



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Fakultät Life Sciences

Thermisch-hydraulische Modellierung der Ringleitung-Wärmeversorgungsanlage eines Industriebetriebs

Bachelorarbeit

im Fach Umwelttechnik

vorgelegt von

Kathrin Weihe
Matrikelnummer: 214455

Hamburg, am

6. Oktober 2016

- 1. Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Gerwald Lichtenberg HAW Hamburg
2. Gutachter: M.Sc. Kai Kruppa HAW Hamburg

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig durchgeführt und keine weiteren Hilfsmittel und Quellen als die angegebenen genutzt zu haben.

Hamburg, 6. Oktober 2016

Kathrin Weihe

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Stand der Technik	2
1.4 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	4
2.1 Thermodynamik von Heizkreisen	4
2.1.1 Erzeuger	4
2.1.2 Verbraucher	4
2.2 Modellbildung	5
2.2.1 Modellierungstypen	5
2.2.2 Modellformen zur Beschreibung von Systemen	6
2.3 Parameteridentifikation	7
2.3.1 Methode der kleinsten Fehlerquadrate	7
2.3.2 Zustandsraumverfahren 4SID	8
3 Strukturierte Modellbildung	10
3.1 Charakterisierung der Wärmeversorgungsanlage	10
3.1.1 Aufbau der Anlage	10
3.1.2 Verfügbare Messdaten	11
3.1.3 Strukturbild der Anlage	12
3.1.4 Betriebsmodi der Anlage	13
3.2 Randbedingungen	14
3.2.1 Untersuchte Modi	14
3.2.2 Qualität der Messdaten	15
3.3 Modellbeschreibung	15
3.3.1 Statisches Volumenstrommodell	16
3.3.2 Modell der Vorlauftemperatur	16
3.3.3 Modell der Wärmeleistung	17
3.3.4 Modell der Rücklauftemperatur	18
3.3.5 Blockschaltbilder	19

4 Parameteridentifikation und Validierung	21
4.1 Parameteridentifikation der Teilsysteme	21
4.1.1 Parametrisierung des statischen Volumenstrommodells	22
4.1.2 Parametrisierung der dynamischen Teilmodelle	22
4.2 Validierung der Teilsysteme	23
4.2.1 Volumenstrom	23
4.2.2 Vorlauftemperatur	24
4.2.3 Wärmeleistung	26
4.3 Simulationsergebnisse des Gesamtmodells	28
4.3.1 Implementierung	28
4.3.2 Validierung	29
4.4 Zusammenfassende Fehlerdiskussion	32
5 Zusammenfassung und Ausblick	33

Abbildungsverzeichnis

1.1	Luftbild des Werksgeländes der LMT Group Schwarzenbek,[1]	1
3.1	Schematische Darstellung der Heizanlage, [2]	11
3.2	Lageplan der Messtellen,[3]	12
3.3	vereinfachtes Strukturbild der Anlage	13
3.4	Strukturbild des Gesamtmodells	19
3.5	Blockschaltbild des Teilmodells der Vorlauftemperatur	20
3.6	Blockschaltbild des Teilmodells der Wärmeleistung	20
4.1	Ergebnis der Simulation von \dot{V}_1 bis \dot{V}_5 . Vergleich von Messdaten (blau) und berechneten Werten (orange)	23
4.2	Ausschnitt der Simulationsergebnisse zu $T_{V,1}$	24
4.3	Vergleich der Vorhersageergebnisse für $T_{V,5}$ bei verschiedenen Fließrichtungen. Das Modell zeigt für negative Fließrichtung an P_5 bessere Ergebnisse (a) als für positive Fließrichtungen (b).	25
4.4	Ausschnitt der Simulationsergebnisse zu $T_{V,2}$	25
4.5	Vergleich der Vorhersageergebnisse für $T_{V,3}$ bei häufigen Fließrichtungswechseln (a) und bei konstanter Fließrichtung (b)	26
4.6	Vergleich der Vorhersageergebnisse für \dot{Q}_3 und \dot{Q}_4 . Der NRMSE liegt im negativen Bereich und weist schlechtere Übereinstimmungen auf als die Simulationen für \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 und \dot{Q}_5	26
4.7	Vergleich der Simulation für \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 und \dot{Q}_5 . Der NRMSE liegt zwischen 20 % und 50 % für alle drei Punkte	27
4.8	Vergleich der Simulation für $T_{R,1}$ für die zwei unterschiedlichen Modellansätze.	30
4.9	Simulation von $T_{R,3}$ für die zwei unterschiedlichen Modellansätze. Beide Modellansätze liefern keine brauchbaren Simulationsergebnisse für $T_{R,3}$	31

Tabellenverzeichnis

1	Beobachtete Betriebsmodi im untersuchten Zeitraum	15
2	Eingangs- und Ausgangsgrößen des Modells	16
3	Übersicht über die NRMSE Übereinstimmung für das parametrisierte Volumenstrommodell zu verschiedenen Zeiträumen	22

4	Vergleich der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messdaten anhand des NRMSE bei verschiedenen Vorgaben der Systemordnung. Die Simulation wurde mit Messergebnissen aus dem Zeitraum vom 16.04.2016 - 23.04.2016 verglichen.	22
5	Vergleich der Simulationsergebnisse für $T_{V,1}$ bis $T_{V,5}$ für verschiedene Betriebsmodi	29
6	Vergleich der Simulationsergebnisse für \dot{Q}_1 bis \dot{Q}_2 für verschiedene Betriebsmodi	30
7	Vergleich der Simulationsergebnisse für $T_{R,1}$ bis $T_{R,5}$ für verschiedene Betriebsmodi und für beide Modellansätze. Mit (*) gekennzeichnete Werte basieren auf um den Nullpunkt fluktuierenden Volumenströmen	31

Formelzeichen

A	Systemmatrix
B	Eingangsmatrix
C	Ausgangsmatrix
c_w	spezifische Wärmekapazität des Wassers
D	Durchgriffsmatrix
$e(k)$	Störgrößenvektor zum Zeitpunkt $k \cdot T_a$
K	Störgrößenmatrix
$k \in \mathbb{Z}$	Abtastschritt
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
P	Parametermatrix
Q	Wärmeenergie
\dot{Q}	Wärmeleistung
ρ	Dichte
T	Temperatur
T_a	Abtastzeit
t	Zeit
$u(k)$	Eingangsgröße zum Zeitpunkt $k \cdot T_a$
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
$x(k)$	Zustandsvektor zum Zeitpunkt $k \cdot T_a$
$y(k)$	Ausgangsgrößen zum Zeitpunkt $k \cdot T_a$

Indizes und Abkürzungen

4SID	Subspace-based State-Space System Identification
HZ1	Heizzentrale 1
HZ2	Heizzentrale 2
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error
q	Wärmeleistung
R	Rücklauf
V	Vorlauf

1 Einleitung

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der im Rahmen einer Bachelorarbeit angefertigten Untersuchungen der Wärmeversorgungsanlage des Industriebetriebes LMT Group Schwarzenbek vorgestellt. Die LMT Group mit Hauptsitz in Oberkochen ist eine weltweit tätige Holding, zu der die Tochterunternehmen LMT Tools und Fette Compacting in Schwarzenbek bei Hamburg gehören. Diese stellen auch den größten Technologie- und Produktionsstandort der Unternehmensgruppe dar, eine Aufnahme des Werksgeländes ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die Wärmeversorgungsanlage des Werks in Schwarzenbek bildet durch ihre Größe sowie durch ihren ringförmig angeordneten Versorgungskreis, strukturell unterschiedliche Verbrauchertypen und dezentral angeordnete Erzeugergruppen eine komplexe Gebäudeenergieversorgungsanlage. Aus diesem Grund wurde die Anlage als Demonstrationsgebäude für das Forschungsprojekt OBSERVE ausgewählt, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde, [1].



Abbildung 1.1: Luftbild des Werksgeländes der LMT Group Schwarzenbek,[1]

1.1 Motivation

Laut eines Berichtes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie hatten Warmwasser und Raumwärme einen Anteil von 32 % am gesamten Energieverbrauch Deutschlands im Jahr 2014, [4]. Ein Großteil der Heizungsanlagen nutzt Primärenergieträger zur Erzeugung von Wärme, weshalb sowohl aus ökonomischer Sicht als auch vor dem Hintergrund der klimatischen Veränderungen eine optimale Nutzung der Ressourcen anzustreben ist. Eine Umrüstung oder komplette Erneuerung von Heizungsanlagen auf neue,

energiesparende Technologien kann jedoch eine hohe finanzielle Hürde bedeuten. Bereits durch eine Optimierung der vorhandenen Heizungsanlagentechnik, zum Beispiel durch Anpassung der Steuer- und Regelparameter sowie durch Fehlerdiagnose, kann bis zu 30 % des Endenergieverbrauchs eingespart werden, [5]. Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieser Optimierung könnte im Einsatz von modellbasierten prädiktiven Reglern liegen, [6]. Für diesen Ansatz ist ein thermisch-hydraulisches Modell des Wärmeversorgungssystems des Gebäudes notwendig, anhand dessen der Regler ein optimiertes Steuersignal beispielsweise zur Steuerung eines Kessels berechnen kann. Die Entwicklung eines solchen thermisch-hydraulischen Modells ist das Ziel dieser Arbeit.

1.2 Problemstellung

Modelle existieren in unterschiedlichsten Formen für verschiedene Zwecke. Für regelungstechnische Zwecke wird jedoch in der Regel die mathematische Beschreibung eines Systems oder Prozesses vorausgesetzt. Zur Erstellung eines solchen Modells ist umfangreiches Wissen über den Prozess selbst notwendig, weshalb im ersten Arbeitsschritt die Wärmeversorgungsanlage der LMT Group Schwarzenbek anhand von Messdaten analysiert werden sollte. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das ein ausreichend genaues Abbild des Prozesses darstellt, um als Modell für einen prädiktiven Regler zu fungieren. Die Qualität des Modells wurde anhand einer Validierung untersucht.

1.3 Stand der Technik

In den vergangenen Jahren wurden diverse Arbeiten zu Modellierungsansätzen von Anlagen und Prozessen unterschiedlichster Art veröffentlicht. In dieser Arbeit wird die Methode der Grey-box-Modellierung genutzt, welche bereits vielfach untersucht und in Veröffentlichungen beschrieben wurde. Darunter finden sich Grey-box-Modelle für mechanische, [7] oder chemische Prozesse, [8], aber auch Modelle, die in der Gebäudetechnik Anwendung finden. Motivation ist oft die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden zum Beispiel durch eine Optimierung der Regelung mittels prädiktiver Regler, [9] [10], wobei für Simulationen im Gebäudebereich oft das Simulationstool TRNSYS verwendet wird. Der Modellierungsansatz dieser Arbeit greift ähnliche Konzepte auf, nutzt für die Implementierung allerdings das Programm MATLAB.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 ein kurzer Überblick über die theoretischen Grundlagen gegeben. Dort werden die zum Verständnis notwendigen Konzepte von Heizungstechnik, Modellbildung und Parameteridentifikation erläutert und es wird auf weiterführende Literatur verwiesen. Kapitel 3 stellt die untersuchte Wärmeversorgungsanlage des Industriebetriebs LMT Group Schwarzenbek vor, stellt die Ergebnisse der Analyse der Anlage dar und beschreibt die entwickelten Modelle sowohl in Form von Modellgleichungen wie auch als Blockschaltbild. In Kapitel 4 wird die durchgeführte Parameteridentifikation erläutert,

die Implementierung beschrieben und die Validierungsergebnisse werden diskutiert. Eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf die Behandlung von ungelösten oder aufgetretenen Problemen finden sich in Kapitel 5.

2 Grundlagen

Das folgende Kapitel fasst die theoretischen Grundlagen der physikalischen, mathematischen und systemtheoretischen Konzepte zusammen, die in dieser Arbeit Anwendung gefunden haben. Sie sollen dem Leser als Nachschlagewerk dienen und zum Verständnis des in dieser Arbeit gewählten Modellierungsansatzes beitragen. Zunächst werden die thermodynamischen Grundlagen von Heizkreisen erläutert, anschließend folgt ein Überblick über das Konzept der Modellbildung und verschiedenen Modellierungstypen. Der letzte Abschnitt des Kapitels befasst sich mit Parameteridentifikation und beschreibt zwei verwendete Ansätze.

2.1 Thermodynamik von Heizkreisen

Heizungsanlagen werden in Gebäuden installiert, um Raumwärme und Warmwasser bereitzustellen. Die am häufigsten anzufindende Art der Heizungsanlage ist dabei die Warmwasserheizung. Hierbei wird Warmwasser durch Wärmeerzeuger bereitgestellt und über Umwälzpumpen durch Heizungsrohre zu Heizkörpern oder Heizflächen transportiert. Besteht ein Temperaturunterschied zwischen der Umgebungstemperatur und der Temperatur des Heizkörpers, wird unter Abkühlung des Warmwassers Wärmeenergie

$$\Delta Q = c_w \cdot m \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

an die Umgebung abgegeben, wobei c_w der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, m der Masse und ΔT der Temperaturänderung des Wassers entspricht. Wird statt der Wärmeenergie Q die Wärmeleistung \dot{Q} betrachtet, lässt sich (2.1) umformen zu

$$\dot{Q} = c_w \cdot \dot{m} \cdot \Delta T = c_w \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot \Delta T, \quad (2.2)$$

mit dem Massenstrom \dot{m} , der Dichte von Wasser ρ und dem Volumenstrom \dot{V} . Das auf diese Weise im sogenannten Verbraucher abgekühlte Wasser wird erneut dem Wärmeerzeuger zugeführt, wo das Heizungswasser Wärme aufnimmt und der Heizkreislauf von neuem beginnt,[11].

2.1.1 Erzeuger

Als Wärmeerzeuger werden in der Regel Heizkessel verwendet, die die chemisch gebundene Energie eines Brennstoffs wie Öl, Kohle oder Gas durch Verbrennung in thermische Energie umwandeln. Über Wärmetauscher wird die thermische Energie an das Heizungswasser übertragen. Die Temperatur des so erwärmten Heizwassers wird Vorlauftemperatur genannt. Die Heizleistung eines Wärmeerzeugers kann dabei durch Vorgabe einer Sollgröße geregelt werden, zum Beispiel durch Vorgabe einer Soll-Vorlauftemperatur, [12].

2.1.2 Verbraucher

Heizkörper oder Heizflächen werden in der Heizungstechnik auch als Verbraucher bezeichnet. Sie entziehen dem Heizkreis Wärme, da durch sie eine Wärmeübertragung durch

Konvektion und Wärmestrahlung an den sie umgebenden Raum stattfindet. Tritt Wasser mit einer Vorlauftemperatur T_V in einen Heizkörper ein, kühlt sich das Wasser nach (2.1) ab und tritt mit einer Temperatur $T_R < T_V$ aus dem Heizkörper wieder aus. Die Temperatur T_R wird auch Rücklauftemperatur genannt.

