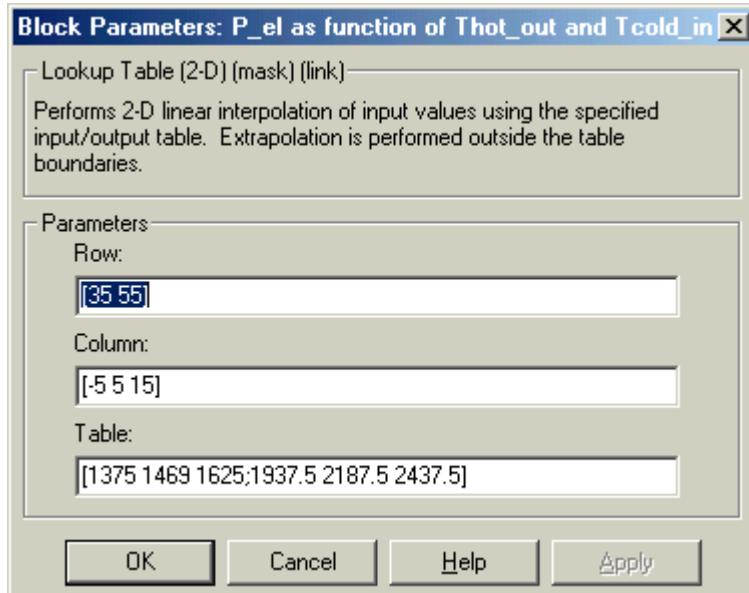


Abbildung 5.7 : Block Parametereingabe

Sind diese Eingaben eingetragen, kann die Simulation der Wärmepumpe erfolgen.

5.4 Betrachtung der Zeitkonstanten

Das Modell der Wärmepumpe nach Gruhle [GRU87] betrachtet die Zeitkonstanten der Wärmepumpe, also die Zeit, nach der die Masse der Wärmepumpe aufgrund der Wärmekapazität aufgeheizt ist, als konstant mit 120 Sekunden. Dieser Ansatz scheint sehr grob zu sein und wurde deshalb überprüft.

Mit Hilfe der zwei Minimierungsfunktionen „fminsearch“ und „EPO“ wurde entsprechend versucht die Zeitkonstanten der hier verwendeten Wärmepumpen exakt zu bestimmen. Hierfür muss das vorhandene Modell der Wärmepumpe (siehe Seite 42, Abbildung 5.10) so erweitert werden, dass eine Fehlerbestimmung möglich ist. In Abbildung 5.8 ist die Modellerweiterung zu erkennen. Der Fehler ist die Differenz der simulierten und der gemessenen Temperaturen, welche im Block „temperaturdifference1“ berechnet wird. Dieser wird jeweils für den Heizkreis und – wie hier im Bild – für den Solekreis berechnet.

Da aus den Simulationsergebnissen zu erkennen ist, dass die Soletemperatur aufgrund eines Messfehlers unter 0°C abgeschnitten wurde, wird dieser Fehler bei der Fehlerermittlung durch die Funktion des Blocks „integrate from t=starttime“ eliminiert. Dieser Temperaturbereich und die zugehörige Simulationszeit werden

einfach ausgeblendet. Mit Hilfe des Blocks „Select temp1“ wird nur die Temperatur des Thermohydraulichem Vektors „THV Source from heatpump“ selektiert, welche als Stellglied dient. Der Basiswert Temperaturdifferenz wird nur bei einer Temperatur größer 0°C durchgelassen.

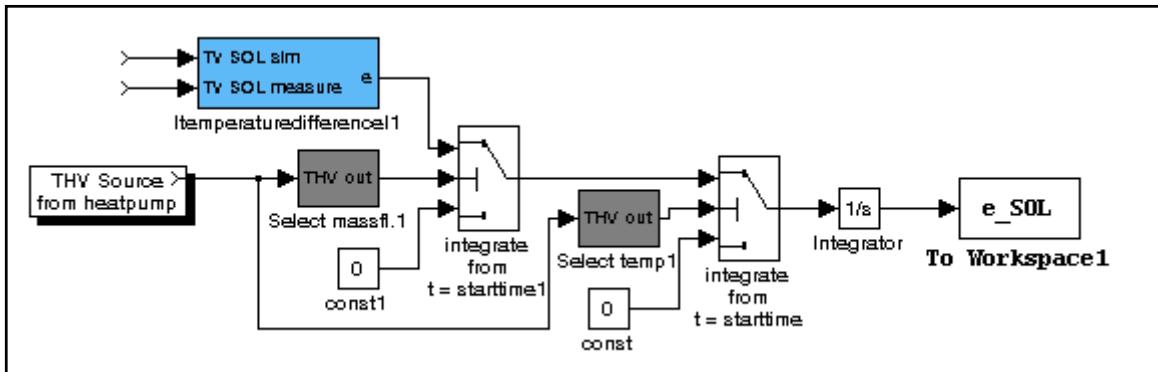


Abbildung 5.8 : Modellerweiterung zur Fehlerberechnung der Soletemperaturen

Des Weiteren wird auch nur der Zeitraum betrachtet, an dem ein tatsächlicher Massenstrom vorhanden ist. Auch hier wird nur ein Wert des THV benötigt. Stellglied ist hier der Massenstrom. Ist dieser größer 0 kg/s , so wird der Basiswert Temperaturdifferenz hindurch gelassen.

Wenn beide Bedingungen erfüllt sind, wird der Wert der Temperaturdifferenz noch integriert und dann in den Workspace als relativer Fehler e_{SOL} ausgegeben.

Das Gleiche geschieht auch bei der Fehlerberechnung des Heizkreises, nur dass hier nicht die Temperatur betrachtet werden muss, da diese nicht unter 0 °C fällt. Der relative Fehler ist hier mit e_{HK} bezeichnet.

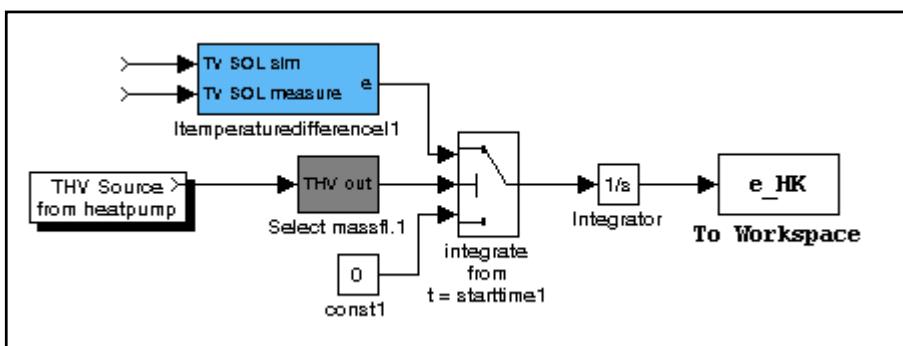


Abbildung 5.9 : Modellerweiterung zur Fehlerberechnung der Heizkreistemp.

Nun stehen die beiden Fehler e_SOL und e_HK zur weiteren Benutzung durch die Minimierungsfunktionen „fminsearch“ und „EPO“ in MATLAB zur Verfügung.

fminsearch

Diese in MATLAB enthaltene Funktion bestimmt das lokale Minimum für die gegebene Funktion innerhalb vorgegebener Grenzen.

