

Diss. ETH Nr. 16892

# **Adaptive Modellbasierte Prädiktive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

MIKAEL ANDREAS BIANCHI

Dipl. Maschineningenieur ETH

geboren am 15. August 1978

von Avegno, TI

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. H. P. Geering, Referent

Prof. Dr. A. Steinfeld, Korreferent

2006

mikael.bianchi@alumni.ethz.ch

ISBN 978-3-909386-67-3

ETH Zürich  
Institut für Mess- und Regeltechnik  
Sonneggstrasse 3  
CH-8092 Zürich

2006

---

## Zusammenfassung

Kleinwärmepumpenanlagen werden heutzutage fast ausschliesslich mit witterungsgeführten Zweipunkt-Reglern betrieben. Mit dieser Regelstrategie versucht man primär eine optimale Regelung des Wärmeabgabesystems zu erreichen. Spezielle Forderungen an die Wärmepumpen wie lange Laufzeiten, hoher Niedertarifanteil oder kleiner Hilfsenergieverbrauch werden dabei nur zweitrangig berücksichtigt.

Am Institut für Mess- und Regeltechnik wurde ein neuer Wärmepumpenregler für die Hausheizung basierend auf der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPC) entwickelt. Im Unterschied zu den konventionellen Regelungsstrategien der Wärmepumpen, welche nur die aktuellen Messungen für die Regelung berücksichtigen, bestimmt der modellbasierte prädiktive Regler den Wärmebedarf anhand der Wetterprognosen, der Vorhersagen des Wirkungsgrads der Wärmepumpe und der Kosten (Hoch- bzw. Niedertarif) sowie der Sperrzeiten der Elektrizitätswerke. Der berechnete Wärmebedarf wird dann anhand der Pulsbreitenmodulation (PBM) in ein Ein/Ausschaltsignal für die Wärmepumpe umgeformt.

Um das MPC-Problem zu lösen, wird ein dynamisches lineares Modell der Hausheizung verwendet. Dieses Modell basiert auf einfachen thermodynamischen Effekten. Die resultierenden Differentialgleichungen hängen von mehreren physikalischen Parametern ab. Da diese Parameter je nach Gebäudetyp variieren, wird eine Identifikationsmethode gebraucht. Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein adaptiver MPC-Regler entwickelt. Als Ziel sollen die thermischen Eigenschaften des Gebäudes anhand eines Online-Parameteridentifikationsalgorithmus geschätzt werden, so dass die Reglerparameter dem Gebäudetyp angepasst werden. Es werden verschiedene Identifikationsmethoden verglichen. Weiter werden die Robustheit gegenüber Störungen, die Detektion der Sonnenstrahlungsgewinne und die Konsistenz der identifizierten Parameter untersucht. Das identifizierte Modell soll in der Lage sein, das thermische Verhalten des Gebäudes für die nächsten 24 Stunden gut vorherzusagen.

Am Institut für Mess- und Regeltechnik wurde ein Wärmepumpenprüfstand für Sole/Wasser-Wärmepumpen entwickelt, um einen Vergleich zwischen Wärmepumpen-Reglerkonzepten zu ermöglichen. Dabei können die Regler sequentiell unter gleichen Bedingungen verglichen werden. Im Wärmepumpenprüfstand werden sowohl das thermische Verhalten eines Gebäudes als auch das thermische Verhalten einer Erdwärmesonde für eine reale Wärmepumpe emuliert. Das Erdwärmesondenmodell und das Hausmodell simulieren in Echtzeit jeweils die Wärmepumpenquelle und die Wärmeabgabe. Dabei werden die Solltemperaturen am Rücklauf des Sole- bzw. Heizwasserkreislaufs in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen am Ausgang der Testwärmepumpe und der synthetischen Wetterdaten (wie Aussentemperatur und Sonnenstrahlung) generiert. Ein Anlageregler sorgt dafür, dass diese Sollwerte am Wärmepumpenprüfstand eingehalten werden. Da diese Bedingungen am Wärmepumpenprüfstand reproduzierbar sind, können die Wärmepumpenregler am Wärmepumpenprüfstand verglichen werden.



---

## Abstract

Small heat pump heating systems are controlled almost exclusively by relay-type controllers whose setpoint is chosen as a function of the outdoor temperature. The main strategy of such controllers is to optimally control the heat delivery system. Special demands on the heat pump, such as extended running times, high portions of low-tariff heating, or low usage of auxiliary power, are given secondary attention only.