2.2 Modellbildung

Ziel der Modellbildung ist es, ein Abbild eines realen Prozesses zu erhalten, wobei das Abbild idealerweise dasselbe Systemverhalten zeigt wie der reale Prozess. Die Modelle können ganz unterschiedlichen Zwecken dienen, beispielsweise der reinen Informationsgewinnung über das Systemverhalten oder aber als Grundlage für eine Regelung. Die Modellbildung wird in der Regel in folgenden Schritten vollzogen, [13]:

1. Beschreibung des Modellierungsziels
2. Auswahl der Modellannahmen
3. Verbale Beschreibung des Modells
4. Aufstellung des Blockschaltbildes
5. Aufstellung der Modellgleichungen

Die Modellgleichungen beschreiben das zeitlich veränderliche Verhalten von Modellen. Sie werden in der Regel in Form von Differentialgleichungen ausgedrückt, wobei die zeitlich veränderlichen Größen Signale genannt werden. Dabei wird das reale System möglichst weit reduziert auf die wesentlichen Merkmale, die das Systemverhalten beschreiben. Dies soll die Modellerstellung sowie die Berechnung durch die Modellgleichungen vereinfachen und Rechenzeit einsparen. Die Aufstellung der Modellgleichungen kann dabei auf unterschiedliche Weise erfolgen, wie nachfolgend erläutert wird.

2.2.1 Modellierungstypen

Grundsätzlich können drei verschiedene Ansätze zur Modellierung von Systemen unterschieden werden, [14]:

White-box-Modelle: Werden Modelle anhand physikalischer Gesetze wie denen zur Energie- und Impulserhaltung aufgestellt, spricht man von theoretischer Modellbildung. Die so erhaltenen Modelle werden auch als White-box-Modelle oder auch *first-Principles-Modell* bezeichnet. Die Modellierung kann sich je nach Aufgabe sehr zeitaufwendig gestalten, da ein umfangreiches Wissen über das System und sämtliche Wechselwirkungen erforderlich ist.

Black-box-Modelle: Ein Modell lässt sich auch aus der Analyse von Eingangs- und Ausgangssignalen gewinnen. Solche Modelle werden auf Grundlage von Messdaten

aus Experimenten erstellt. Sie spiegeln lediglich das Übertragungsverhalten von Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen wider und lassen keine physikalische Deutung auf die dem System innewohnenden physikalischen Zusammenhänge zu.

Grey-box-Modelle: Eine Mischung aus theoretischer Modellbildung und der Analyse des Eingangs- und Ausgangsverhaltens führt zu sogenannten Grey-box-Modellen. Hierfür ist das Wissen über strukturelle physikalische Zusammenhänge des Systems notwendig. Unbekannte Wechselwirkungen zum Beispiel durch unbekannte Störgrößen können durch einen Black-box-Modellierungsansatz als Teilmodell identifiziert werden und mit White-box-Modellen gekoppelt werden.

2.2.2 Modellformen zur Beschreibung von Systemen

Systeme lassen sich anhand der Beschaffenheit der sie beschreibenden Signale in verschiedene Klassen einteilen. Wird ein System von einem Eingangssignal $u \in \mathbb{R}^n$ und einem Ausgangssignal $y \in \mathbb{R}^m$ charakterisiert, so spricht man von einem SISO (single input single output) System. Mehrere Eingangs- und Ausgangssignale beschreiben ein MIMO (multiple input multiple output) System, wobei auch Mischformen (MISO, SIMO) möglich sind. Es können viele weitere Kriterien für die Einteilung von Systemen gefunden werden, zum Beispiel ob die systembeschreibenden Signale zeitvariant oder zeitinvariant sind, ob sie deterministisch oder stochastisch, zeitkontinuierlich oder zeitdiskret sind,[15]. Zeitdiskrete Systeme finden häufig Anwendung, wenn u und y aus einem Satz von Messdaten mit einer Abtastzeit T_a bestehen. Die in dieser Arbeit untersuchten Systeme gehören alle der Klasse der zeitdiskreten Systeme an, wobei innerhalb dieser Gruppe weiterhin unterschieden wird zwischen folgenden drei Unterklassen:

Lineare statische Systeme: Statische Systeme besitzen keinerlei Energiespeicher und zeigen kein zeitveränderliches Systemverhalten. Die Ausgangssignale y können durch Linearkombination der Eingangssignale u mit den Parametern $P \in \mathbb{R}^{m \times n}$ beschrieben werden

$$y = P \cdot u. \quad (2.3)$$

Lineare dynamische Systeme: Lineare dynamische Systeme unterscheiden sich von linearen statischen Systemen, da die Ausgangsgrößen nicht nur von den Eingangsgrößen, sondern bei zeitkontinuierlichen Signalen auch von den Ableitungen der Eingangs- und Ausgangsgrößen abhängen. Sie werden durch Differentialgleichungen beschrieben. Zeitdiskrete lineare dynamische Systeme können dagegen durch die allgemeine Differenzengleichung

$$y(k) = \frac{1}{a_0} \left(\sum_{n=0}^N b_n u(k-n) - \sum_{n=1}^N a_n y(k-n) \right) \quad (2.4)$$

beschrieben werden, wobei $u(k)$ und $y(k)$ dem Eingangs- bzw. Ausgangssignal im Zeitschritt $k = kT_a$, $k \in \mathbb{Z}$ und $u(k+n)$ bzw. $y(k+n)$ dem um $n \in \mathbb{Z}$ Zeitschritte verschobenen Signal entspricht. Dabei entsprechen $a_i \in \mathbb{R}$ und $b_i \in \mathbb{R}$ den Koeffizienten der Differenzengleichung. Eine weitere Beschreibungsform von linearen

zeitdiskreten dynamischen Systemen ist die Zustandsraumdarstellung, sie wird in Kapitel 2.3.2 vorgestellt. Lineare dynamische Systeme stellen die am besten untersuchte Klasse von Systemen dar, da sich die meisten Prozesse durch Modelle dieser Form beschreiben oder annähern lassen.

Nichtlineare statische Systeme: Lineare Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass für sie das Superpositionsprinzip gilt, [13]. Sie können demnach durch einfache Linearkombination wie (2.3) oder durch lineare Differentialgleichungen bzw. Differenzengleichung wie (2.4) beschrieben werden. Für nichtlineare statische Systeme trifft dies nicht zu, für sie gilt allgemein der Zusammenhang

$$y = g(u), \quad (2.5)$$

wobei $g(u)$ keine Ableitungen enthält.

2.3 Parameteridentifikation

Im Idealfall wurde mit den Methoden der Modellbildung ein Modell entwickelt, welches allgemeingültig oder für einen gewünschten Arbeitsbereich das Systemverhalten beschreibt. Wenn mit Hilfe dieses Modells eine Vorhersage über die Ausgangsgrößen des Systems getroffen werden soll und diese Ausgangsgrößen bei gegebenen Eingangsgrößen ein möglichst genaues Abbild des realen Systemverhaltens darstellen sollen, müssen zunächst die Modellparameter identifiziert werden. Für White-box-Modelle sind dies in der Regel physikalisch interpretierbare Parameter, die reale messbare Eigenschaften eines Systems repräsentieren wie beispielsweise Federkonstanten oder Innenwiderstände. Für Black-box-Modelle und unter Umständen auch für Grey-box-Modelle gilt dies nicht, sie werden meist durch mathematische Methoden abgeschätzt. Nachfolgend werden zwei Methoden erläutert, die in dieser Arbeit Anwendung gefunden haben.

2.3.1 Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate geht auf den Mathematiker Carl Friedrich Gauß zurück und dient als Basis für viele weitere Parameteridentifikationsverfahren. Für lineare Systeme wird davon ausgegangen, dass unbekannte Parameter P existieren für einen Satz mit einer Anzahl von $i = 1, \dots, N$ gemessenen Eingangsgrößen u_i und Ausgangsgrößen y_i , die in Matrizenform

$$U = [u_1 \dots u_N] \quad Y = [y_1 \dots y_N] \quad (2.6)$$

zusammengefasst werden. Zur Bestimmung von P sieht das Verfahren dann vor, dass die Modell-Ausgangsgrößen \hat{y}_i mit den realen Messdaten y_i des Systems verglichen werden. Da in der Regel \hat{y}_i von y_i zum Beispiel durch Messrauschen abweicht, kann das Modell nicht genau die gleichen Parameter P besitzen wie das reale System. Für das Modell werden daher die Parameter \hat{P} angenommen. Für die Abschätzung von \hat{P} wird das oft auch Kostenfunktion genannte Gütemaß $J(P)$ eingeführt, für das die Bedingung

$$\hat{P} = \arg \min_P J(P) \quad (2.7)$$

gelten soll. Die Kostenfunktion kann je nach Anwendungsfall unterschiedlich aufgestellt werden, meist wird jedoch die Summe der Fehlerquadrate

$$J(P) = \sum_{i=1}^N \|y_i - \hat{y}_i\|_2^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^T (y_i - \hat{y}_i) = \text{spur}((Y - PU)^T (Y - PU)) \quad (2.8)$$

minimiert, wobei $\|\cdot\|_2$ der euklidischen Norm und $\text{spur}(\cdot)$ der Summe der Hauptdiagonaleinträge entspricht. Unter der Berücksichtigung der Bedingung (2.7) gilt für die geschätzten Parameter

$$\hat{P} = Y(U^T U)^{-1} U^T, \quad (2.9)$$

sofern $U^T U$ invertierbar, also regulär ist. Der Ausdruck $(U^T U)^{-1} U^T$ wird auch als Moore-Penrose-Pseudoinverse bezeichnet und kann beispielsweise durch QR-Zerlegung gelöst werden, [16].

2.3.2 Zustandsraumverfahren 4SID

Die Methode der Subspace-based State-Space System Identification (4SID) ist ein weiteres Verfahren zur Parameterbestimmung anhand von gemessenen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Dieses Verfahren basiert auf den Konzepten der Systemtheorie und errechnet die Parameter A, B, C, D und K des Zustandsraummodells

$$x(k+1) = A x(k) + B u(k) + K e(k) \quad (2.10a)$$

$$y(k) = C x(k) + D u(k) + e(k), \quad (2.10b)$$

welches hier in der zeitdiskreten Variante in Innovationsform aufgeführt ist. Die Systemmatrix A beschreibt das dynamische Verhalten des Systems, die Eingangsmatrix B beschreibt den Einfluss der Eingangsgröße $u(k)$ auf den Zustandsvektor $x(k)$ und die Ausgangsmatrix C bildet die Transformation der Zustände zur Ausgangsgröße $y(k)$ ab. Die Matrix D wird mit Durchgriff bezeichnet und entfällt meist, da dies einer direkten Wirkung von Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen entspricht, was in realen Systemen in der Regel nicht vorkommt. Der Einfluss der Störgrößen $e(k)$ auf die Zustände wird durch die Matrix K beschrieben.

Die prinzipielle Idee des 4SID-Verfahrens besteht darin, zunächst aus den Eingangs- und Ausgangsgrößen einen beliebigen Zustandsvektor abzuschätzen, der in der Lage ist, das Eingangs-/Ausgangsverhalten des Systems abzubilden. Da $u(k)$ und $y(k)$ aus den Messdaten gegeben sind, könnte bei bekanntem Zustandsvektor $x(k)$ mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate der Parametersatz des Zustandsraummodells berechnet werden, wenn davon ausgegangen wird, dass der Fehler $e(k)$ unabhängig von $u(k)$ und $y(k)$ ist. Dieser Zusammenhang lässt sich durch Umformulierung von (2.10) zu

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K \\ 1 \end{bmatrix} e(k) \quad (2.11)$$

leichter erkennen. Da $x(k)$ aber gerade nicht bekannt ist, erfolgt die Abschätzung anhand eines Verfahrens, das sich aus einem umfangreichen Satz mathematischer Werkzeuge bedient. Da hier nur ein kurzer Überblick über die Subspace Identifikation gegeben werden

soll, sei für eine detaillierte Beschreibung an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen, [17]. Der allgemeine Ablauf des Verfahrens durchläuft folgende Schritte:

1. Umformung von Eingangs- und Ausgangssignalen in Block-Hankel-Matrizen
2. Projektion der Ein- und Ausgangsdaten in einen zu den Eingangssignalen orthogonalen Raum
3. Singulärwertzerlegung der Projektion
4. Abschätzung der Systemordnung anhand der Singulärwerte und Zerlegung der Datenmatrizen in Rausch- und Signalunterräume
5. Bestimmung der erweiterten Beobachtbarkeitsmatrix
6. Parameterabschätzung aus der erweiterten Beobachtbarkeitsmatrix

Die Abschätzung der Systemordnung kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen. Neben verschiedenen Methoden zum automatischen Auffinden der am besten geeigneten Systemordnung kann diese auch manuell festgelegt werden. Stehen dem Anwender a-priori Informationen zur Abschätzung der Systemordnung zur Verfügung, können durch geeignete Wahl der Systemordnung eventuell bessere Simulationsergebnisse erzielt werden, als wenn ein Verfahren eine viel höhere Systemordnung vorgibt.

Die Implementierung des 4SID Verfahrens in MATLAB durch die Funktion `n4sid` stellt eine einfach zu handhabende Methode zur Parameteridentifikation von linearen zeitdiskreten Zustandsraummodellen dar, die keine tief gehende Kenntnis der im Verfahren verwendeten mathematischen Werkzeuge voraussetzt. Als Funktionsparameter werden lediglich ein Datensatz mit Eingangs- und Ausgangssignalen verlangt sowie die Festlegung, ob die Systemordnung durch das Verfahren selbst bestimmt werden soll oder durch den Anwender.

3 Strukturierte Modellbildung

Das nachfolgende Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die Struktur der untersuchten Wärmeversorgungsanlage und beschreibt, welchen Randbedingungen das entworfene Modell unterliegt. Abschließend wird das Gesamtmodell des Heizsystems vorgestellt und die mathematischen Gleichungen der Teilmodelle werden erläutert.

3.1 Charakterisierung der Wärmeversorgungsanlage

Die Wärmeversorgungsanlage der LMT Group Schwarzenbek beinhaltet drei dezentral angeordnete Erzeugergruppen, die Wasser mit definierter Vorlauftemperatur an verschiedenen Punkten eines Wärmeversorgungsrings einspeisen. In den hydraulischen Kreisen der Erzeuger sind Umlöpfumpen installiert, die das Wasser in den Vorlauf des Versorgungsrings pumpen. Sämtliche Verbraucher beziehen ihre Vorlauftemperatur aus dem Versorgungskreis und speisen Wasser mit unterschiedlichen Rücklauftemperaturen in den Kreis zurück. Das Zusammenspiel aus dezentraler Energieversorgung und strukturell unterschiedlichen Verbrauchertypen bildet eine komplexe Wärmeversorgungsanlage, die im Folgenden genauer charakterisiert werden soll.