Hier: $p = \text{fminsearch}(F, x_0, [])$

F ist die Optimierungsfunktion „wp_opt.m“ in der die Parameter t_hotside, t_coldside, e_SOL, e_HK und das optimierte Modell eingetragen werden.

x0 ist der Anfangswert, um den das Minimum gefunden werden soll - in unserem Fall 120 Sekunden.

Mit einem selbsterstellten kleinen MATLAB-Script wird das Aufrufen der Optimierung, die Festlegung der Randbedingungen, das Laden der Datei und des Modells mit anschliessender Suche des geringsten Fehlers mit einem Aufruf erledigt:

MATLAB-Script „start_wpopt.m“

```
% Deklaration als globale Variable, damit sie von allen Skripten
% aus sichtbar sind
global t_hotside t_coldside x270700 num mdot

% Zählvariable zur Ausgabe des Fortschritts der Optimierung
num = 1;

% Laden von Eingangsgrößen für die Optimierung
load('270700.dat')
starttime = x270700(1,1);
stoptime = x270700(length(x270700),1);

% Definition der Zielfunktion (in diesem Fall m-function) als 'inline'
F = inline('wp_opt(p)');

% Setzen der Randbedingungen
x0= [120 120]

% Aufruf des Matlab-Optimierungsalgoritmus mit Parametervektor p
% als Eingangswert für die Simulation
p = fminsearch(F,x0,[])
```

Die Funktion wp_opt(p) sieht wie folgt aus:

```
% m-function: e - Rückgabewert der Zielfunktion an den Optimierungsalgorithmus p -
% Parametervektor
function e = wp_opt(p);

% Deklaration der Parameter als globale Variable, damit sie von überall gelesen werden
% können
global t_coldside t_hotside mdot starttime stoptime x270700 num

% Zuordnung der Parameter zu den Variablennamen
t_hotside = p(1)
t_coldside = p(2)

% Aufruf der Simulation
sim('dipl_wp8_opt2');

num = num + 1

% Rückgabe des Zielfunktionswertes an den Optimierungsalgorithmus
e = abs(e_SOL+e_HK)
```

fminsearch variiert die Variablen t_hotside und t_coldside so, dass der gesamte Fehler e, der sich aus der absoluten Summe von e_SOL und e_HK ergibt, minimal ist. Fminsearch wird durch den Aufruf des MATLAB-Scripts „start_wpopt“ im MATLAB-Workspace gestartet. Weitere Details zur Funktion fminsearch sind im Anhang Kapitel 8.2 zu finden.

Als Ergebnis ergibt sich bei der FVA Holzmann nach num=267 Durchläufen und einem Gesamtfehler von $e=2,41 \cdot 10^5$ folgendes:

t_hotside = 235,31 s
 t_coldside = -11,25 s

Auf die FVA Leyhe wurde fmsearch ebenfalls angewandt, und es stellten sich folgende Ergebnisse ein (num = 291; $e = 4,55 \cdot 10^4$):

t_hotside = $-2,78 \cdot 10^6$ s
 t_coldside = $2,35 \cdot 10^6$ s

Diese Ergebnisse lieferten sehr hohe, bzw. negative Werte für die Wärmekapazität, welche nicht realistisch sind.

EPO

Die Funktion EPO (EntwicklungParameterOptimierer) ist von Roosen [ROS98] für unterschiedliche Simulationsprogramme geschrieben worden und lässt sich auf verschiedene Probleme anwenden. EPO basiert auf der biologischen Entwicklungstheorie, wo zwar wie bei fminsearch ein Startwert erforderlich ist, welcher aber von EPO zur Findung des globalen Minimums verändert wird. EPO ist somit viel variabler und findet mit großer Bestimmtheit die Variablen heraus. Weitere Informationen sind in [ROS98] angegeben.

MATLAB-Script „start_wpepo“

```
% function e = start_opt(p);
% function, die von der Startroutine aufgerufen wird

% Deklaration als globale Variable, damit sie von allen Skripten aus sichtbar sind
global t_hotside t_coldside x270700 num mdot

num = 1 %Startwert
load('270700.dat') % Laden der Datei
starttime = x270700(1,1); % Festlegung der Simulationsstartzeit
stoptime = x270700(length(x270700),1); % Festlegung der Simulationsstopzeit

epo('wp_opt') % Aufruf der eigentlichen Funktion
```

Die Funktion „wp_opt“ ist hier genau dieselbe, wie in der Paramtersuche mit fminsearch. Nur die Rechenweise unterscheidet sich erheblich.

Der EPO brachte folgende Ergebnisse für die Wärmepumpe:

FVA Holzmann

$t_{\text{hotside}} = 8,20 \text{ s}$

$t_{\text{coldside}} = 142,85 \text{ s}$

FVA Leyhe

$t_{\text{hotside}} = 128,06 \text{ s}$

$t_{\text{coldside}} = 139,80 \text{ s}$

Diese Ergebnisse sind sehr realistisch und sie lassen darauf schließen, dass der Aufbau der 2 Wärmepumpen der FVA Holzmann (Typ BW106) und Leyhe (Typ BW 110) doch sehr unterschiedlich sein muss. So kann aus den Ergebnissen

geschlossen werden, dass bei der Wärmepumpe BW 106 der Wärmeübertrager der heißen Seite eine sehr geringe Masse und der Wärmeübertrager der kalten Seite eine große Masse aufweist.

Für den Typ 110 gilt, dass die Wärmeübertrager ungefähr die gleiche Masse haben.

5.5 Simulation FVA Holzmann

Der Versuchsaufbau (Seite 18, Abbildung 4.7) beschreibt ein komplettes Heizsystem mit eingesetzter Wärmepumpe des Herstellers Viessmann des Typs BW 106.

Zunächst erfolgt eine Umrechnung des Massenstroms auf die SI-Basiseinheit [kg/s]. Nicht benötigte Werte werden durch einen sogenannten „Terminator“ eliminiert und für die Simulation nicht herangezogen.

Der „vektor selector“ (im Modell grün dargestellt) übernimmt den THV und filtert die gewünschte Einheit (Temperatur oder Massenstrom) heraus, und leitet diesen Wert an die Anzeige „Scope“ weiter. Der Massenstrom ist noch mit einem Faktor von 100 beaufschlagt, damit dieser im Scope besser zu erkennen ist.

Das Modell der Wärmepumpe ist aus der Simulink®-Toolbox CARNOT schon bekannt und die spezifischen Parameter für die Viessmann Wärmepumpe wurden entsprechend verwendet (siehe Abschnitt 5.3 Simulationsanleitung der Wärmepumpe).