A new controller for heat pumps has been developed at the Measurement and Control Laboratory using the model predictive control concept. Contrary to conventional heat pump controller strategies, which exclusively use the actual measurements, the model predictive controller calculates the required heat energy by means of the predicted course of the outdoor temperature, the efficiency of the heat pump, the power costs (high and low tariff), and the power cut-off times imposed by electric power providers. To transform the required heat energy into an on/off switch signal for the heat pump, the pulse-width modulation technique is used.

To solve the model predictive control problem for the specific problem of house heating, a dynamic linear model of the house is required. The model for the controller is based on simple thermodynamic laws. The resulting equations contain a set of a priori unknown parameters; furthermore, since the parameters of the model differ from one house to another, an identification mechanism is indispensable. Within the scope of this doctoral thesis a self-adapting MPC controller has been developed. Its function is to automatically detect the thermal behavior of the house and its heating system by on-line parameter identification techniques in order to adjust the controller parameters according to preset demands. Different families of recursive parameter identification methods are compared. Furthermore, the robustness with respect to disturbances, the detection of solar radiation, and the consistency of the identified parameters are investigated. The identified model must be able to predict reliably the house dynamics for the next day.

In order to compare different control concepts sequentially under identical conditions, a test bench for dynamic tests on a brine-to-water heat pump was

built at the Measurement and Control Laboratory. On this test bench it is possible to emulate dynamically, for a real heat pump, the thermal behavior of a house as well as the thermal behavior of an earth probe. Models of the thermal behavior of the house and of the earth probe are thus simulated in real-time. As a result, the reference temperatures for the inlet of the heat pump are calculated on the basis of the measured outlet temperatures of the heat pump and of selected weather data such as outdoor temperature and solar radiation. A control system ensures that these setpoint values are tracked by the corresponding physical quantities at the test bench. Since these conditions are reproducible, the controllers can be compared equitably under the same conditions.

---

## Vorwort

Diese Dissertation entstand am Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich. Diese Arbeit ist die Fortsetzung der Dissertation von Roger Wimmer über die Regelung einer Wärmepumpenanlage mit Model Predictive Control und die Erweiterung des Wärmepumpenprüfstandes für die Emulationen, welcher im Rahmen der Dissertation von David Zogg entwickelt wurde. Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. Hans Peter Geering herzlich danken, welcher diese Arbeit ermöglicht hat und mir grosse Freiheit für die Untersuchungen gewährt hat. Weiter bedanke ich mich bei Prof. Dr. Aldo Steinfeld für die Übernahme des Korreferates. Ich möchte insbesondere Herrn Dr. Esfandiar Shafai, welcher die initiale Idee über die Pulsbreitenmodulation bei der Regelung von Wärmepumpen und das Anfangskonzept für die Wärmepumpenanlage entwickelt hat, für die grosse Hilfe und die gute Betreuung danken, unten anderem auch für die Korrektur dieser Arbeit.

Im weiteren gilt mein Dank:

- den Projektleitern Dr. Martin Zogg und Prof. Dr. Thomas Kopp, welche mir die Teilnahme im Projekt Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen ermöglicht haben
- Hans Rudolf Gabathuler und Hans Mayer für die vielen Tips aus der Praxis und die guten Ideen für die Dissertation
- Bruno Illi und Roger Frei für die gute Zusammenarbeit
- Hans Ulrich Honegger, Oskar Brachs und Jan Prikryl für die grosse Hilfe bei der Erweiterung des Wärmepumpenprüfstandes
- Dr. David Dyntar für die interessanten Gespräche über die Gebäudeheizung und Brigitte Rohrbach für die Hilfe beim Korrigieren der vielen Dokumente und alle Unterstützung

- allen Studenten, deren Semester- und Diplomarbeiten zu meiner Arbeit beigetragen haben, insbesondere Daniel Rupp für die sehr gute Arbeit über die Parameteridentifikation und Ruedi Zutter für die Erweiterung des Prüfstandes
- allen Kollegen für die guten Zeiten am IMRT und an der ETH, vor allem Alexander Schilling, Dr. Antonio Sciarretta, Ezio Alfieri, Fabrizio Noembrini, Dr. Gabriel Dondi, Guillaume Ducard, Stefano Piffaretti, Yves Hohl und natürlich Dr. Simon Keel.