3.1.1 Aufbau der Anlage

Der Wärmeversorgungsrings besteht aus einer Vorlauf- und einer Rücklaufleitung, die parallel verlaufen und in einem geschlossenen Ring über das gesamte Betriebsgelände führen, was in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist. An mehreren Stellen des Rings sind Heizkreisverteiler installiert, über welche Verbraucher und Erzeuger das benötigte Vorlauf- bzw. Rücklaufwasser aus dem Versorgungsrings beziehen. Abbildung 3.1 veranschaulicht, an welchen Stellen die Erzeuger Warmwasser einspeisen und Verbraucher Warmwasser beziehen.

Die drei Erzeugergruppen bestehen aus folgenden Komponenten:

- Heizzentrale 1 (HZ1): Drei Kessel in Kaskadenschaltung, 2x Gaskessel Viessmann Vitorond 200 und 1x Gaskessel Viessmann Vitorond mit einer Gesamtheizleistung von 600 kW
- Heizzentrale 2 (HZ2): Ein Kessel Buderus GE 615 660 mit einer Leistung von 740 kW
- Kompressor: Vier Kompressoren in Kaskadenschaltung, 1x CompAir L80, 1x Mannesmann Demag Regatta 201A, 1x Kaeser ESD 352, 1x Kaeser DSD 281

Die HZ1 sichert die Wärmegrundversorgung und wird den Großteil des Jahres entweder für die Warmwasserversorgung und/oder für die Heizwärmeverersorgung beansprucht. Die Kompressoren erzeugen Druckluft, die für verschiedene Produktionsprozesse des Werks benötigt wird. Dabei entsteht Abwärme, die mit Hilfe von Wärmetauschern genutzt wird, um das Wasser des Rücklaufkreises auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben und

Warmwasser mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 72 °C in den Versorgungsring einzuspeisen. Die Laufzeit der Kompressoren und damit auch deren Beitrag zur gesamten Heizleistung ist stark von den Produktionszeiten des Betriebes abhängig. In den Sommermonaten kann die Wärmeleistung der vier Kompressoren allein sogar zur Warmwassererzeugung ausreichen. Die HZ2 wird als Wärmeerzeuger dazugeschaltet, wenn die Heizleistungen von der HZ1 und den Kompressoren nicht ausreichen.

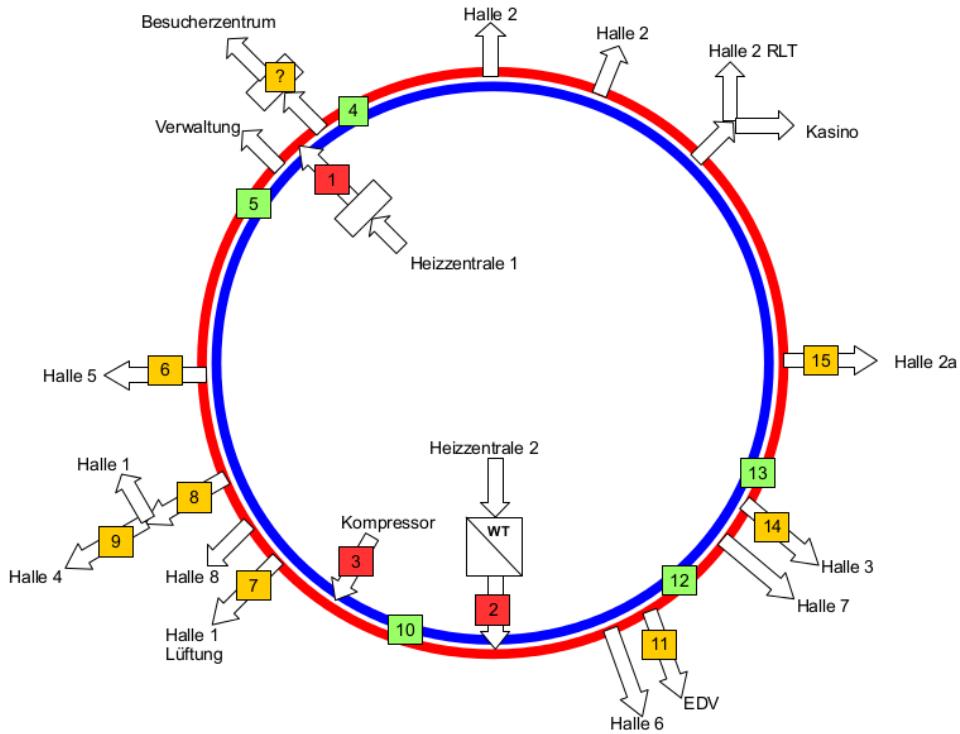


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Heizanlage, [2]

Über den Versorgungsring werden zehn Hallen unterschiedlicher Größe sowie mehrere Bürogebäude und die Kantine mit Warmwasser beliefert. Der Wärmebedarf unterscheidet sich je nach Verbraucherart deutlich: Einige Produktionshallen benötigen durch die Abwärme der Maschinen während des Betriebes keine zusätzliche Heizwärme, müssen bei Produktionsstillstand jedoch auf einer Raumtemperatur von 20 - 22 °C gehalten werden, um die Präzision der Maschinen zu gewährleisten.

Je nachdem, welche Erzeuger gerade in den Wärmeversorgungsring einspeisen und wie groß der Wärmebedarf der Verbraucher ist, kommt es im Ring zu unterschiedlichen Betriebsmodi, da sich die Flussrichtung im Ring an bestimmten Punkten umkehren kann. In Kapitel 3.1.4 wird darauf genauer eingegangen.

3.1.2 Verfügbare Messdaten

Wärmemengenzähler wurden an insgesamt fünf Stellen des Versorgungsringes, an jedem der drei Erzeugergruppen sowie an fünf Verbrauchern durch die Firma Plenum Ingenieurge-

sellschaft mbH angebracht. Die Wärmemengenzähler zeichnen Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur und Massen- bzw. Volumenströme mit einer Abtastzeit von $T_a = 60$ Sekunden auf. Seit dem 1. Oktober 2015 existieren Messdaten, welche durch die IngSoft GmbH online bereitgestellt werden. Abbildung 3.2 zeigt die Positionierung der Messstellen. Zu beachten ist, dass nicht für jeden Verbraucher Wärmemengenzähler installiert wurden. Dadurch wird der Wärmebedarf einiger Verbraucher nicht messtechnisch erfasst und kann nur indirekt aus dem zeitlichen Wärmeleistungsverlauf im Ring abgeschätzt werden.

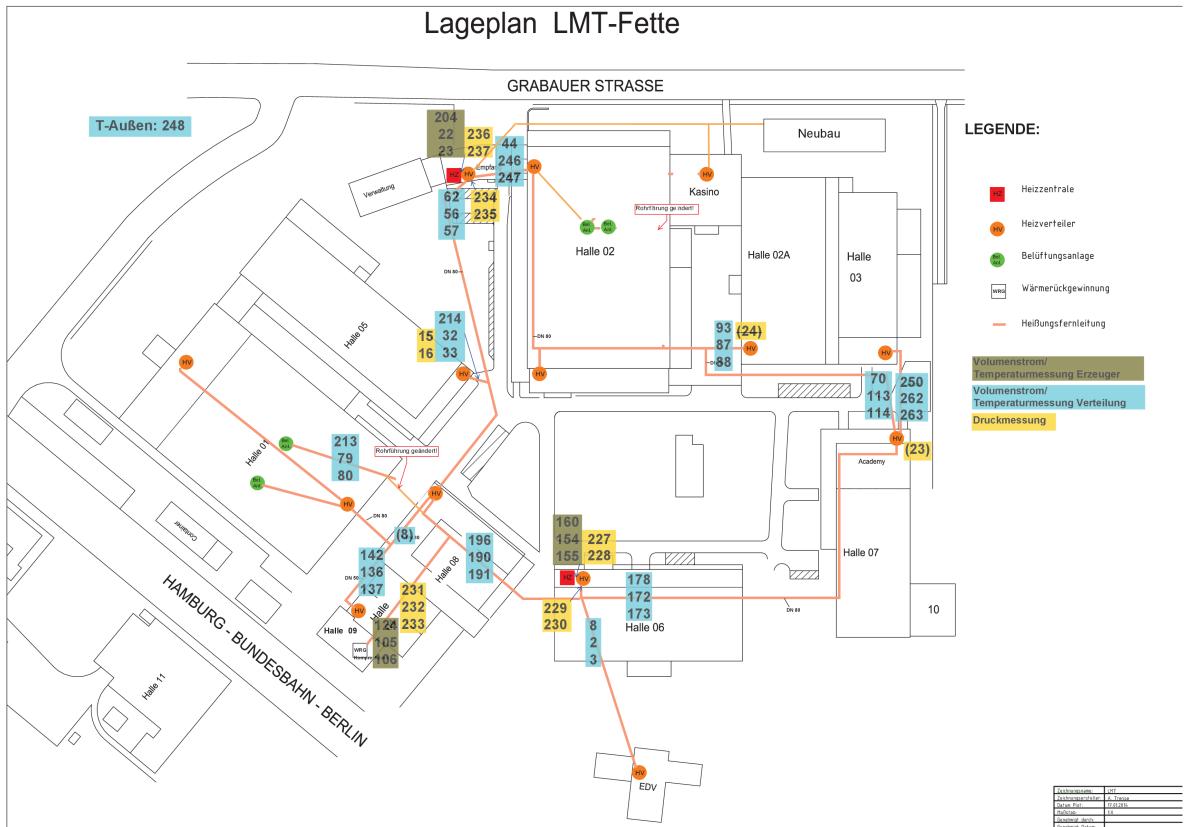


Abbildung 3.2: Lageplan der Messtellen,[3]

3.1.3 Strukturbild der Anlage

Da für fünf Punkte des Rings Messdaten aus Wärmemengenzählern zur Verfügung stehen, wurde zur Modellbildung das System vereinfacht als Fünfeck betrachtet, an dessen Ecken die drei Zustandsgrößen Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur und Volumenstrom existieren. Abbildung 3.3 zeigt das vereinfachte Strukturbild der Anlage. An verschiedenen Stellen entlang der Kanten des Fünfecks speisen die Erzeuger ein und Verbraucher beziehen die benötigte Vorlauftemperatur aus dem Fünfeck. Gibt es mehrere Verbraucher zwischen zwei Eckpunkten des Fünfecks, so werden diese zu einem Gesamtverbraucher zusammengefasst. In der Arbeit werden die Eckpunkte des Fünfecks als $P_1 \dots P_5$ bezeichnet, nummeriert im Uhrzeigersinn beginnend mit Punkt P_1 in der rechten oberen Ecke.

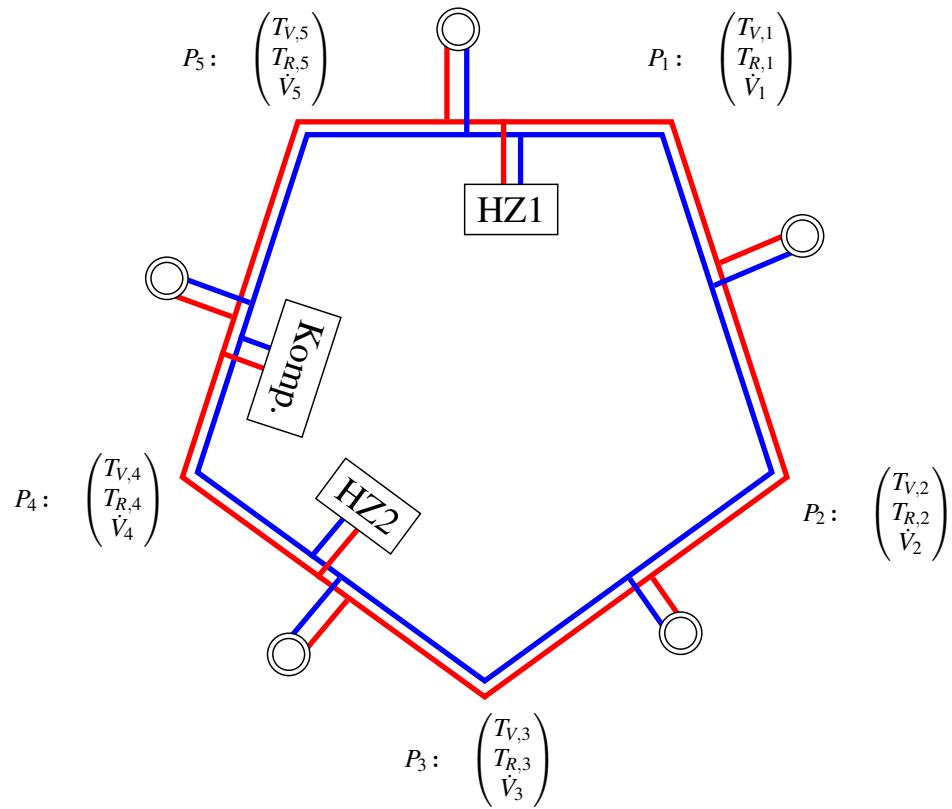


Abbildung 3.3: vereinfachtes Strukturbild der Anlage

3.1.4 Betriebsmodi der Anlage

Verschiedene Faktoren bewirken an einigen Punkten des Wärmeversorgungsrings eine Änderung der Fließrichtung. Die Umkehr der Fließrichtung wird in den Messdaten durch eine Vorzeichenumkehr des Volumen- bzw. Massenstroms abgebildet. Im Versorgungsrings entsprechen positive Volumenströme einer Fließrichtung im Uhrzeigersinn, negative Volumenströme einer Fließrichtung gegen den Uhrzeigersinn. Welches Vorzeichen der Volumenstrom in jedem der Eckpunkte der als Fünfeck vereinfachten Wärmeversorgungsanlage zu einem gegebenen Zeitpunkt besitzt, bestimmt den in den nachfolgenden Kapiteln Betriebsmodus genannten Zustand der Anlage. Wird für alle Punkte P_i angenommen, dass zu jedem Zeitpunkt entweder ein positiver oder ein negativer Volumenstrom existiert, können sich theoretisch $2^5 = 32$ verschiedene Betriebsmodi einstellen. Die Anzahl der tatsächlich beobachteten Betriebsmodi liegt jedoch weit unter dieser Zahl, wie in Kapitel 3.2.1 genauer erläutert wird.