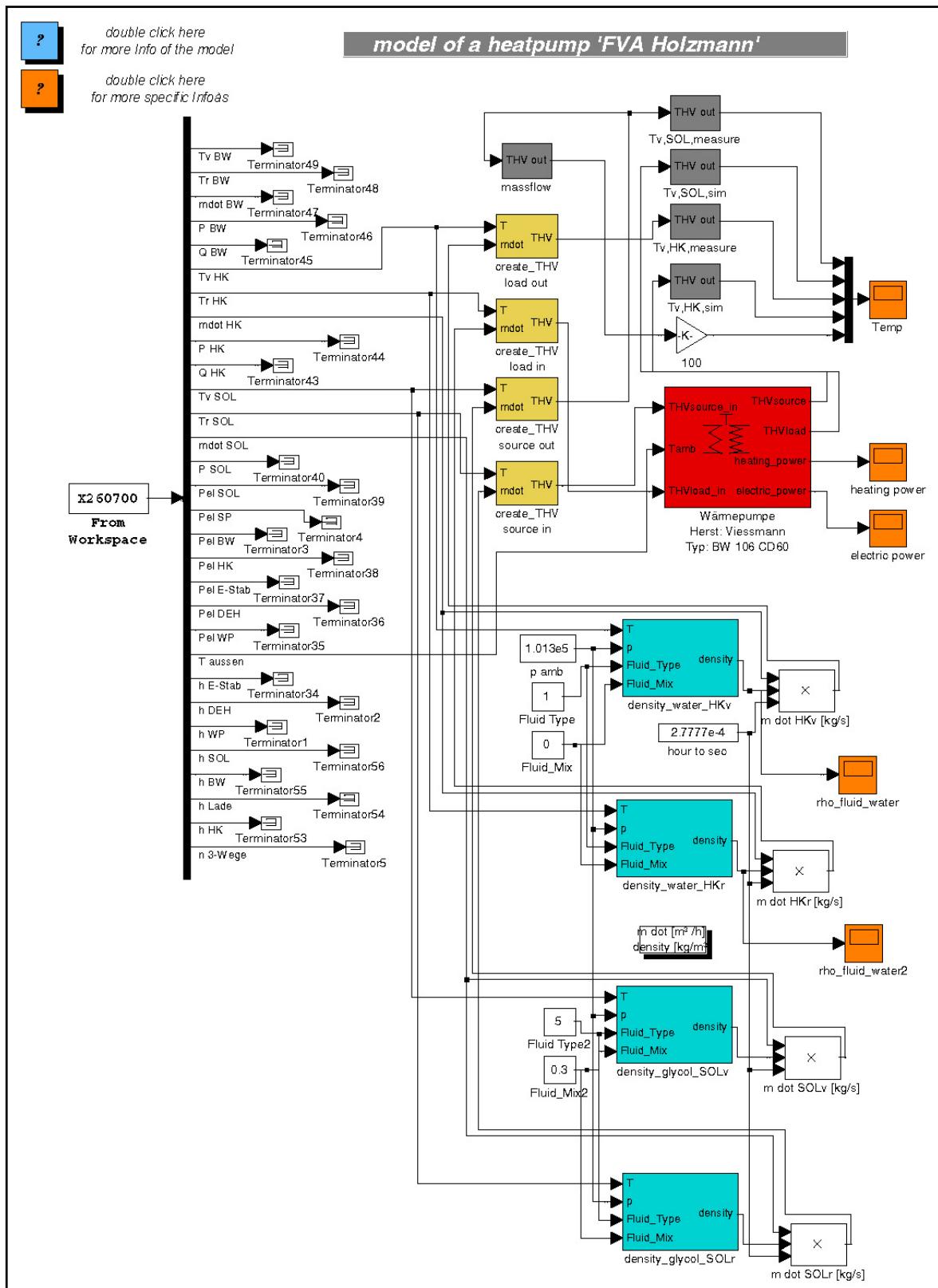


Abbildung 5.10 : Modell der Wärmepumpe FVA Holzmann

Um Modell und Messdaten vergleichen zu können, werden im Endeffekt die Temperaturen der Messung und der Simulation gegenübergestellt und in einem Output grafisch veranschaulicht.

Im Bild sind die simulierten (rot) und gemessenen (magenta) Werte als Kurven für die Vorlauftemepratur des Heizkreises bei einer Temperatur von ca. 50 °C zu sehen. Man erkennt schnell die Einschwingzeit, nach der sich die Kurven gut annähern. Bei den Vorlauftemperaturen des Solekreises sieht dies ähnlich aus (gelb=gemesen, cyan=simuliert). Die Einschwingzeit ist hier etwas kürzer.

Mit steigender Laufzeit und gleichbleibenden Volumenstrom erkennt man die Wirkungsweise der Wärmepumpe. Die Heiztemperatur steigt bis auf den in der Regelung eingestellten Wert an und nach Erreichen des Wertes, wird die Wärmepumpe abgeschaltet. Nach einer Taktzeit von ca. 10 Minuten wird die Wärmepumpe wieder aktiviert und schaltet sich nach Erreichen der Grenztemperatur wieder ab.

Die Soletemperaturen sind aufgrund des großen Inhalts in den Rohren viel träger, und so sieht es im Output fast so aus, als wäre die Soletemperatur konstant. Wird die Wärmepumpe ausgeschaltet, erwärmt sich das in der Wärmepumpe enthaltene Wasser / Glycol-Gemisch aufgrund der Umgebungswärme. Ensteht durch erneutes Einschalten ein Massenstrom in den Sole-Leitungen, kühlte sich der Fühler in der Sole wieder ab.