Ganz speziell danke ich meinen Eltern Anja und Silvano Bianchi und meiner Schwester Elena Bianchi für ihre Unterstützung und Geduld, und natürlich meiner Freundin Simona Petraglio, welche mir den letzten Kick für das Abschliessen der Dissertation gegeben hat.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	4
1.2 Ausgangslage .....	6
1.3 Ziele der Arbeit .....	7
1.4 Zusammenarbeit.....	8
1.5 Beschreibung der Referenzanlagen für die Untersuchungen.....	9
1.6 Aufbau der Arbeit .....	11
<b>2 Modellierung einer Heizungsanlage mit Wärmepumpe für den Reglerentwurf.....</b>	<b>13</b>
2.1 Hausmodell dritter Ordnung .....	14
2.2 Hausmodell zweiter Ordnung .....	19
2.3 Modellvalidierung.....	21
2.4 Modellanpassung für den Regler .....	26
<b>3 Parameteridentifikation eines Hausmodells.....</b>	<b>33</b>
3.1 Einführung in die Systemidentifikation.....	34
3.1.1 Modellstrukturen .....	37
3.1.2 Pseudolineare Regressionen (PLR).....	40
3.1.3 Prediction Error Methode (PEM).....	42
3.1.4 Bayesscher Ansatz.....	46
3.2 Problemformulierung und Eindeutigkeit der Lösung .....	48
3.3 Offline-Methoden.....	58
3.3.1 Least-Squares (LS) Methode.....	58
3.3.2 Familie der Newtonschen Verfahren / Gauss-Newton-Methode .....	59

3.4	Rekursive Methoden .....	63
3.4.1	Rekursive Least-Squares-Methode (RLS).....	64
3.4.2	Rekursive Maximum-Likelihood-Methode (RML) .....	66
3.4.3	Extended Kalman-Filter (EKF) als Parameterschätzer .....	70
3.4.4	EKF mit RML als Parameterschätzer (MRML).....	75
3.4.5	Vergleich und Diskussion.....	78
<b>4</b>	<b>Adaptiver Modellbasierter Prädiktiver Regler mit Pulsbreitenmodulation.....</b>	<b>89</b>
4.1	Herleitung und Analyse des konventionellen MPC mit PBM für die Hausheizung .....	92
4.1.1	Modellbasierte prädiktive Regelung .....	92
4.1.2	Wettersvorhersage.....	98
4.1.3	COP-Vorhersage.....	100
4.1.4	Pulsbreitenmodulation.....	102
4.2	Warmwasseraufbereitung.....	105
4.2.1	Hydraulische Schaltung für die Warmwasseraufbereitung....	105
4.2.2	Wahl und Positionierung der Sensoren für die Regelung .....	111
4.2.3	Regelkonzept für die Warmwasseraufbereitung .....	115
4.3	Adaptiver modellbasierter prädiktiver Regler für Kombianlagen.....	116
4.3.1	Koordination zwischen Gebäude- und Speicherheizung .....	117
4.3.2	Koordination zwischen Parameteridentifikation und Kombianlageregelung.....	118
<b>5</b>	<b>Alternative Regelvarianten .....</b>	<b>121</b>
5.1	Konventioneller Zweipunkt-Regler .....	122
5.2	Energiekennlinienbasierter PBM-Regler .....	125
5.3	Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler .....	128
<b>6</b>	<b>Dynamische Emulation am Wärmepumpenprüfstand.....</b>	<b>131</b>
6.1	Aufbau der Anlage .....	134
6.2	Interpretation und Umrechnung der Sensorsignale .....	138
6.3	Regelung der Anlage.....	144
6.3.1	Sollwertgenerator für die Tanktemperaturen .....	147
6.3.2	Hauptregler für die Tanktemperaturen .....	148
6.3.3	Untergeordneter Regler für die Wärmeströme.....	152
6.3.4	Mischtemperaturregler .....	159

6.3.5 Resultate .....	159
6.4 Simulationsmodelle für die Emulation .....	164
6.4.1 Das Gebäude.....	164
6.4.2 Der Speicher .....	171
6.4.3 Die Erdwärmesonde .....	176
<b>7 Vergleich der Resultate.....</b>	<b>185</b>
7.1 Randbedingungen für die Emulationen .....	186
7.2 HIL-Simulation .....	187
7.2.1 Konventioneller Zweipunkt-Regler.....	188
7.2.2 Modellbasierter Prädiktiver Regler .....	191
7.2.3 Energiekennlinienbasierter Regler .....	193
7.2.4 Laufzeitkennlinienbasierter Regler .....	195
7.2.5 Vergleich der Wärmepumpenregler .....	197
7.3 Emulation am Prüfstand.....	199
7.3.1 Erweiterter Adaptiver Modellbasierter Prädiktiver Regler .....	200
7.3.2 Erweiterter Laufzeitkennlinienbasierter Regler .....	205
7.3.3 Vergleich der Wärmepumpenregler .....	208
7.4 Diskussion .....	210
<b>A Das Carnot-Blockset .....</b>	<b>213</b>
<b>B Wärmepumpenkennlinie .....</b>	<b>217</b>
B.1 Luft/Wasser-Wärmepumpe AW 113.1 .....	217
B.2 Sole/Wasser-Wärmepumpe BW 108.1 .....	219
<b>Symbolliste .....</b>	<b>221</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>231</b>
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>235</b>