Für die Modellbildung spielt die Fließrichtung eine entscheidende Rolle. Die Wechsel der Betriebsmodi, also die Änderung der Fließrichtungen in mindestens einem Punkt, lassen sich dabei durch zwei unterschiedliche Effekte erklären.

Intrinsische Änderung der Fließrichtung

Der Volumenstrom des Wassers im Versorgungsring wird durch den Betrieb der Erzeuger- und Verbraucherpumpen bestimmt. So kann es vorkommen, dass sich an einigen Punkten des Versorgungsringes die Fließrichtung des Wassers umkehrt, wenn eine Änderung der Pumpleistung erfolgt. Dies geschieht beispielsweise, wenn eine Heizzentrale eingeschaltet wird, da das im Kessel erwärmte Wasser mit dem von der Umlölpumpe des Erzeugerkreises vorgegebenen Volumenstrom in den Versorgungsring eingespeist wird. Wird die Heizzentrale abgeschaltet, stellt auch die Pumpe den Betrieb ein, um kein kaltes Wasser in den Vorlauf des Versorgungsringes einzuspeisen.

Änderung der Fließrichtung durch Abriegelung des Rings

Neben der Umkehr der Fließrichtung, die durch Erzeuger- und Verbraucherpumpen beeinflusst wird und sich im laufenden Betrieb einstellt, kann der Ring ein unterschiedliches hydrodynamisches Verhalten durch Eingriffe der Haustechnik aufweisen. So wurde im Winter 2015/2016 die Entscheidung getroffen, den Versorgungsring mit Hilfe eines Schiebers an der Stelle zwischen Halle 7 und Halle 6 und teilweise auch zwischen Halle 8 und Halle 5 (siehe Abbildung 3.2) zu unterbrechen. Die daraus resultierenden veränderten Volumenströme beschreiben ein anderes Systemverhalten, was in der Modellbildung berücksichtigt werden muss.

3.2 Randbedingungen

Für die Modellbildung und anschließende Validierung wurden hauptsächlich Messdaten aus dem Zeitraum vom 11. April 2016 bis 05. August 2016 genutzt. Diese Einschränkung wurde vor allem auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Betriebsmodi des Ringes getroffen, was im Folgenden genauer erläutert wird.

3.2.1 Untersuchte Modi

Die in dieser Arbeit durchgeführte Modellbildung sollte in erster Linie das Systemverhalten des geschlossenen Wärmeversorgungsringes untersuchen. Zwischen Halle 6 und Halle 7 wurde der Ring bis zum 11. April 2016 durch einen Schieber getrennt, wodurch das System ein anderes Systemverhalten aufweist. Messdaten vor dem 11. April 2016 wurden daher nicht zur Parameteridentifikation genutzt.

Von den in 3.1.4 erwähnten 32 theoretisch möglichen Betriebsmodi stellten sich im untersuchten Zeitraum nur drei unterschiedliche Modi ein. Tabelle 1 zeigt die beobachteten Modi, wobei die positiven Volumenströme am entsprechenden Punkt mit einem + und negative Volumenströme mit einem - gekennzeichnet sind. Da die HZ2 zu diesem Zeitpunkt aufgrund von milden Außentemperaturen schon nicht mehr im Betrieb war, konnte der Einfluss der HZ2 ebenfalls nicht mehr genauer untersucht werden.

Tabelle 1: Beobachtete Betriebsmodi im untersuchten Zeitraum

Betriebsmodus	\dot{V}_1	\dot{V}_2	\dot{V}_3	\dot{V}_4	\dot{V}_5
1	+	+	+	+	-
2	+	+	-	+	-
3	+	+	-	+	+

3.2.2 Qualität der Messdaten

Bei der Auswertung der Daten hat sich gezeigt, dass einige Durchflussmessungen mit falscher oder gar ohne Kalibrierung durchgeführt werden. Die genutzten Messdaten wurden nach Empfehlung der Plenum Ingenieurgesellschaft mit Korrekturfaktoren versehen, [18]. Einzelne Durchflusswerte, die keinen Messwert (NaN) oder unplausible Messwerte im Bereich $\pm 10^5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ aufweisen, wurden durch lineare Interpolation mit Hilfe des Matlab-Befehls `interp1` ersetzt.

Die Volumenströme an den Punkten P_2 und P_3 des Fünfecks sind mit großen Unsicherheiten behaftet, was von der Plenum Ingenieurgesellschaft an P_2 mit suboptimaler Anbringung der Sensoren und an Punkt P_3 mit stark wechselnden Änderungen der Fließrichtung begründet wurde, [19]. Die Vor- und Rücklauftemperaturen an den Punkten P_1 und an der Messstelle zur HZ1 zeigen ca. 5 °C niedrigere Temperaturen als erwartet an, was darauf zurückzuführen ist, dass die Messstellen aufgrund der baulichen Gegebenheiten vor Ort nicht optimal angebracht werden konnten und die Tauchfühler nicht vollständig in das Rohr eintauchen. Da keine Referenzwerte zu den Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der genannten Stellen existieren, wurde keine Offsetbereinigung durchgeführt.

3.3 Modellbeschreibung

Das Modell der Wärmeversorgungsanlage soll später Teil eines prädiktiven Reglers sein. Bei der Modellentwicklung wurde besonderer Augenmerk darauf gelegt, eine Anpassung des Modells an die verschiedenen Betriebsmodi zu ermöglichen. Mit Hilfe des Modells ist es möglich, die drei beobachtbaren Zustandsgrößen Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur und Volumenstrom jedes Knotenpunktes P_i mit $i = 1, \dots, 5$ des Fünfecks für die nächsten sieben Tage zu berechnen. Das Gesamtmodell setzt sich dabei aus drei Teilmodellen zusammen:

- einem statischen Teilmodell, das die Hydrodynamik des Systems - also die Volumenströme \dot{V}_i - abbildet
- einem dynamischen Teilmodell, welches die thermodynamischen Zustandsgrößen berechnet und wiederum unterteilt ist in zwei Teilmodelle:
 - ein Modell zur Berechnung der Vorlauftemperatur $T_{V,i}$ in Abhängigkeit vom Betriebsmodus bzw. zur Fließrichtung des Volumenstroms,

- ein Verbrauchermodell zur Berechnung der Wärmeleistung \dot{Q}_i , in das die Abhängigkeit zur Außentemperatur T_A einfließt.

Damit sind alle Größen zur Berechnung der Rücklauftemperatur $T_{R,i}$ nach (2.2) bekannt, so dass diese anhand einer statischen nichtlinearen Funktion berechnet werden kann.

In Tabelle 2 sind die Eingangs-, Ausgangs- sowie Störgrößen des Modells aufgeführt. Als Teil eines prädiktiven Reglers würden $T_{V,HZi}$ und \dot{V}_{HZi} von einem Kesselmodell vorgegeben werden. Die Vorlauftemperatur und der Volumenstrom des Kompressors wird ebenfalls zur Berechnung der Zustände des Modells benötigt, allerdings wird der Kompressor in Abhängigkeit zur Produktion betrieben und ist somit nicht regelbar. Die Inputs des Kompressors werden daher im weiteren Verlauf als messbare Störgrößen betrachtet.

Tabelle 2: Eingangs- und Ausgangsgrößen des Modells

Eingangsgrößen	$T_{V,HZ1}, T_{V,HZ2}, \dot{V}_{HZ1}, \dot{V}_{HZ2}, T_A$
Ausgangsgrößen	$T_{V,i}, \dot{V}_i, T_{R,i}$
Störgrößen	$T_{V,Kompressor}, \dot{V}_{Kompressor}$

3.3.1 Statisches Volumenstrommodell

Die Untersuchung der Volumenströme im Versorgungsring hat ergeben, dass das System anhand eines statischen Modells

$$(\dot{V}_1 \quad \dot{V}_2 \quad \dot{V}_3 \quad \dot{V}_4 \quad \dot{V}_5) = (\dot{V}_{HZ1} \quad \dot{V}_{HZ1} \quad \dot{V}_{Kompressor}) \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ausreichend genau beschrieben werden kann. Lange Rohrleitungen über das Gelände und eine Veränderung des Rohrvolumens in den Heizkreisverteilern entsprechen zwar hydrodynamischen Energiespeichern, die ein dynamisches Volumenstrommodell rechtfertigen könnten. Die Annäherung durch ein statisches Modell innerhalb des Abtastzeitraums von 60 Sekunden zeigt jedoch ausreichende Genauigkeit, um als Modell für einen Regler genutzt zu werden. Die Berechnung der Volumenströme erfolgt zudem entkoppelt von den thermodynamischen Zustandsgrößen des Wärmeversorgungsringes, da die Temperaturabhängigkeit der Druckverluste entlang der Rohre ebenfalls für den betrachteten Abtastzeitraum vernachlässigt werden kann.

3.3.2 Modell der Vorlauftemperatur

Die Vorlauftemperatur $T_{V,i}$ wird in Abhängigkeit zur Fließrichtung des Heizwasserstroms über die Vorlauftemperatur des zuvor durchflossenen Punktes oder durch die Vorlauf-

temperatur eines Erzeugers oder mehrerer Erzeuger berechnet. Damit ergeben sich fünf zeitdiskrete Zustandsraummodelle

$$x_{V,i}(k+1) = A_{V,i} x_{V,i}(k) + B_{V,i} u_{V,i}(k) + K_{V,i} e_{V,i}(k), \quad (3.2a)$$

$$y_{V,i}(k) = C_{V,i} x_{V,i}(k) + e_{V,i}(k), \quad (3.2b)$$

für die fünf Vorlauftemperaturen

$$T_{V,i} = y_{V,i}. \quad (3.3)$$

Die Systemmatrizen $A_{V,i}$, $B_{V,i}$, $C_{V,i}$ und $K_{V,i}$ werden mit Hilfe der in 2.3.2 beschriebenen Methode der Subspace Identifikation aus Messdaten geschätzt mit einer vorgegebenen Systemordnung der Größe 2. Dabei entspricht $x_{V,i}$ dem Zustandsvektor, der aufgrund der Black-box-Identifikation keinerlei physikalische Interpretierbarkeit besitzt. Der Störgrößenvektor $e_{V,i}$ entspricht einem weißen Rauschen mit einer konstanten Varianz, welche ebenfalls durch die Methode der Subspace Identifikation abgeschätzt wird. In allen untersuchten Modi wird $T_{V,1}$ lediglich durch die Vorlauftemperatur $T_{V,HZ1}$ der HZ1 beeinflusst, so dass für $i = 1$

$$u_{V,i} = T_{V,HZ1} \quad (3.4)$$

gilt. Für $T_{V,4}$ überwiegt im beobachteten Zeitraum der Einfluss der Wärmeleistung des Kompressor und der HZ2, daher wird für $i = 4$ die Eingangsgröße beschrieben durch

$$u_{V,i} = \begin{pmatrix} T_{V,Kompressor} \\ T_{V,HZ2} \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Für die Beschreibung von $T_{V,2}$, $T_{V,3}$ und $T_{V,5}$ werden je nach Fließrichtung verschiedene Eingangsgrößen

$$u_{V,i} = \begin{cases} T_{V,i-1} & \text{für } \dot{V}_i > 0 \\ T_{V,i+1} & \text{für } \dot{V}_i < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

für $i = 2, 3$ sowie

$$u_{V,i} = \begin{cases} T_{V,i-1} & \text{für } \dot{V}_i > 0 \\ T_{V,HZ1} & \text{für } \dot{V}_i < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

für $i = 5$ genutzt.

3.3.3 Modell der Wärmeleistung

Die Wärmeleistung \dot{Q}_i an jedem Punkt des Fünfecks wird anhand der Vorlauftemperatur $T_{V,i}$ im selben Punkt und der Außentemperatur T_A berechnet. Das Modell wird durch das Zustandsraummodell

$$x_{q,i}(k+1) = A_{q,i} x_{q,i}(k) + B_{q,i} u_{q,i} + K_{q,i} e_{q,i}(k), \quad (3.8a)$$

$$y_{q,i}(k) = C_{q,i} x_{q,i}(k) + e_{q,i}(k) \quad (3.8b)$$

beschrieben mit den Eingangsgrößen

$$u_{q,i} = \begin{pmatrix} T_A \\ T_{V,i} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

und den Ausgangsgrößen

$$\dot{Q}_i = y_{q,i} \quad (3.10)$$

für jeweils $i = 1, \dots, 5$. Die Parameter $A_{q,i}$, $B_{q,i}$, $C_{q,i}$ und $K_{q,i}$ des zeitdiskreten Zustandsraummodells werden ebenfalls mittels Subspace Identifikation ermittelt, die Systemordnung wird durch den Algorithmus abgeschätzt. Dabei beschreibt $x_{q,i}$ analog zu (3.2) den Zustandsvektor und $e_{q,i}$ den Störgrößenvektor. Bei diesem Ansatz spiegelt sich der Verlauf des Wärmebedarfs der Verbraucher lediglich durch eine Außen temperaturabhängigkeit wieder.

Ein weiterer Ansatz bestand in der Abschätzung von Wärmeprofilen. Dazu wurden die Wärmemleistungen, welche die Verbraucher aus dem Versorgungskreis entziehen, über einen vorgegebenen Zeitraum gemittelt. Die gemittelten Werte sollten idealerweise eine geringe Abweichung vom tatsächlich gemessenen Wärmebedarf aufweisen, um eine brauchbare Vorhersage des Verbraucherverhaltens zu liefern. Durch die sehr große Streuung der gemessenen Wärmebedarfe wiesen die gemittelten Werte allerdings hohe Standardabweichungen auf, daher wurde dieser Ansatz verworfen. Die Schätzung des Wärmebedarfs anhand einer Black-box liefert zwar bessere, aber insgesamt ebenfalls recht ungenaue Simulationsergebnisse, was in 4.2.3 genauer beleuchtet wird.

3.3.4 Modell der Rücklauftemperatur

Gemäß (2.2) gilt für die Temperaturdifferenz an jedem Knotenpunkt des Fünfecks

$$\Delta T_i = T_{V,i} - T_{R,i} = \frac{\dot{Q}_i}{c_w \cdot \rho \cdot \dot{V}_i}. \quad (3.11)$$

Aus \dot{Q}_i , \dot{V}_i und $T_{V,i}$ kann nun direkt $T_{R,i}$ berechnet werden mittels

$$T_{R,i} = T_{V,i} - \frac{\dot{Q}_i}{c_w \cdot \rho \cdot \dot{V}_i} \quad \text{für } i = 1, \dots, 5. \quad (3.12)$$

In diesem Modell spiegelt sich die Nichtlinearität des Systems wider, wobei durch vorherige Berechnung von $T_{V,i}$, \dot{V}_i und \dot{Q}_i eine statische Nichtlinearität angenommen wird.