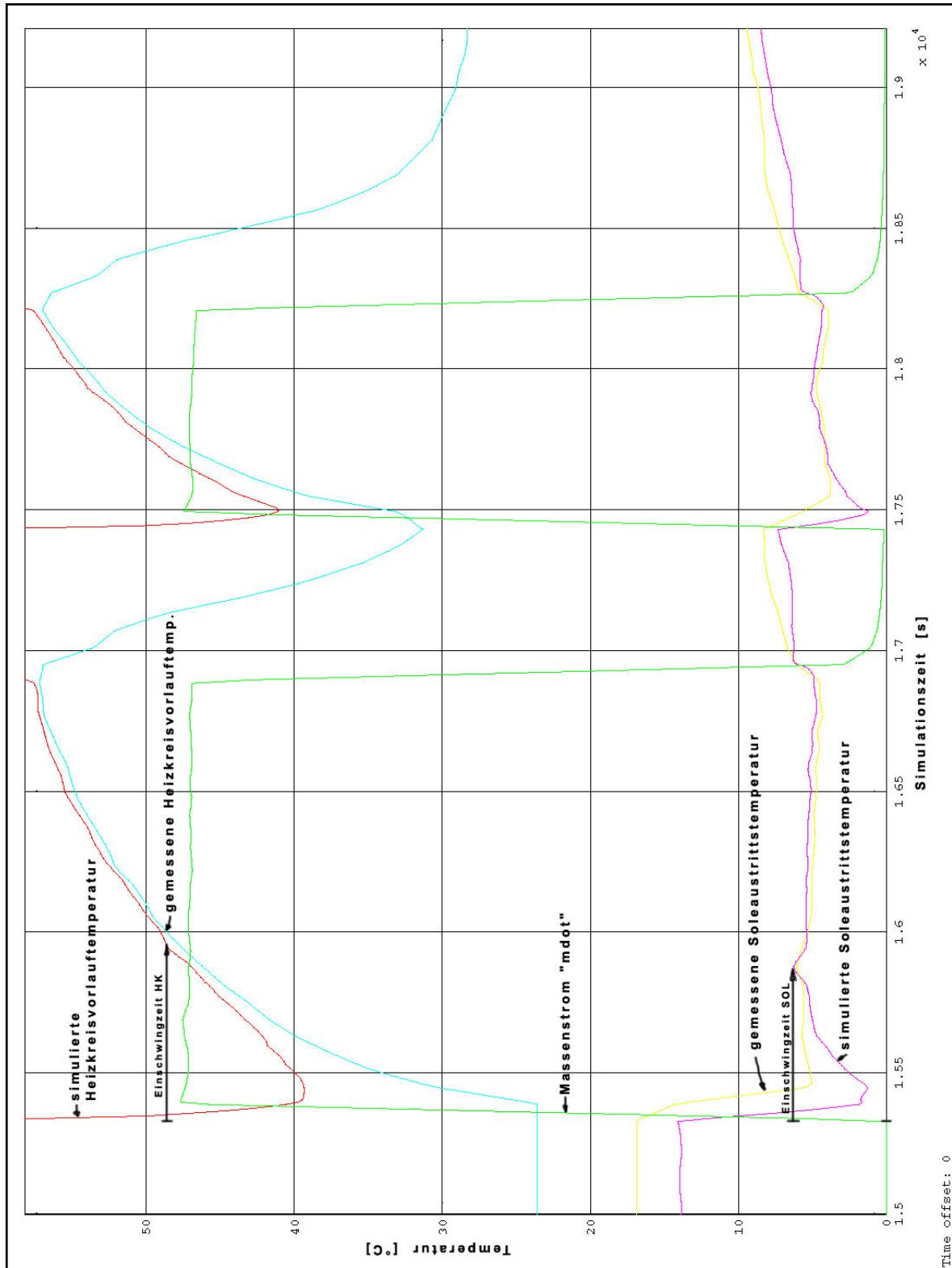


Abbildung 5.11 : Temperaturvergleich des Modells FVA Holzmann

5.6 Simulation FVA Leyhe

Auf Seite 20, Abbildung 4.8 ist die hydraulische Abbildung des Heizsystems mit einer Wärmepumpe des Typs BW110 dargestellt.

Wie auch im vorigen Modell geschieht eine Umrechnung des Massenstroms auf SI-Basiseinheiten und nicht benötigte Werte werden für die Simulation vernachlässigt. Es werden die für die Wärmepumpe spezifischen Daten eingetragen, und die Simulation kann beginnen.

Der einzige Unterschied zum Holzmann-Modell besteht darin, dass der Faktor des Massenstroms nicht den Faktor 100 hat, sondern den Wert 25 besitzt. Dies ist auf die unterschiedlichen Typen der Wärmepumpe zurückzuführen und auf die Art des Erdwärmetauschers.

Modellierung und Simulation

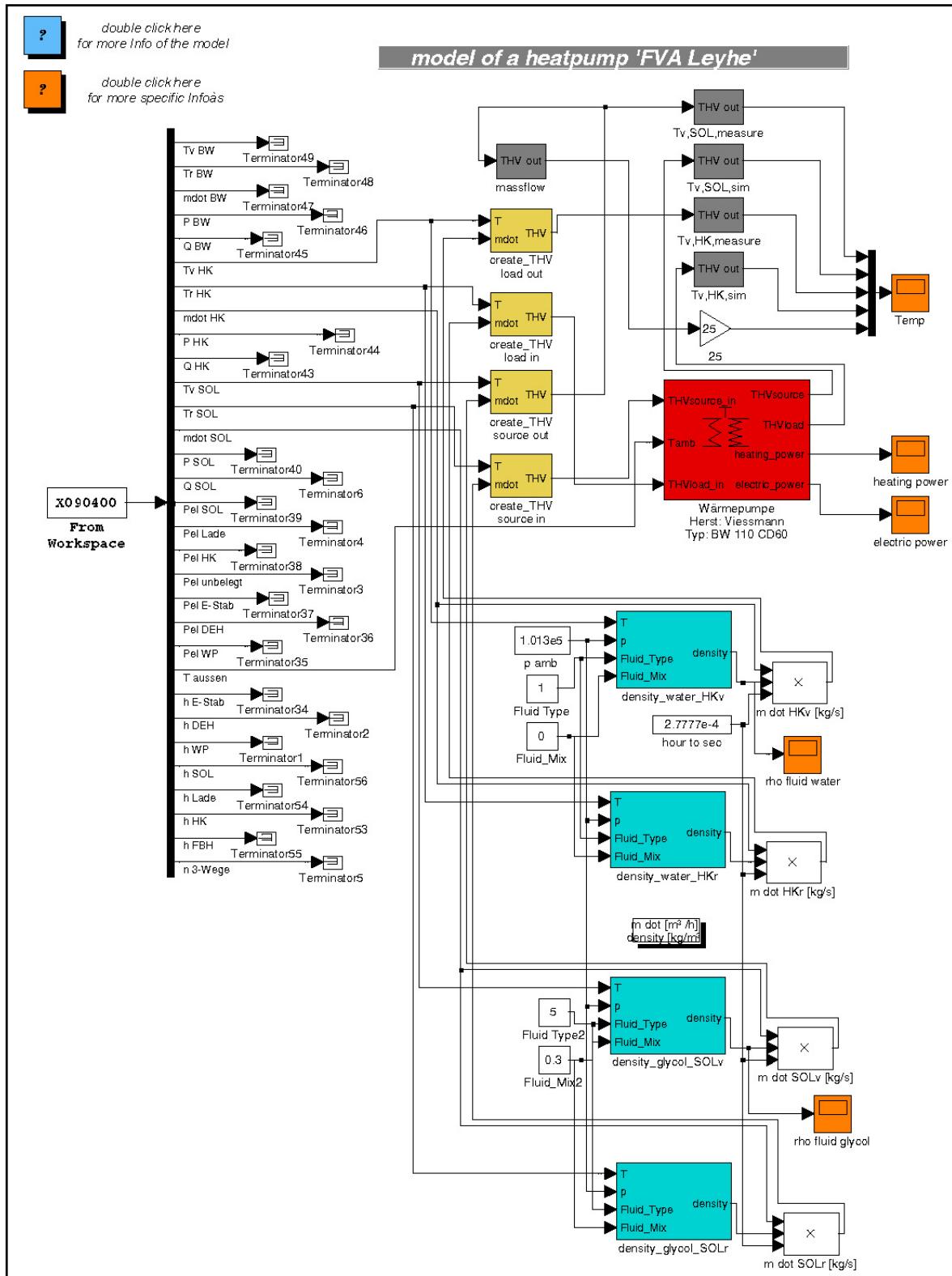


Abbildung 5.12 : Modell der Wärmepumpe FVA Leyhe

Die Kurven zeigen die gleiche Charakteristik, nur dass die Abweichung der simulierten zu den gemessenen Werten erheblich grösser ist.