Ein zweiter Ansatz bestand darin, die Temperaturdifferenz ΔT_i über das Verfahren der Subspace Identifikation abzuschätzen. Dieser Ansatz entspricht einer Linearisierung des nichtlinearen Zusammenhangs, der in (3.11) ersichtlich ist. Das Modell wird beschrieben durch das Zustandsraummodell

$$x_{\Delta T,i}(k+1) = A_{\Delta T,i} x_{\Delta T,i}(k) + B_{\Delta T,i} u_{\Delta T,i} + K_{\Delta T,i} e_{\Delta T,i}(k), \quad (3.13a)$$

$$y_{\Delta T,i}(k) = C_{\Delta T,i} x_{\Delta T,i}(k) + e_{\Delta T,i}(k) \quad (3.13b)$$

mit den Eingangsgrößen

$$u_{\Delta T,i} = \begin{bmatrix} \dot{Q}_i & \frac{1}{c_w \rho} \dot{V}_i \end{bmatrix}^T \quad (3.14)$$

und den Ausgangsgrößen

$$\Delta T_i = y_{\Delta T,i} \quad (3.15)$$

für jeweils $i = 1, \dots, 5$. Hierbei entspricht $x_{\Delta T,i}$ dem Zustandsvektor des zeitdiskreten Zustandsraummodells. Für dieses Modell werden die Parameter $A_{\Delta T,i}$, $B_{\Delta T,i}$, $C_{\Delta T,i}$ und $K_{\Delta T,i}$ ebenfalls durch Subspace Identifikation ermittelt, ebenso wie die Varianz zum Störvektor $e_{\Delta T,i}$. Die Rücklauftemperaturen lassen sich für diesen zweiten Modellansatz dann berechnen durch

$$T_{R,i} = T_{V,i} - \Delta T_i \quad \text{für } i = 1, \dots, 5. \quad (3.16)$$

Ein Vergleich der beiden Modelle wird in 4.3.2 angestellt.

3.3.5 Blockschaltbilder

Abbildung 3.4 zeigt ein Strukturbild des Gesamtmodells. In Teilmodellen werden die Vorlauftemperaturen, Volumenströme, Wärmeleistungen und die Rücklauftemperaturen berechnet.

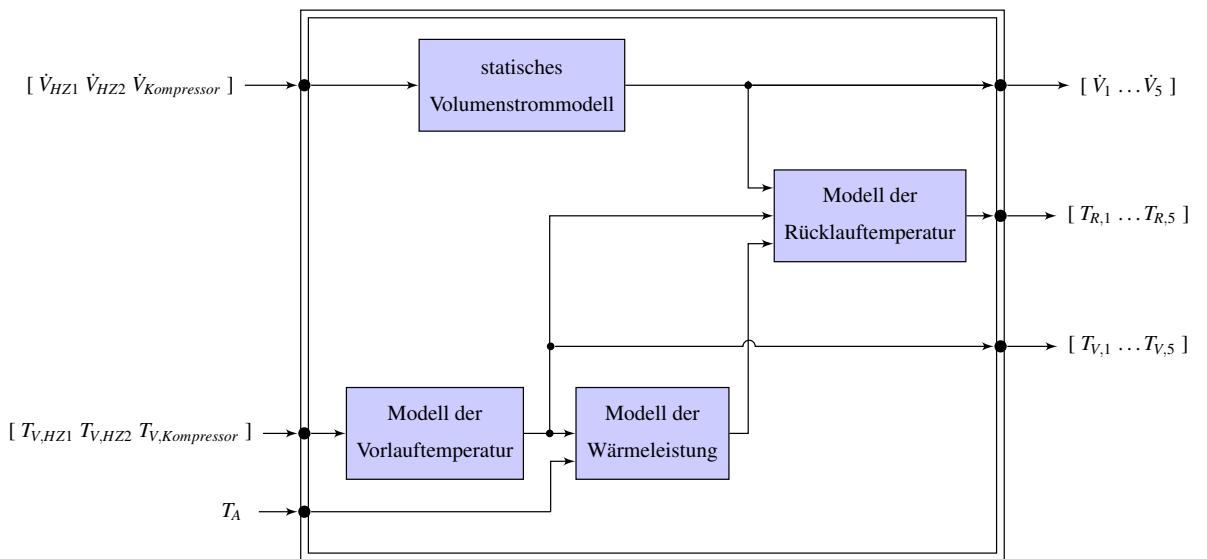


Abbildung 3.4: Strukturbild des Gesamtmodells

Das Blockschaltbild des Teilmodells der Vorlauftemperatur ist in Abbildung 3.5 gezeigt, hier am Beispiel des Betriebsmodus 1. Für andere Betriebsmodi können sich die Eingangssignale entsprechend (3.2) je nach Fließrichtung ändern. Abbildung 3.6 zeigt das Blockschaltbild des Teilmodells der Wärmeleistung.

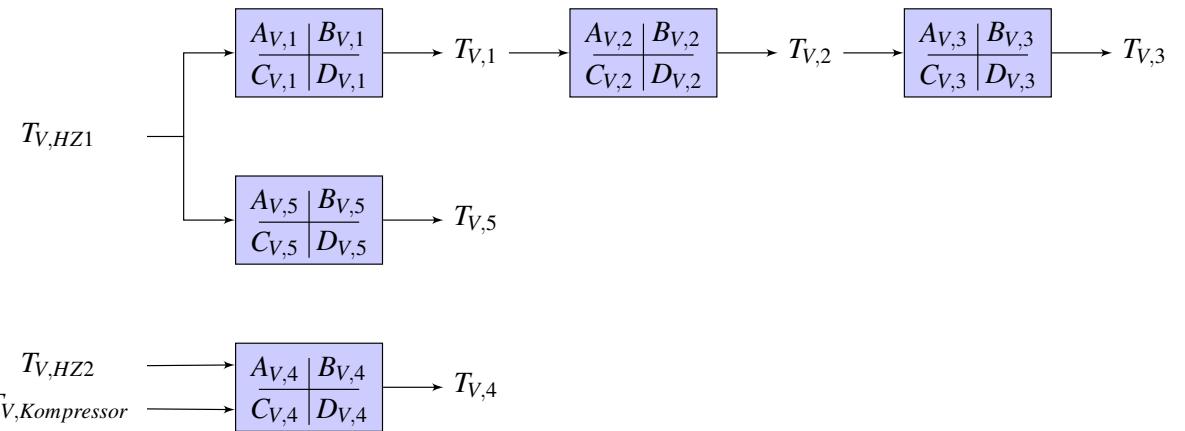


Abbildung 3.5: Blockschaltbild des Teilmodells der Vorlauftemperatur

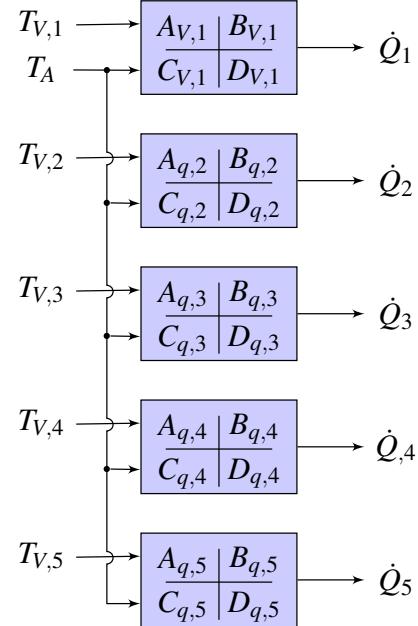


Abbildung 3.6: Blockschaltbild des Teilmodells der Wärmeleitung

4 Parameteridentifikation und Validierung

Dieses Kapitel beschreibt die Parameteridentifikation der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Modelle. Um zu überprüfen, ob und wie gut die parametrisierten Modelle das Systemverhalten widerspiegeln, wurde im Anschluss an die Parametrisierung eine Validierung durchgeführt, also eine Bestätigung der Modellresultate durch den Vergleich von gemessenen und simulierten Daten. Simulation oder Vorhersage bezeichnet dabei im weiteren Verlauf der Arbeit die Berechnung der Ausgangsgrößen eines Modells anhand von Eingangsgrößen und den entsprechenden Parametern. Die Ergebnisse der Validierung sowie die Simulationsergebnisse des Gesamtmodells werden im Anschluss an die Parameteridentifikation vorgestellt und erläutert.

4.1 Parameteridentifikation der Teilsysteme

Die in 3.3 vorgestellten Modelle beschreiben zunächst nur allgemein das Systemverhalten der Wärmeversorgungsanlage. Um das Verhalten der Anlage bei gegebenen Eingangsgrößen möglichst genau vorhersagen zu können, müssen die Parameter der Zustandsraummodelle und des statischen Volumenstrommodells ermittelt werden.

Die für die Parametrisierung jedes Teilmodells genutzten Eingangs- und Ausgangsgrößen bestehen aus einem Satz von Messdaten, der über einen Zeitraum von 72 Stunden mit einer Abtastzeit von 60 Sekunden aufgenommen wurde. Die über diesen Zeitraum erhaltenen Modellparameter zeigen für einige Tage ausreichend genaue Simulationsergebnisse, wobei eine größer werdende Abweichung zwischen Simulations- und Messdaten zu erkennen ist, je weiter die Parametrisierung in der Vergangenheit liegt. Daher wurde für das Modell ein adaptiver Ansatz gewählt, bei dem in regelmäßigen Abständen eine erneute Parametrisierung der Teilmodelle stattfindet, um eine eventuelle Veränderung des Systemverhaltens abbilden zu können. Vorgabe für das Gesamtmodell war eine hinreichend genaue Vorhersage für einen Zeitraum von sieben Tagen.

Um eine Abschätzung der Qualität der Parameter zu erhalten, wurde als Gütemaß der Grad der Übereinstimmung zwischen Simulationsdaten y und Messdaten y_{mess} durch den Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

$$\text{fit} = 100 \cdot \left(1 - \frac{\|y_{mess} - y\|_2}{\|y_{mess} - \hat{y}_{mess}\|_2} \right) \quad (4.1)$$

über die Matlab Funktion `goodnessOfFit` ermittelt. Dabei entspricht \hat{y}_{mess} dem arithmetischen Mittelwert der Messdaten und $\|x\|_2$ der euklidischen Norm

$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N |x_i|^2}. \quad (4.2)$$

Eine perfekte Übereinstimmung wird durch einen Wert von $fit = 100\%$ ausgedrückt. Je negativer fit , desto schlechter ist die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

Tabelle 3: Übersicht über die NRMSE Übereinstimmung für das parametrisierte Volumenstrommodell zu verschiedenen Zeiträumen

Validierungszeitraum	NRMSE in %				
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
16.04. - 23.04.	43.64	24.72	-9.49	-21.64	46.65
14.05. - 21.05.	22.94	47.34	-29.03	-50.49	15.37
27.05. - 03.06.	31.59	26.88	-69.82	-55.46	35.54
16.06. - 23.06.	28.21	13.76	8.66	-29.15	10.04

4.1.1 Parametrisierung des statischen Volumenstrommodells

Das Volumenstrommodell nach (3.1) wurde durch Lösung des Minimierungsproblems nach der Methode der kleinsten Quadrate parametrisiert. Hierfür wurde die MATLAB Funktion `mldivide` bzw. der Operator $\cdot \backslash \cdot$ genutzt, welcher zur Lösung des Problems eine QR-Zerlegung nutzt, [20]. Tabelle 3 zeigt die Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten für verschiedene Zeiträume. Die schlechten Übereinstimmungswerte für V_3 und V_4 werden im Kapitel 4.2.1 diskutiert.

4.1.2 Parametrisierung der dynamischen Teilmodelle

Für die Vorlauftemperatur wurde wie in Kapitel 3.3.2 erwähnt eine Systemordnung von $n = 2$ vorgegeben. Die Funktion `n4sid` der SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX von MATLAB errechnet mit der Option 'best' die Systemordnung selbstständig, wobei die so ermittelten Systemordnungen für die Vorlauftemperatur in der Regel zwischen $n = 2$ und $n = 6$ lagen. Tabelle 4 zeigt, dass zwischen den Simulationsergebnissen bei automatisch ermittelter Systemordnung und einer vorgegebenen Systemordnung von $n = 2$ keine signifikant besseren Vorhersageergebnisse erzielt werden können. In einigen Fällen war die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messdaten bei höherer Systemordnung sogar schlechter.

Tabelle 4: Vergleich der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messdaten anhand des NRMSE bei verschiedenen Vorgaben der Systemordnung. Die Simulation wurde mit Messergebnissen aus dem Zeitraum vom 16.04.2016 - 23.04.2016 verglichen.

Systemordnung	NRMSE in %				
	$T_{V,1}$	$T_{V,2}$	$T_{V,3}$	$T_{V,4}$	$T_{V,5}$
$n = 2$	83.17	-12.11	25.24	52.53	80.34
$n = \text{'best'}$	84.54	9.735	27.19	72.92	59.55

Das Modell der Wärmemenge wurde ebenfalls mit Hilfe der `n4sid` Funktion parametriert. Allerdings wurde hier auf eine Festlegung der Systemordnung verzichtet und die von der Funktion ermittelte Systemordnung genutzt.

4.2 Validierung der Teilsysteme

Die Validierung der parametrisierten Modelle erfolgte durch einen Vergleich von Messdaten und Vorhersageergebnissen. Zu diesem Zweck wurden als Modelleingangsgrößen Daten verwendet, die nicht aus demselben Zeitraum stammen, der für die Parametrisierung genutzt wurde.