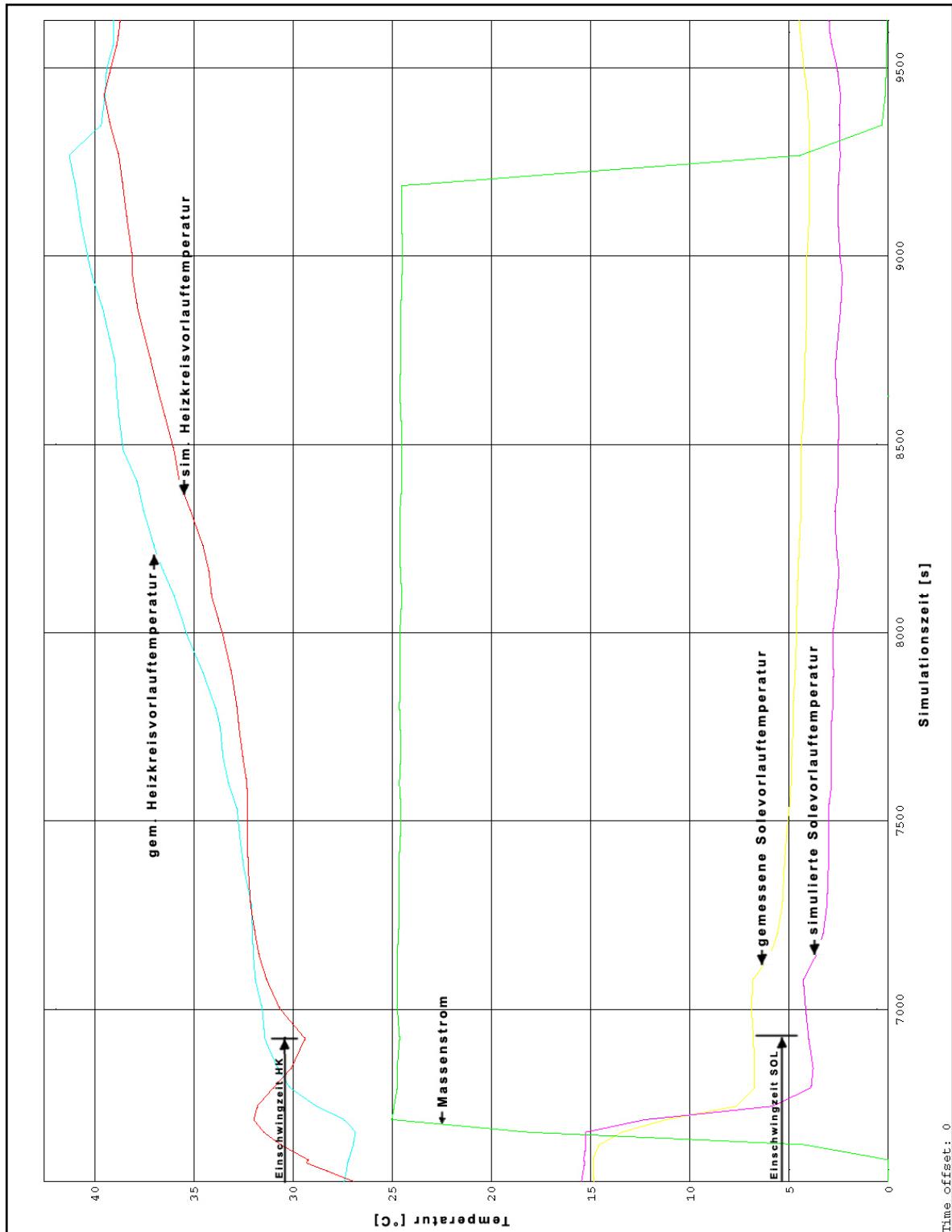


Abbildung 5.13 : Temperaturvergleich des Modells FVA Holzmann

6 Ergebnisse und Ausblick

FVA Holzmann

- Die Temperaturen des Heizkreises (Vor- und Rücklauf) liegen nach einer Einschwingzeit sehr gut übereinander. Die Einschwingzeit kann mit ca. 4 Minuten angegeben werden. Die Genauigkeit der simulierten Kurve beträgt ca. 1 % .
- Für die Temperaturen der Sole (Vor- und Rücklauf) trifft in puncto Einschwingzeit das Gleiche zu. Die Genauigkeit hier kann mit ca. 15% angegeben werden.
- Für die Kurven liegt die Simulationsabweichung von den Messwerten bei länger andauerndem Massenstrom ($T > 25$ Minuten) unter 1% bzw. 6%

Simulationsauswertung FVA Holzmann					
Datei	Taktung pro Tag [n/D]	Taktzeit [s]	Einschwingzeit [s]	Abweichung HK [%]	Abweichung SOL [%]
270999	3	1385	462	0,9	10
221099	3	18333	111	0,96	25
221299	1/5	42000	333	0,74	X
	2/5	3980	299	0,65	29
	3/5	3475	228	0,9	29
	4/5	12604	148	0,68	X
	5/5	42216	449	0,66	X
231299	1	64917	221	0,7	X
241299	1/4	4287	243	0,8	X
	2/4	4223	81	0,7	X
	3/4	5222	74	0,93	X
	4/4	54503	234	0,6	X
030100	1/3	5108	265	0,7	19
	2/3	4881	119	1,3	X
	3/3	17442	388	0,74	19
040200	1/2	22424	101	0,6	X
	2/2	18512	413	0,6	29
250700	1	1210	150	1	9
260700	1/3	1618	338	1,1	7,1
	2/3	838	309	1,3	7,1
	3/3	1025	465	1,2	1
270700	1/3	970	174	3	8
	2/3	757	63	0,9	9,1
	3/3	785	179	7,3	11

Abbildung 6.1 : Ergebnistabelle FVA Holzmann - Daten

Durchschnittliche Taktung pro Tag [n/D]:	2,8		
Durchschnittliche Taktzeit pro Tag [s]:	33271,5	(9 Stunden 15 min.)	
Durchschnittliche Einschwingzeit [s]:	243,6	(4 min. 3 sec.)	
Durchschnittliche Abweichung HK [%]:	1,2		
Durchschnittliche Abweichung SOL [%]:	15,2		

Abbildung 6.2 : Ergebnistabelle FVA Holzmann - Zusammenfassung

FVA Leyhe

- Die Temperaturen des Heizkreises (Vor- und Rücklauf) liegen nach einer Einschwingzeit sehr gut übereinander. Die Einschwingzeit kann mit ca. 5 Minuten angegeben werden. Die Genauigkeit der simulierten Kurve beträgt ca. 16 % .
- Für die Temperaturen der Sole (Vor- und Rücklauf) trifft in puncto Einschwingzeit das Gleiche zu. Die Genauigkeit hier kann mit > 80% angegeben werden.
- Auch bei länger andauerndem Massenstrom ($T > 25$ Minuten) verringert sich die Abweichung der simulierten von den gemessenen nicht weiter.

Simulationsauswertung FVA Leyhe					
Datei	Taktung pro Tag [n/D]	Taktzeit [s]	Einschwingzeit [s]	Abweichung HK [%]	Abweichung SOL [%]
221299	1/2	9844	259	14,7	X
	2/2	14286	325	14,39	X
231299	1/3	16312	355	18	X
	2/3	11546	309	23,6	X
241299	3/3	7500	347	18,4	X
	1/4	15578	408	16,7	X
020100	2/4	4079	296	15,3	X
	3/4	9453	210	22,3	X
040200	4/4	5194	194	16,1	X
	1/5		225	19,8	X
	2/5	5495	339	15,2	X
	3/5	9113	524	22,4	X
	4/5	2966	299	13,4	X
	5/5	2895	252	18,9	X
040200	1/3	5784	297	14	X
	2/3	11077	256	12,1	X
	3/3	6709	290	18,1	X

Abbildung 6.3 : Ergebnistabelle FVA Leyhe –Teil 1

070300	1/3	11908	809		X
	2/3	6214	286		X
	3/3	4302	283		X
010500	1	1844	320	17,4	100
020500	1	1917	130	2,6	100
040500	1	2715	369	4,13	100
050500	1	2400	138	3,05	100
060500	1	1711	156	3,2	100
070500	1	1705	172	3,2	100
180500	1	2152	180	4,2	74
250700	1	1849	208	13,8	33,3
260700	1	1622	148	27,3	37,5
270700	1	1878	96	36,7	50

Durchschnittliche Taktung pro Tag [n/D]:	1,9		
Durchschnittliche Taktzeit pro Tag [s]:	11829,5	(3 Stunden 18 min.)	
Durchschnittliche Einschwingzeit [s]:	282,7	(4 min. 42 sec.)	
Durchschnittliche Abweichung HK [%]:	15,5		
Durchschnittliche Abweichung SOL [%]:	79,5		

Abbildung 6.4 : Ergebnistabelle FVA Leyhe – Teil 2

Die Simulationsergebnisse der FVA Holzmann zeigen eine gute bis sehr gute Simulationsgenauigkeit, die über den gestellten Erwartungen liegt. Es war eine Abweichung von unter 10% angestrebt, die für den Heizkreis zutrifft. Bei dem Solekreis liegt die Abweichung erst nach längerer Taktungsdauer ebenfalls unter 10%.

FVA Leyhe erzielt eine nicht so gute Genauigkeit in der Simulation wie die der FVA Holzmann. Da beide Modelle sehr ähnlich sind, können Fehler bei der Simulation ausgeschlossen und Schwächen beim Aufbau und der Funktion der Messeinrichtungen vermutet werden. Folgende Möglichkeiten sind gegeben:

a. Fühler

Zur Temperaturmessung wurden Widerstandsfühler des Typs PT100 verwendet, welche sich für den Meßbereich von -15°C bis 90°C sehr gut eignen. Um Messungenauigkeiten zu vernachlässigen muß darauf geachtet werden, dass die Fühler zusammen kalibriert werden.

Die Meßstellen hatte bei beiden Feldversuchsanlagen die gleiche Position und es wurden auch Fühler des gleichen Typs (Fühler in Tauchhülse und Anlegefühler) für die jeweiligen Messorte eingesetzt.

Max. Abweichung: 5%

b. Wärmepumpenserie

Die in den Datenblättern beschriebenen Werte sind durchschnittswerte der Serienproduktion. Die Qualität der Messung ist abhängig von der Serienfertigung der Wärmepumpen und dessen maximale Abweichungen zwischen den einzelnen Wärmepumpen. Nach Angaben des Herstellers ist eine Toleranz bei der Wärmepumpenleistung von 1% zulässig. Diese Abweichung schlägt sich dann auf die simulierten Werte der Temperaturen wieder, da die Wärmepumpenleistung im Modell hinterlegt wird.

Max. Abweichung: 2%

c. Alterserscheinungen

Die Wärmepumpen der beiden Feldversuchsanlagen waren zum Zeitpunkt des Einbaus fabrikneu, wohin gegen die einzelnen Komponenten schon eine Lagerungszeit haben. Diese Lagerungszeit kann einen Einfluß auf die Genauigkeit des Systems Wärmepumpe haben. Bei Viessmann rechnet man hier mit einer

Max. Abweichung: 1%

d. Ablesegenauigkeit

Die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe wird im Modell hinterlegt indem die Kurven aus dem Datenblatt abgelesen werden. Der hierbei erreichte Fehler kann folgendermaßen angegeben werden

Max. Abweichung: 1%

Die Summe der Abweichungen beträgt also 9%. Wenn man anhand der Kurven im Modell überprüft, liegen die Kurven der Sole der FVA Leyhe ebenfalls im festgelegten Bereich einer maximalen Abweichung von 10%.

Im Bereich des Heizkreises ist die Abweichung noch höher und es ist auch eine konstante Abweichung zu erkennen. Diese konstante Abweichung lässt auf einen falschen Meßort schliessen, welches aber nicht mehr genau belegt werden kann.

7 Zusammenfassung

Leider wurde bei der Messung ein falsches Messgerät eingesetzt, das nicht den kompletten Messbereich aufnehmen konnte. Temperaturen unter 0°C wurden einfach nicht mehr gemessen. Dies ist im Hinblick für die Validierung der Wärmepumpe unglücklich. Trotzdem lassen die guten Ergebnisse der FVA Holzmann folgende Aussage zu:

Das in CARNOT enthaltene Modell der Wärmepumpe ist für Simulationen in heiztechnischen Anlagen von Einfamilienhäusern sehr gut zu gebrauchen. Die Abweichungen liegen unter der angepeilten Marke von 10 %, und es ist eine Einschwingzeit von ca. 5 Minuten erforderlich. Mit diesen Parametern ist das in CARNOT vorhandene Modell der Wärmepumpe sehr gut für dynamische Simulationen geeignet und weiterzuempfehlen. Die Ermittlung der Zeitkonstanten ist allerdings sehr aufwendig. Es wird empfohlen eine Routine zu programmieren, die die Zeitkonstanten selbstständig errechnet.

Die Eingabemaske der Kenndaten der Wärmepumpe ist schon sehr gut, sie sollte aber auf alle einzugebenden Werte ausgeweitet werden. Dies erleichtert dem Modellbenutzer die Arbeit, und die ganze Simulation wird übersichtlicher.

Des Weiteren könnte auch eine Datenbank mit allen am Markt erhältlichen Wärmepumpen hinterlegt werden. Mit Hilfe eines Auswahlfeldes (Drop-Down) könnte so jede Wärmepumpe ohne großen Aufwand durch den Benutzer in ein vorhandenes Modell eingebunden werden.

Mit weiteren Messreihen in Mehrfamilienhäusern und Industriebetrieben könnte somit die Validierung komplettiert werden.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [BEU00] Ottmar Beucher „MATLAB und SIMULINK® lernen“
Addison-Wesley Verlag, München, 2000
- [HOF98] Josef Hoffmann „MATLAB und SIMULINK®: Beispielorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme“
Addison Wesley Longman Verlag GmbH, München, 1998
- [CAR99] Solar Institut Jülich „CARNOT Blockset 1.0 Users Guide“
Solar Institut Jülich, Jülich, 1999
- [REC92] Recknagel, Sprenger, Hönnemann „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“
R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1992
- [SCH91] K. Schwamberger „Modellbildung und Regelung von Gebäudeheizungsanlagen mit Wärmepumpen“
Fortschrittsberichte VDI Reihe 6, Nr. 263 VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
- [DIN8900] Deutsches Institut für Normung eV, DIN 8900 „Wärmepumpen; Anschlußfertige Heiz-Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern“
Beuth Verlag Berlin Wien Zürich, 1987
- [GRU87] Wolf-Dieter Gruhle „Regeldynamische Untersuchungen an Kompressionskälteprozessen und -wärmepumpen“
Fortschritt-Berichte VDI., Reihe 19
VDI Verlag, Düsseldorf, 1987
- [VIE99] Viessmann Datenblatt “Vitocal 300”
Viessmann Werke GmbH & Co KG, Allendorf (Eder), 1999