4.2.1 Volumenstrom

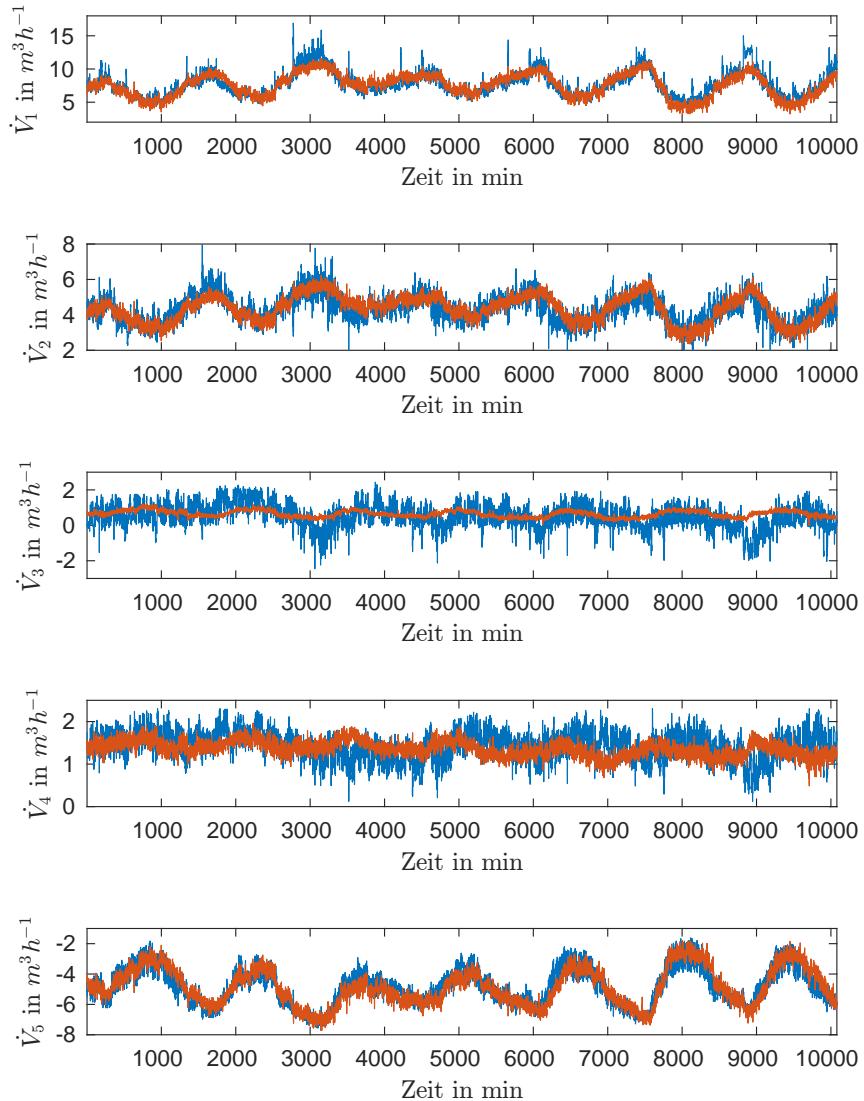


Abbildung 4.1: Ergebnis der Simulation von \dot{V}_1 bis \dot{V}_5 . Vergleich von Messdaten (blau) und berechneten Werten (orange).

Abbildung 4.1 zeigt die mit Hilfe des statischen Teilmodells simulierten Volumenströme $\dot{V}_1 \dots \dot{V}_5$ für einen Zeitraum von sieben Tagen. Für \dot{V}_1 , \dot{V}_2 und \dot{V}_5 lassen sich gute Si-

mulationsergebnisse erzielen, während \dot{V}_3 und \dot{V}_4 teilweise starke Abweichungen von den Messwerten zeigen. Bei diesen Messstellen werden insgesamt geringere Volumenströme als an den anderen Punkten des Fünfecks gemessen, weshalb auch die relative Messungenauigkeit zunimmt, da diese steigt je kleiner der Messwert ist, [21]. Aus dem Messbericht der Plenum Ingenieurgesellschaft geht außerdem hervor, dass die Messdaten zu \dot{V}_3 mit großen Unsicherheiten behaftet sind, weshalb keine genaue Aussage über die Qualität der Simulationsergebnisse an diesem Punkt getätigt werden kann, [18].

4.2.2 Vorlauftemperatur

Durchgehend gute Simulationsergebnisse werden für $T_{V,1}$ erzielt. Der Einfluss der Vorlauftemperatur der HZ1 ist für $T_{V,1}$ in allen untersuchten Betriebsmodi groß, daher lässt sich die Vorlauftemperatur in Punkt P_1 sehr gut allein durch $T_{V,HZ1}$ beschreiben wie Abbildung 4.1 zeigt. In Betriebsmodus 1 und 2 wird $T_{V,5}$ ebenfalls durch die Vorlauftemperatur

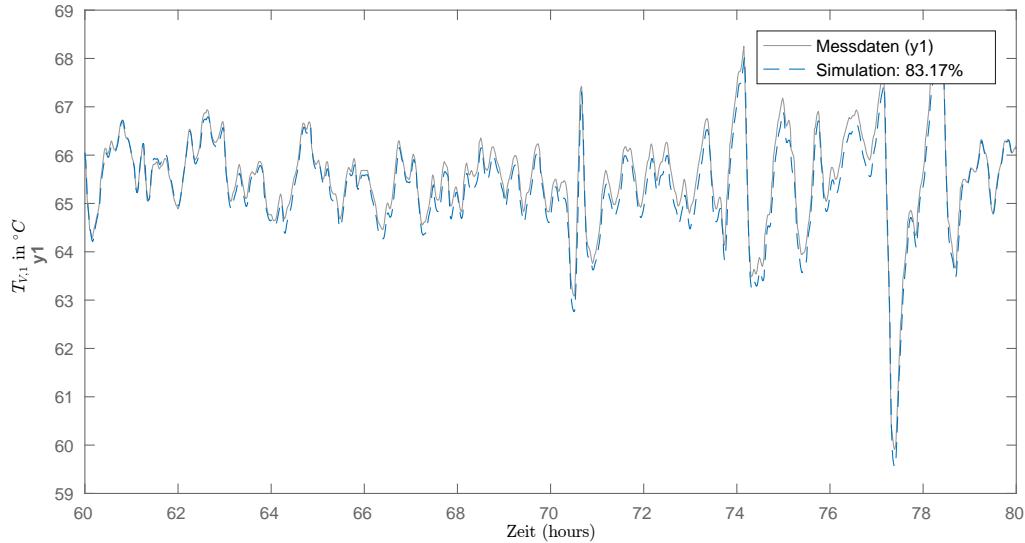


Abbildung 4.2: Ausschnitt der Simulationsergebnisse zu $T_{V,1}$.

der HZ1 beschrieben und zeigt ähnlich gute Ergebnisse. Sobald das System im Betriebsmodus 3 betrieben wird und eine Umkehr der Fließrichtung stattfindet, wird $T_{V,5}$ gemäß (3.2) durch $T_{V,4}$ berechnet. In Abbildung 4.3 sind die Simulationsergebnisse für beide Fließrichtungen dargestellt. Für den Betriebsmodus 3 erzielt die Simulation schlechtere Übereinstimmungen, was auf eine ungenügende Beschreibung allein durch $T_{V,4}$ hindeuten kann. Im untersuchten Zeitraum wurden nur wenige Fließrichtungswechsel am Punkt P_5 beobachtet, so dass eine genauere Analyse der Wechselwirkungen nicht weiterverfolgt werden konnte.

Vergleicht man die Simulationsergebnisse für $T_{V,2}$ mit den Messdaten, lässt sich ein ähnlicher Signalverlauf erkennen, der aber zeitlich versetzt ist. Dies könnte darauf hindeuten, dass sich für $T_{V,2}$ bessere Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung eines Totzeitüber-

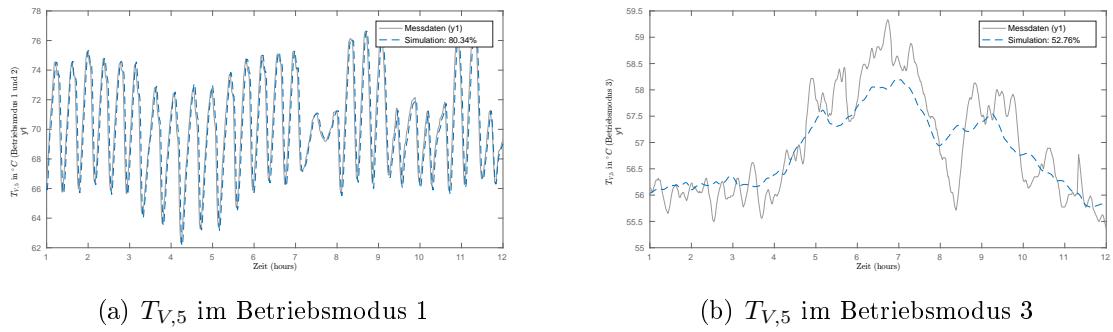


Abbildung 4.3: Vergleich der Vorhersageergebnisse für $T_{V,5}$ bei verschiedenen Fließrichtungen. Das Modell zeigt für negative Fließrichtung an P_5 bessere Ergebnisse (a) als für positive Fließrichtungen (b).

tragungsgliedes erzielen lassen könnten. Dies könnte als Ansatz für eine weiterführende Optimierung des Modells dienen.

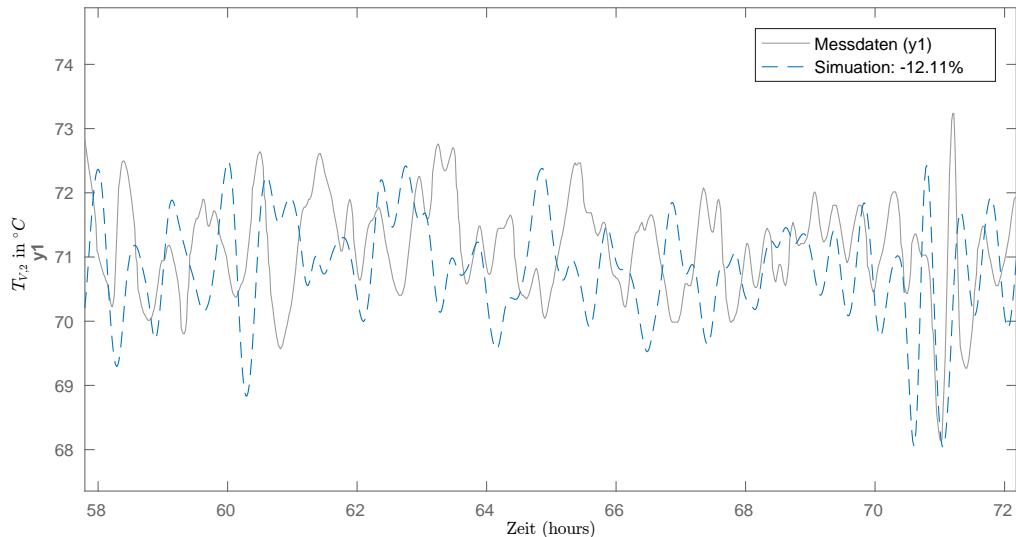


Abbildung 4.4: Ausschnitt der Simulationsergebnisse zu $T_{V,2}$.

Für $T_{V,3}$ lassen sich für die meisten Zeiträume nur schlechte Simulationsergebnisse erzielen, da ein häufiger Fließrichtungswechsel stattfindet; teilweise geschieht dies mehrmals am Tag. Da die Implementation des Modells in MATLAB keine automatisierte Umstellung der Parameter bei einem Wechsel des Betriebsmodus vorsieht, wird das System für solche Fälle nicht korrekt beschrieben und die Simulation ergibt unbrauchbare Ergebnisse. Abbildung 4.5 zeigt einen Vergleich der Simulationsergebnisse für $T_{V,3}$ für den Zeitraum vom 16.04.2016 bis 23.04.2016, in dem häufige Fließrichtungswechsel stattfanden, mit den

Simulationsergebnissen vom 07.07.2016 bis 17.07.2016, in dem die Anlage im Betriebsmodus 2 lief.

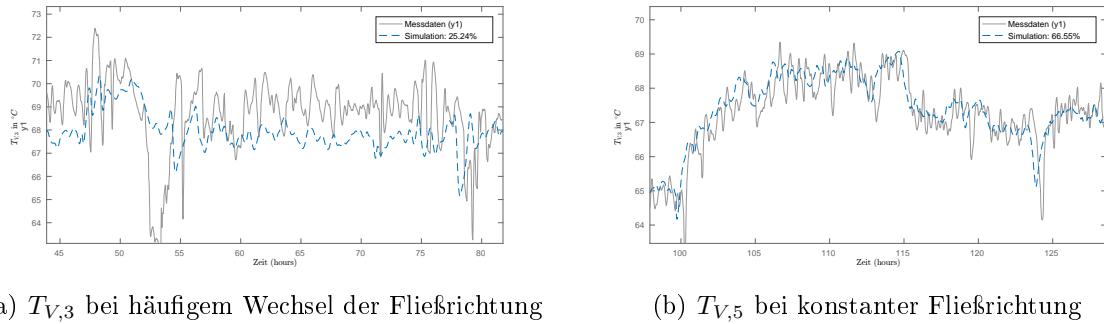
(a) $T_{V,3}$ bei häufigem Wechsel der Fließrichtung(b) $T_{V,5}$ bei konstanter Fließrichtung

Abbildung 4.5: Vergleich der Vorhersageergebnisse für $T_{V,3}$ bei häufigen Fließrichtungswechseln (a) und bei konstanter Fließrichtung (b)

Für $T_{V,4}$ werden durch das Modell durchgehend gute Vorhersageergebnisse mit NRMSE-Werten von rund 50 - 60 % erzielt.

4.2.3 Wärmeleistung

Da die Wärmeleistung mittels Black-box lediglich durch eine Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Vorlauftemperatur im selben Punkt abgeschätzt wird, liefert die Simulation erwartungsgemäß vergleichsweise schlechte Vorhersageergebnisse.