- [ROS98] P. Roosen „The evolutionary parameter optimizer shareware manual“
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik RWTH Aachen, 1998
- [GIE89] K. und R. Giek „Technische Formelsammlung“
Giek Verlag, Germering, 1989
- [KUC94] Horst Kuchling „Taschenbuch der Physik“
Fachbuchverlag Leipzig GmbH, Leipzig, 1994

9 Anhang

9.1 Simulationsdiagramme

Folgende Ausdrucke der Simulationen dienen der weiteren Veranschaulichung der Simulationsergebnisse:

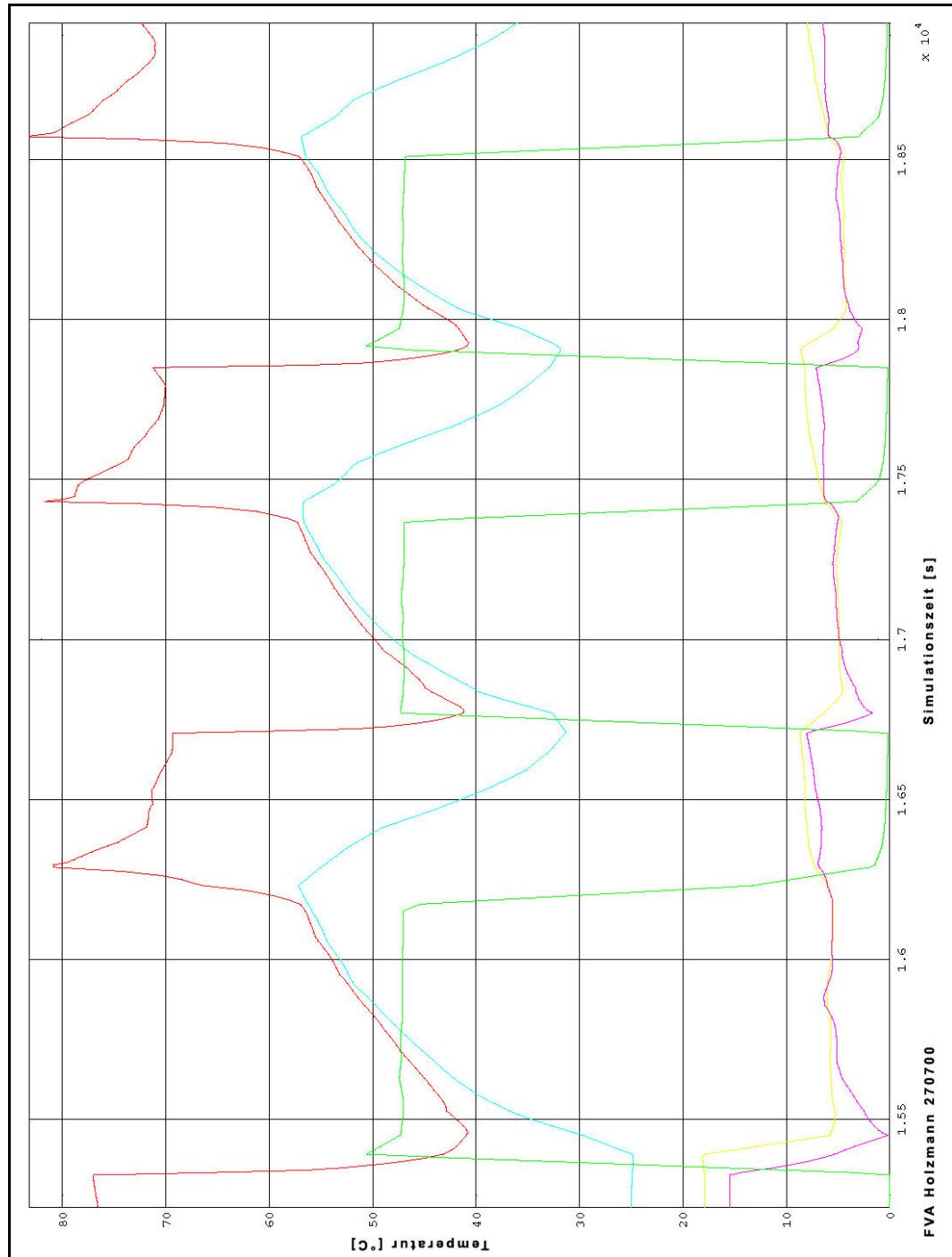


Abbildung 9.1 : Ausdruck FVA Holzmann 27.07.2000

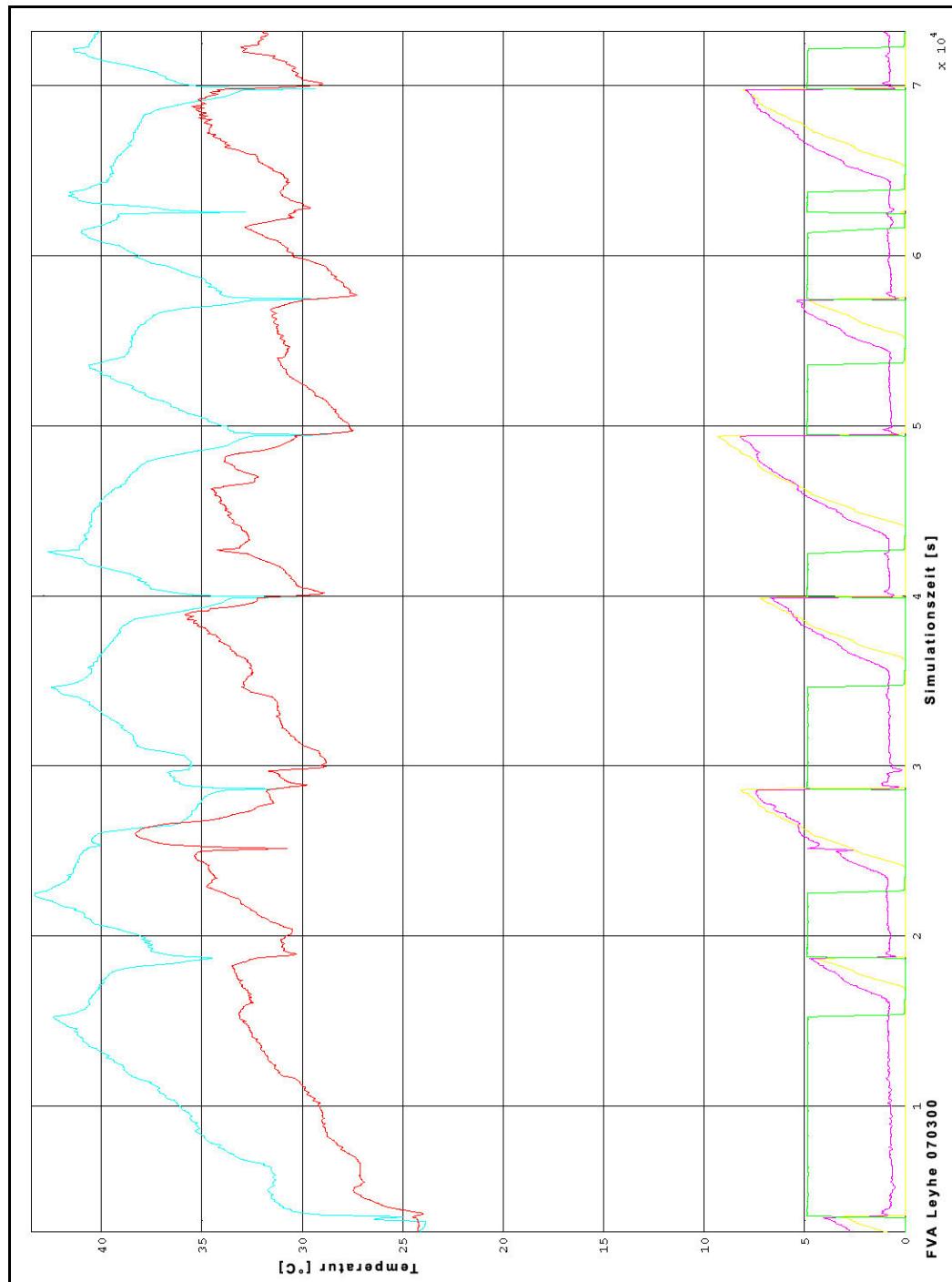


Abbildung 9.2 : Ausdruck FVA Leyhe 07.03.2000

9.2 Hilfetext für fminsearch aus MATLAB

```
function [x,fval,exitflag,output] = fminsearch(funfcn,x,options,varargin)
%FMINSEARCH Multidimensional unconstrained nonlinear minimization (Nelder-Mead).
% X = FMINSEARCH(FUN,X0) starts at X0 and finds a local minimizer X of the
% function FUN. FUN accepts input X and returns a scalar function value
% F evaluated at X. X0 can be a scalar, vector or matrix.
%
% X = FMINSEARCH(FUN,X0,OPTIONS) minimizes with the default optimization
% parameters replaced by values in the structure OPTIONS, created
% with the OPTIMSET function. See OPTIMSET for details. FMINSEARCH uses
% these options: Display, TolX, TolFun, MaxFunEvals, and MaxIter.
%
% X = FMINSEARCH(FUN,X0,OPTIONS,P1,P2,...) provides for additional
% arguments which are passed to the objective function, F=feval(FUN,X,P1,P2,...).
% Pass an empty matrix for OPTIONS to use the default values.
% (Use OPTIONS = [] as a place holder if no options are set.)
%
% [X,FVAL]= FMINSEARCH(...) returns the value of the objective function,
% described in FUN, at X.
%
% [X,FVAL,EXITFLAG] = FMINSEARCH(...) returns a string EXITFLAG that
% describes the exit condition of FMINSEARCH.
% If EXITFLAG is:
% 1 then FMINSEARCH converged with a solution X.
% 0 then the maximum number of iterations was reached.
%
% [X,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] = FMINSEARCH(...) returns a structure
% OUTPUT with the number of iterations taken in OUTPUT.iterations.
%
% Examples
% FUN can be specified using @:
%   X = fminsearch(@sin,3)
% finds a minimum of the SIN function near 3.
% In this case, SIN is a function that returns a scalar function value
% SIN evaluated at X.
%
% FUN can also be an inline object:
%   X = fminsearch(inline('norm(x)'),[1;2;3])
% returns a minimum near [0;0;0].
%
% FMINSEARCH uses the Nelder-Mead simplex (direct search) method.
%
% See also OPTIMSET, FMINBND, @, INLINE.
```

9.3 Marktübersicht Wärmepumpen

Im allgemeinen werden Wärmepumpen zunächst nach der Umweltenergie und dann nach dem Wärmeträger bezeichnet.

Es gibt Luft / Luft - Wärmepumpen, Luft / Wasser - WP, Wasser / Wasser - WP, Sole / Wasser - WP. Es kann auch nach der Art des Pumpenantriebes unterschieden werden -> Elektro- oder Gas-WP. Oder nach der Art der Absorptions- oder Adsorptions-WP.

Die Wärmepumpentechnik kann nach den folgenden Kriterien eingeteilt werden:

Nach der Art der Wärmequelle:

- Sonne
- Außenluft
- Innenluft
- Grundwasser
- Oberflächenwasser
- Erdwärme
- [Abfallenergie]

Nach der Art der Technologie:

- Kompression elektrisch / gasmotorisch
- Absorption
- Adsorption

Nach der Art der Wärmennutzung:

- Heizung
- Warmwasser
- Schwimmbad

Am weitesten verbreitet sind die Kompressions-WP zu Heizungszwecken in der Ausführung Sole / Wasser bzw. Wasser / Wasser. Aufgrund der konstanten Temperatur von Brunnen, Grundwasser oder auch des Erdreiches haben diese eine akzeptable Leistungszahl und sind in eine kompakten Bauweise sehr gut in ein Heizungssystem zu integrieren. Häufig werden sie auch bivalent eingesetzt,

wo als Zusatzenergie eine konventionelle Heizung dient oder ein Elektroheizstab für den Restwärmebedarf genutzt wird.

Luft-WP haben eine geringe Leistungszahl und sind stark außentemperaturabhängig. Sie waren zur Anfangszeit der WP in den 70iger Jahren die gebräuchlichste Art.

Das Arbeits- oder auch Kältemittel war früher ausschließlich R12, R22 und R502 (FCKW-haltig) und aufgrund der Auswirkungen auf das Ozonloch wurde dann Propan (KW-haltig) eingesetzt. Leider werden wieder H-FKW-haltige Mittel eingesetzt, da Hersteller von Verdichtern aus Gewährleistungsgründen das brennbare Propan nicht mehr einsetzen. FCKW-haltige Arbeitsmittel werden Ende dieses Jahres verboten; dies gilt aber nicht für H-FCKW-haltige Verbindungen.

Leistungszahl:

$$E_{th} = Q_c / P = (h_2 - h_3) / (h_2 - h_1)$$

Die Leistungszahl oder auch COP (Coefficient Of Performance) ist das Verhältnis der am Kondensator abgegebenen Energie zur zugeführten Energie (Pumpe + Umgebungswärme).

Die Arbeitszahl ist das Integral der jährlich erbrachten Leistung (Jahresarbeitszahl).

Typ	COP	Typ. Heizleistung	Umweltenergie	Einsatz	Probleme
Luft / Luft - WP	4,1 - 4,4	5,4 - 20,5 kW	Umgebungs- oder Fortluft	Kontrollierte Be- und Entlüftung	Kaum konst. Temperatur, große Temperaturschwankungen
Luft / Wasser - WP	3,0 - 3,4	8,4 - 20,5 kW	Umgebungs- oder Fortluft	Heizsystem FBH	Geringe Leistungszahl
Wasser / Wasser - WP	5,2 - 5,6	1,3 - 17,1 kW	Grundwasser, Flüsse, Brunnen	Heizsystem FBH	Eingeschränkter Temperaturbereich
Sole / Wasser -WP	4,2 - 4,7	5,3 - 67,6 kW	Erdreich (Sonde o. Kollektor)	Heizsystem FBH	Vereisung am Verdampfer