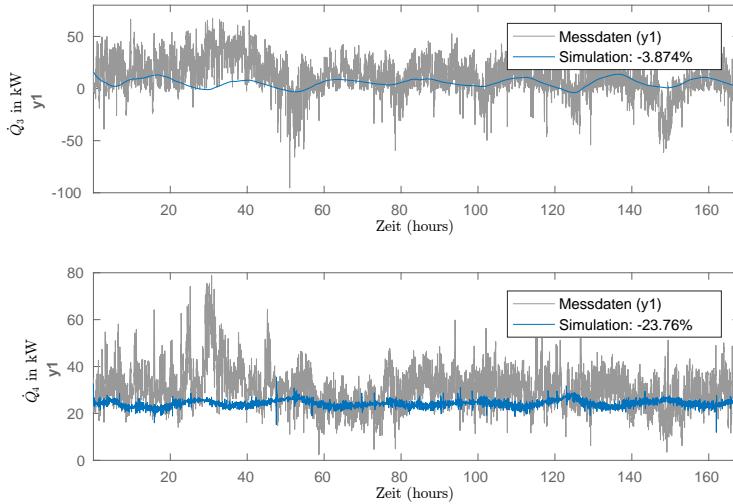


Abbildung 4.6: Vergleich der Vorhersageergebnisse für \dot{Q}_3 und \dot{Q}_4 . Der NRMSE liegt im negativen Bereich und weist schlechtere Übereinstimmungen auf als die Simulationen für \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 und \dot{Q}_5

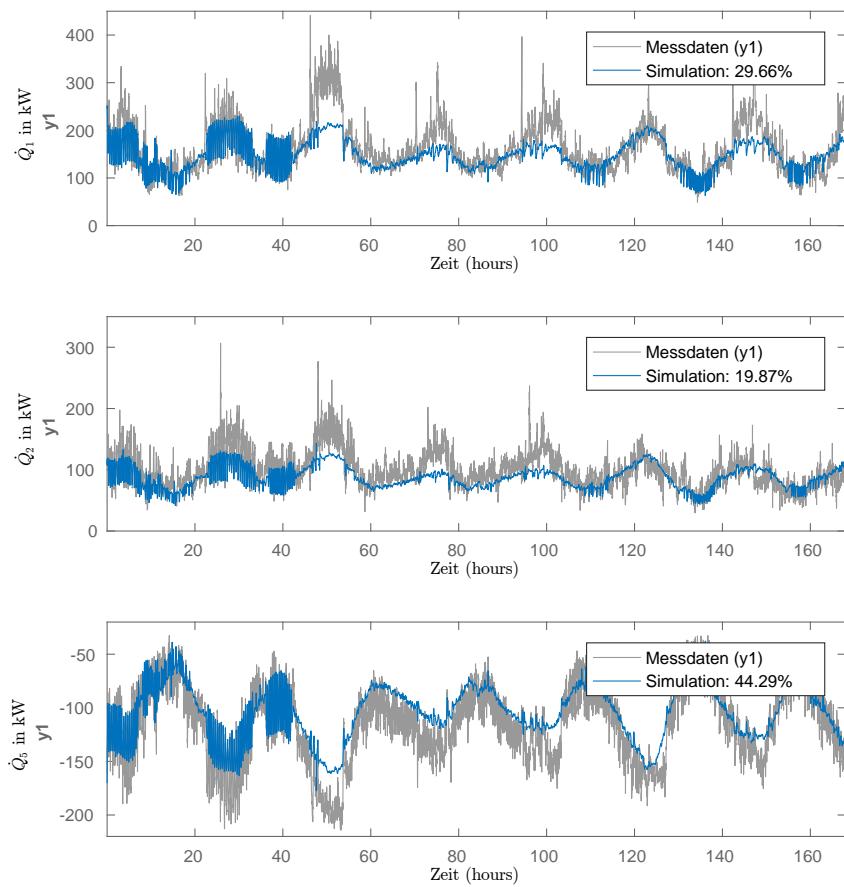


Abbildung 4.7: Vergleich der Simulation für \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 und \dot{Q}_5 . Der NRMSE liegt zwischen 20 % und 50 % für alle drei Punkte

Auffällig ist, dass für die Simulationen von \dot{Q}_1 , \dot{Q}_2 und \dot{Q}_5 insgesamt etwas bessere Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messdaten erzielt werden können als für die Simulationen von \dot{Q}_3 und \dot{Q}_4 im selben Zeitraum, wie Abbildungen 4.7 und 4.6 zeigen.

Für die Wärmeleistungen \dot{Q}_3 und \dot{Q}_4 werden insgesamt niedrigere Werte gemessen als für die anderen drei Wärmeleistungen, was vor allem auf die geringen Volumenströme in diesen Punkten zurückzuführen ist. Solch niedrige Volumenströme und die damit verbundenen niedrigen Wärmeleistungen könnten auf eine Unterversorgung der Verbraucher hindeuten, wobei der untersuchte Zeitraum für die Validierung am 11.04.2016 begann und damit bereits nicht mehr innerhalb der Heizperiode lag. Eine eventuelle Unterversorgung würde bei milden Außentemperaturen nicht mehr so stark auffallen wie bei sehr niedrigen Außentemperaturen. Sollte tatsächlich durch zu geringe Volumenströme weniger Wärmeleistung an den Punkten P_3 und P_4 abgenommen werden können, als tatsächlich von den Verbrauchern benötigt wird, sind auch die Simulationsergebnisse wenig aussagekräftig. Die Wärmeleistungsmodelle wurden anhand von Messdaten trainiert, ein fehlerhafter Betrieb der Anlage würde sich demnach auch in den Parametern des Modells widerspiegeln.

Weiterhin entspricht die Berechnung der Wärmeleistung über ein Black-box-Modell nur

einer groben Abschätzung. Die Außentemperatur ist in diesem Modellansatz die einzige Informationsquelle über den vermuteten Wärmebedarf, da dieser in der Regel bei niedrigen Außentemperaturen steigt. Nicht berücksichtigt werden die je nach Verbrauchertyp unterschiedlichen Wärmebedarfe. So ist davon auszugehen, dass Produktionshallen ein anderes Wärmebedarfsprofil besitzen als Bürogebäude. Die Berechnung der Wärmeleistung auf Grundlage des in dieser Arbeit genutzten Modells führt daher zwangsläufig zu schlechten Übereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Daten. Zur Verbesserung der Vorhersage und eventuell auch zur Fehlererkennung wäre eine Analyse des tatsächlichen Verbraucherverhaltens empfehlenswert.

4.3 Simulationsergebnisse des Gesamtmodells

Das Gesamtmodell wurde evaluiert, indem die in Tabelle 2 beschriebenen Eingangs- und Störgrößen dem Modell als Eingangssignale vorgegeben wurden. Die simulierten Ausgangssignale wurden aufgezeichnet und mit realen Messdaten verglichen, um die Qualität der Modellierung abzuschätzen. Die Eingangssignale entsprechen Messdaten aus dem untersuchten Zeitraum vom 11. April 2016 bis 05. August 2016. Dabei wurde darauf geachtet keine Messdaten zu nutzen, die vorher zur Parameteridentifikation verwendet wurden. Das folgende Kapitel beschreibt die Implementierung des Modells in MATLAB, gibt einen Überblick über die Validierungsergebnisse und befasst sich mit eventuellen Fehlerquellen.

4.3.1 Implementierung

Das Modell wurde in der Entwicklungsumgebung MATLAB inklusive der SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX implementiert. In einem Hauptskript kann der Anwender den Zeitraum festlegen, für den das Modell eine Vorhersage der Ausgangsgrößen berechnen soll. Der Anwender legt das Startdatum sowie den Simulationszeitraum in Tagen fest, wobei eine Zeit von sieben Tagen voreingestellt ist. Das Skript erstellt anschließend die benötigten Datensätze und führt eine Parameteridentifikation über einen Zeitraum von drei Tagen vor dem Startdatum durch. Die Systemmatrizen der Zustandsraummodelle und die Parameter des statischen Volumenstrommodells werden abgespeichert, um im darauf folgenden Simulationsschritt zur Verfügung zu stehen. Die Simulationsergebnisse werden ebenfalls gespeichert und direkt im Anschluss an die Berechnung auf dem Bildschirm ausgegeben.

Zu beachten ist dabei, dass der Betriebsmodus der Anlage manuell im Skript eingestellt werden muss. Das Skript führt keine Analyse der Fließrichtungen durch und passt sich nicht selbstständig einem Wechsel des Betriebsmodus an. Simulationsergebnisse für Zeiträume, in denen häufige Fließrichtungswechsel vorkommen, können daher unter Umständen ungewöhnlich schlechte Übereinstimmungswerte aufweisen.

4.3.2 Validierung

Die Validierung der Teilmodelle erfolgte für jedes Teilsystem einzeln anhand realer Messdaten: die Messdaten wurden als Eingangssignal für jedes Teilsystem genutzt, das Systemverhalten wurde berechnet und die Ausgangssignale wurden mit Messdaten verglichen. Für die Simulation des Gesamtmodells bestehen die Eingangssignale für einige Teilmodelle aus vorher simulierten Ausgangsgrößen anderer Teilmodelle, wie sich anhand des Blockschaltbildes erkennen lässt. Liefert ein Teilmodell schlechte Simulationsergebnisse, wird dieser Fehler sich zwangsläufig fortpflanzen, weshalb insgesamt schlechtere Validierungsergebnisse für das Gesamtmodell erwartet werden können als für die Validierung der Teilmodelle. Dieser Zusammenhang gilt jedoch nicht für die Simulationsergebnisse der Volumenströme. Diese werden anhand eines statischen Modells berechnet, bei dem alle Ausgangsgrößen nur durch eine Linearkombination der Volumenströme der Erzeugergruppen beschrieben werden. Die Validierungsergebnisse für das Gesamtmodell decken sich demnach mit den Validierungsergebnissen des Teilmodells. Die Ergebnisse wurden bereits in 4.2.1 diskutiert.

In einigen nachfolgenden Tabellen werden die Simulationsergebnisse für verschiedene Betriebsmodi verglichen. Dabei stammen die für Betriebsmodus 1 verwendeten Validierungsdatensätze aus dem Zeitraum vom 16.04.2016 bis zum 23.04.2016, für Betriebsmodus 3 aus dem Zeitraum vom 29.07.2016 bis 02.08.2016. Für Betriebsmodus 2 gab es im beobachteten Zeitraum keine Zeitspanne, in denen dieser Betriebsmodus ausreichend lange anhielt, um eine aussagekräftige Validierung durchzuführen.

Simulationsergebnisse der Vorlauftemperaturen

Tabelle 5 zeigt die Übereinstimmung zwischen simulierten Vorlauftemperaturen und Messdaten bei verschiedenen Betriebsmodi. Die Übereinstimmungen für die im Gesamtmodell

Tabelle 5: Vergleich der Simulationsergebnisse für $T_{V,1}$ bis $T_{V,5}$ für verschiedene Betriebsmodi

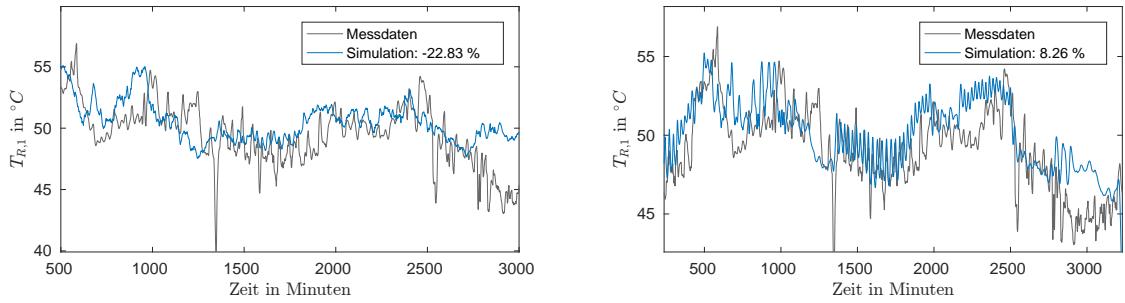
		NRMSE in %				
		$T_{V,1}$	$T_{V,2}$	$T_{V,3}$	$T_{V,4}$	$T_{V,5}$
Betriebsmodus 1	Gesamtmodell	83.03	-14.32	12.46	52.53	80.34
	Teilmodell	83.03	-12.11	25.24	52.53	80.34
Betriebsmodus 3	Gesamtmodell	78.58	-48.87	72.86	77.99	51.51
	Teilmodell	78.58	-39.45	72.79	77.99	62.96

berechneten Vorlauftemperaturen sind erwartungsgemäß etwas niedriger als die Übereinstimmungen der Teilmodelle, wenn zur Berechnung die Temperatur des zuvor durchflossenen Punktes genutzt wird, zu erkennen an $T_{V,2}$ und $T_{V,3}$ in beiden Betriebsmodi sowie an $T_{V,5}$ im Betriebsmodus 3. Die schlechten Übereinstimmungswerte für $T_{V,2}$ im Betriebsmodus 3 resultieren aus einem Ausfall des Temperatursensors an dieser Stelle. Zu erkennen ist auch, dass für $T_{V,1}$ und $T_{V,4}$ sowie für $T_{V,5}$ im Betriebsmodus 1 gleiche Übereinstimmungen

Tabelle 6: Vergleich der Simulationsergebnisse für \dot{Q}_1 bis \dot{Q}_5 für verschiedene Betriebsmodi

			NRMSE in %				
			\dot{Q}_1	\dot{Q}_2	\dot{Q}_3	\dot{Q}_4	\dot{Q}_5
Betriebsmodus 1	Gesamtmodell		23.34	14.16	-3.577	-8.858	42.88
	Teilmодell		23.34	15.86	-3.569	-8.858	42.88
Betriebsmodus 3	Gesamtmodell		2.004	-16.57	1.433	-1.627	-4.336
	Teilmодell		2.007	12.81	1.226	-1.627	-2.367

für das Gesamtmodell wie für die Teilmodelle erzielt werden. Diese Temperaturen werden nur durch die Vorlauftemperaturen der Erzeuger berechnet, nutzen also keine vorher anderweitig berechneten Eingangsgrößen. Für Validierungsergebnisse der Wärmeleistung ist ein ähnlicher Trend zu erkennen. Da die Wärmeleistung über ein Black-box-Modell aus der Vorlauftemperatur am selben Punkt abgeschätzt wird, war dieses Ergebnis auch zu erwarten. Die Wärmeleistung selbst ist zwar keine Ausgangsgröße des Gesamtmodells, aus ihr wird jedoch die Rücklauftemperatur errechnet. Um eine Einordnung der Simulationsergebnisse zu $T_{R,1}$ bis $T_{R,5}$ zu ermöglichen, sind die Übereinstimmungen der Wärmeleistungsvorhersage mit den Messdaten in Tabelle 6 aufgeführt.



(a) Simulation von $T_{R,1}$ durch statisches Modell (b) Simulation von $T_{R,1}$ durch linearisiertes Modell

Abbildung 4.8: Vergleich der Simulation für $T_{R,1}$ für die zwei unterschiedlichen Modellansätze.

Simulationsergebnisse der Rücklauftemperaturen

Die Rücklauftemperatur wurde wie in 3.3.4 beschrieben über zwei Varianten errechnet. Für die erste Methode wurde ein statischer nichtlinearer Zusammenhang gewählt, die zweite Methode errechnet die Rücklauftemperatur über ein linearisiertes Modell der Temperaturdifferenz ΔT . Ein Vergleich der Ergebnisse für beide Ansätze ist in Abbildung 4.8 gezeigt. Insgesamt ließen sich für den untersuchten Zeitraum bessere Übereinstimmungsergebnisse mit Hilfe des linearisierten Modells ermitteln. Dabei lassen sich für Volumenströme, die stark um um den Nullpunkt schwanken, mit beiden Methoden keine

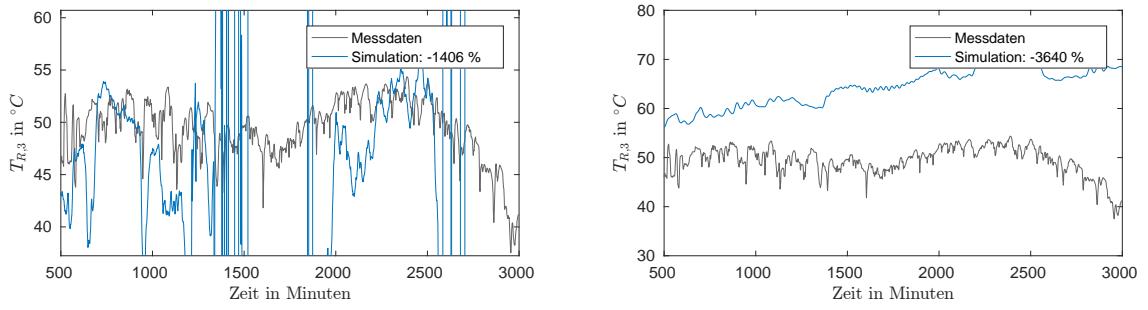
(a) Simulation von $T_{R,3}$ durch statisches Modell (b) Simulation von $T_{R,3}$ durch linearisiertes Modell

Abbildung 4.9: Simulation von $T_{R,3}$ für die zwei unterschiedlichen Modellansätze. Beide Modellansätze liefern keine brauchbaren Simulationsergebnisse für $T_{R,3}$

guten Vorhersageergebnisse erzielen. Der Volumenstrom geht in beiden Ansätzen in antiproportionalen Verhältnis in die Berechnung der Rücklauftemperatur ein, Messfehler bzw. Simulationsfehler werden also verstärkt. Dies macht sich besonders stark bei Volumenströmen nahe des Nullpunktes bemerkbar. Im untersuchten Zeitraum trifft dies besonders für die Volumenströme am Punkt P_3 zu, wie in Abbildung 4.9 zu erkennen ist. Beide Modellansätze liefern keine brauchbaren Simulationsergebnisse für diesen Punkt aufgrund des Zusammenspiels von stark mit Messrauschen behafteten Volumenstromdaten und schlechten Simulationsergebnissen für die Wärmeleistung. Eine Optimierung dieses Ansatzes könnte in der Anwendung von Filtern auf die Messdaten zu den Volumenströmen liegen.

Tabelle 7: Vergleich der Simulationsergebnisse für $T_{R,1}$ bis $T_{R,5}$ für verschiedene Betriebsmodi und für beide Modellansätze. Mit (*) gekennzeichnete Werte basieren auf um den Nullpunkt fluktuierenden Volumenströmen

		NRMSE in %				
		$T_{R,1}$	$T_{R,2}$	$T_{R,3}$	$T_{R,4}$	$T_{R,5}$
Betriebsmodus 1	statisches Modell	-22.83	-11.11	-1406*	-18.17	-44.05
	linearisiertes Modell	8.26	3.24	-3640*	-10.93	4.15
Betriebsmodus 3	statisches Modell	-3.92	-1460	-8.93	6.70	-2177*
	linearisiertes Modell	-2.17	-596.6	-3.55	20.29	-1296*

Tabelle 7 fasst die Simulationsergebnisse der beiden Modellansätze für die Rücklauftemperaturen $T_{R,1}$ bis $T_{R,5}$ für verschiedene Betriebsmodi zusammen. Deutlich zu erkennen sind die unterdurchschnittlich schlechten Simulationsergebnisse für um den Nullpunkt fluktuierende Volumenströme, welche in der Tabelle gesondert gekennzeichnet sind. Die niedrigen Übereinstimmungswerte von $T_{R,2}$ liegen dagegen an einem Ausfall des Temperatursensors an diesem Wärmemengenzähler, weshalb die Messdaten stark von den Simulationsergeb-

nissen abweichen. Für den untersuchten Wertebereich der Rücklauftemperatur scheint das linearisierte Zustandsraummodell insgesamt etwas bessere Vorhersageergebnisse zu erzielen. Zu beachten ist dabei, dass die `n4sid` Funktion zusätzlich zu den Systemmatrizen des Zustandsraummodells auch ein Störgrößenmodell ermittelt, was einen Einfluss auf die bessere Übereinstimmung zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen haben könnte. Weiterführende Analysen in diese Richtung, zum Beispiel durch einen Vergleich zwischen der Parameteridentifikation mit und ohne Störgrößenmodell, könnten darüber Aufschluss geben.

4.4 Zusammenfassende Fehlerdiskussion

Die Parameteridentifikation und die Ergebnisse der Simulation des Gesamtmodells wurden in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert. Da die Berechnungen der Volumenströme und Vorlauftemperaturen insgesamt gute Simulationsergebnisse zeigen, scheinen die gewählten Modellansätze für diese Teilmodelle eine gute Abbildung der realen thermodynamischen und hydraulischen Prozesse darzustellen. Auftretende Abweichungen der Vorhersageergebnisse für die Vorlauftemperaturen mit den Messdaten könnten durch ein nicht abgebildetes Totzeitverhalten erklärt werden, da einige Messdaten um eine Zeitspanne Δt zu den Simulationsdaten verschoben erscheinen.

Im Gegensatz dazu zeigen die Simulationsergebnisse des Verbrauchermodells schlechte Übereinstimmungen. Zum Einen können durch die reine Black-box-Parametrisierung anhand des Eingangs- und Ausgangsverhaltens Fehler der Anlage in das Modell einfließen. Außerdem wird die Wärmeleistung in jedem Punkt lediglich in Abhängigkeit zur Vorlauf- und Außentemperatur berechnet, was den tatsächlichen Verlauf des Wärmebedarfs wahrscheinlich nicht korrekt widerspiegelt.

Dieser Fehler in der Berechnung der Wärmeleistung beeinflusst die Simulationsergebnisse der Rücklauftemperatur ebenfalls, da diese in beiden angewandten Modellansätzen durch die Wärmeleistung beschrieben wird. Zusätzlich dazu führt die Berechnung der Rücklauftemperaturen bei niedrigen Volumenströmen nicht zu brauchbaren Ergebnissen, da der antiproportionale Zusammenhang zwischen Wärmeleistung und Volumenstrom zu einer Verstärkung von Simulationsfehlern führt. Für die zwei entwickelten Modellansätze zur Beschreibung der Rücklauftemperatur haben sich die Simulationen durch das linearisierte dynamische Modell als etwas besser erwiesen als die Berechnungen durch das statische nichtlineare Modell. Dies könnte an dem automatisch abgeschätzten Störgrößenmodell der `n4sid` Funktion liegen, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht wurde.

Für Zeiträume, in denen häufige Wechsel der Fließrichtung stattfinden, wurden ebenfalls große Abweichungen zwischen Vorhersage und Messwerten beobachtet. Die Implementierung des Modells sieht keine automatische Anpassung an einen Wechsel des Betriebsmodus vor, was bei der Auswertung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messdaten beachtet werden sollte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit hat einen Modellierungsansatz für die thermodynamischen und hydraulischen Prozesse der Wärmeversorgungsanlage der LMT Group Schwarzenbek vorgestellt. Hierfür wurde zunächst das Systemverhalten der Anlage untersucht. Als Basis dienten Messdaten aus Wärmemengenzählern, die an verschiedenen Punkten der Anlage installiert sind und seit dem 1. Oktober 2015 Messdaten zu Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie Volumenströmen bereitstellen. Für die im Kreis führende aus mehreren Wärmeerzeugern und Verbrauchern bestehende Anlage wurde eine vereinfachte Struktur in Form eines Fünfecks angenommen, die als Grundlage für die Modellbildung diente. Eine Besonderheit der Wärmeversorgungsanlage stellen Änderungen der Fließrichtung an einigen Stellen der Heizkreises dar, welche nach Ursache und Wirkung charakterisiert wurden und durch die Einteilung in unterschiedliche Betriebsmodi klassifiziert wurden. Der gesamte zur Untersuchung genutzte Messdatensatz wurde dabei aufgrund einiger Randbedingungen auf einen Zeitraum vom 11. April 2016 bis zum 05. August 2016 eingeschränkt.

Über einen Grey-box-Modellierungsansatz wurde ein Modell der Wärmeversorgungsanlage entwickelt, welches wiederum aus mehreren Teilmodellen besteht. Das Gesamtmodell ist in der Lage, für die in Kapitel 3.3 beschriebenen Eingangs- und Störgrößen das dynamische Verhalten der Anlage abzubilden, indem der Volumenstrom sowie die Vorlauf- und Rücklauftemperatur in fünf Punkten des Wärmeversorgungsring als Ausgangsgrößen berechnet werden. Für die Modellierung kamen teilweise Black-box-Modellierungsansätze zur Anwendung wie beim Verbrauchermodell. Andere Teilmodelle wurden durch Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge entwickelt wie das statische nichtlineare Modell zur Berechnung der Rücklauftemperatur oder das dynamische Modell der Vorlauftemperatur, was die Fließrichtungswechsel innerhalb des Heizkreises berücksichtigt. Die Modellgleichungen aller Teilmodelle wurden in Kapitel 3.3 vorgestellt, wobei für das Modell der Rücklauftemperatur zwei verschiedene Modellansätze entwickelt wurden.

Die Parameteridentifikation sowie die Validierung der Teilmodelle und des Gesamtmodells und die Implementierung in MATLAB wurden im letzten Kapitel diskutiert. Als Gütemaß für den Vergleich zwischen Messdaten und simulierten Daten wurde hier der Normalized Root Mean Square Error verwendet. Dabei hat sich gezeigt, dass für die Teilmodelle des Volumenstroms und der Vorlauftemperatur gute Vorhersageergebnisse erreicht werden können. Das Black-box-Verbrauchermodell hat sich als ungenügend herausgestellt, was sich auch auf das Teilmodell der Rückflusstemperatur auswirkt, da dieses auf den Ergebnissen des Verbrauchermodells beruht. Der Vergleich der beiden unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der Rücklauftemperatur zeigte, dass das linearisierte Modell etwas bessere Ergebnisse erzielte.

Das Modell ist insgesamt in der Lage, das Systemverhalten der Wärmeversorgungsanlage für die meisten Eingangsgrößen des untersuchten Zeitraumes zu beschreiben, wobei die Vorhersageergebnisse der Rückflusstemperatur mit hoher Unsicherheit behaftet sind. Eine Verbesserung der Simulationsgergebnisse ließe sich eventuell durch die Entwicklung besserer Verbrauchermodelle erzielen. Hierfür könnte der Ansatz zur Beschreibung des Verbraucherverhaltens durch Wärmebedarfsprofile wieder aufgegriffen werden, der wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben zunächst versucht, aber aufgrund schlechter Ergebnisse wie-

der verworfen wurde. Die Simulation der Volumenströme könnte durch Anwendung von Filtern optimiert werden, um die hohen relativen Messunsicherheiten bei geringen Volumenströmen zu kompensieren. Inwiefern die Störeinflüsse aber tatsächlich gefiltert werden können oder ob andere Methoden oder sogar andere Modelle bessere Ergebnisse erzielen, könnte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Zudem stellt sich die Frage, ob dieses Modell eine hinreichend genaues Abbild des realen Systemverhaltens zur Implementierung für einen prädiktiven Regler darstellt. Dies könnte anhand der weiteren Validierung des Modells mit Hilfe von Kesselmodellen untersucht werden.

Literatur

- [1] Fraunhofer ISE, HAW Hamburg, IngSoft GmbH, Plenum Ingenieurgesellschaft, and Kieback & Peter GmbH & Co. KG, “Observe Webseite.” <http://www.ob-serve.de/>, zuletzt abgerufen am 04.10.2016.
- [2] Plenum Ingenieurgesellschaft mbH, “Ringleitung Diagramm,” tech. rep., 2015.
- [3] Plenum Ingenieurgesellschaft mbH, “Lageplan Messstellen LMT Group Schwarzenbek,” tech. rep., 2015.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Energiedaten: Gesamtausgabe,” tech. rep., Berlin, 2016. <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Energiestatistiken-grafiken.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt abgerufen am 25.09.2016.
- [5] Fraunhofer ISE and P. u. e. HAW Hamburg, “Modellbasierte Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs (ModQS),” abschlussbericht, July 2014. http://www.modqs.de/uploads/tx_buildingeq/20140703_ModQS_Abschlussbericht_rev1.pdf, zuletzt abgerufen am 14.09.2016.
- [6] M. Gwerder, S. Bötschi, D. Gyalistras, C. Sagerschnig, D. Sturzenegger, R. Smith, and B. Illi, “Integrated Predictive Rule-Based Control of a Swiss Office Building,” in *Clima - RHEVA World Congress*, (Prague, Czech Republic), pp. 1723–1732, 2013.
- [7] B. Olofsson, O. Sörnmo, A. Robertsson, and R. Johansson, “Continuous-time gray-box identification of mechanical systems using subspace-based identification methods,” in *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 327–333, July 2014.
- [8] M. Buchholz, *Subspace-Identification zur Modellierung von PEM-Brennstoffzellen-Stacks*. KIT Scientific Publishing, 2010.
- [9] S. Prívara, J. Cigler, Z. Vána, F. Oldewurtel, C. Sagerschnig, and E. Záceková, “Building modeling as a crucial part for building predictive control,” *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 8–22, Jan. 2013.
- [10] T. Faßnacht, H. Östreicher, and A. Wagner, “Gebäudemodelle für modellbasierte Regler und Energiemanagementsysteme,” in *BauSIM 2014*. http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1191_final.pdf, zuletzt abgerufen am 28.09.2016.
- [11] *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik : einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte*. 1990.
- [12] E. Hering and B. Schröder, *Wärmeschutz und Heizungstechnik: Ein Überblick*. essentials, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

- [13] J. Lunze, *Regelungstechnik 1*, vol. 53 of *Springer-Lehrbuch*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [14] R. Dittmar and B.-M. Pfeiffer, *Modellbasierte prädiktive Regelung: eine Einführung für Ingenieure*. München [u.a.]: Oldenbourg, 2004.
- [15] B. Girod, R. Rabenstein, and A. Stenger, *Einführung in die Systemtheorie: Signale und Systeme in der Elektrotechnik und Informationstechnik ; mit 113 Beispielen sowie 200 Übungsaufgaben*. Lehrbuch Elektrotechnik, Wiesbaden: Teubner, 4., durchges. und aktualisierte aufl. ed., 2007.
- [16] D. Möller, *Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1992.
- [17] P. Van Overschee and B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996.
- [18] Plenum Ingenieurgesellschaft mbH, “Überprüfung der Durchflussmessungen in der LMT-Group Schwarzenbek,” tech. rep., 2016.
- [19] “Gespräch vom 05.09.2016.” Persönliches Gespräch mit der Plenum Ingenieurgesellschaft mbH.
- [20] Mathworks, “Matlab Documentation.” <http://de.mathworks.com/help/matlab/index.html>, zuletzt abgerufen am 01.10.2016.
- [21] R. Parthier, *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 8., überarbeitete und erweiterte auflage. ed., 2016.