# 1 Einführung

In den letzten 30-40 Jahren sind grosse Fortschritte im Gebiet der Gebäudeheizung gemacht worden. Insbesondere werden einerseits die Häuser immer mehr mittels alternativer und erneuerbarer Energien geheizt und andererseits werden neue Baumaterialien mit besseren Isolationseigenschaften verwendet. In der Schweiz werden für die Auslegung oder die Sanierung der Heizanlagen immer mehr die Wärmepumpen eingesetzt. Die Wärmepumpe nutzt die Energie der Umgebung aus, um die Wärmeenergie für die Heizung eines Hauses zu erzeugen. Das Prinzip der Wärmepumpe liegt darin, die Wärmeenergie von einem tiefen auf ein höheres Energieniveau zu bringen, so dass keine spezielle Energiequelle gebraucht wird. Wärmepumpen können somit praktisch überall eingesetzt werden. Sie brauchen jedoch eine Hilfsenergie, um die Wärmeübertragung zu ermöglichen.

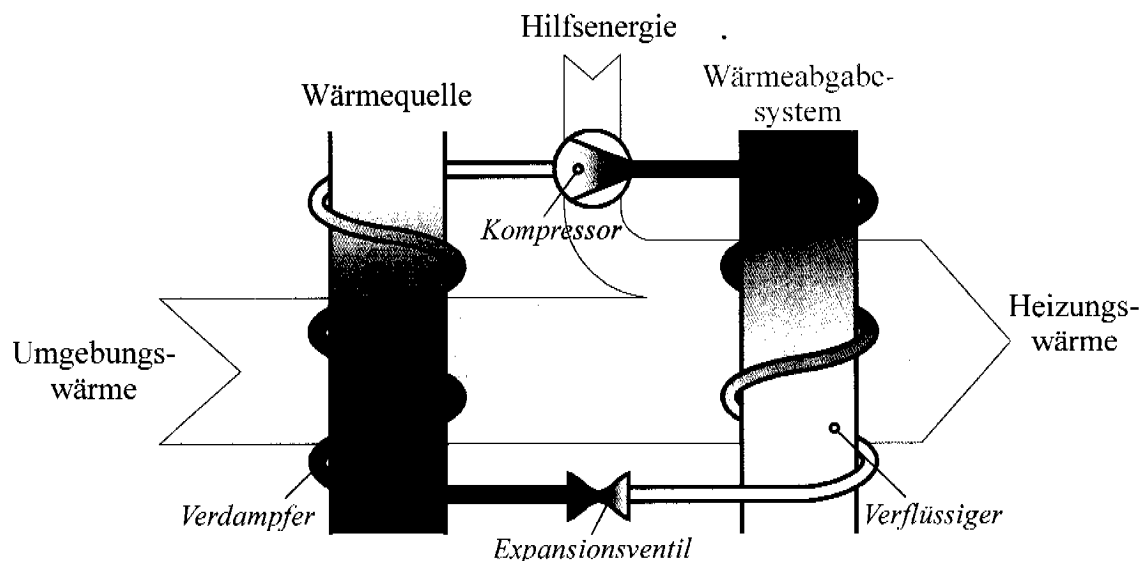


Abb. 1.1: Funktionsschema der Wärmepumpe

Der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe wird normalerweise mit der Arbeitszahl oder mit der Leistungszahl COP (englisch: coefficient of performance) quantifiziert. Die Arbeitszahl stellt die Beziehung zwischen erzeugter Wärme und verbrauchter Hilfsenergie dar, hingegen entspricht der COP der Beziehung zwischen erzeugter Wärmeleistung und verbrauchter Hilfsleistung. Bei



den heutigen Wärmepumpen bewegt sich der COP um den Wert 3-4, als Konsequenz ist gegenüber den konventionellen Elektrowiderstandsheizungen oder Ölbrennern (mit  $COP=1$ ) der Energieverbrauch und die Umweltverschmutzung entsprechend reduziert. Im Markt existieren verschiedene Wärmepumpentypen, die sich hauptsächlich im Wärmeabgabemedium, in der Wärmequelle und in der Betriebsart unterscheiden.

### ***Wärmequellen für die Wärmepumpen***

In der Schweiz werden als Wärmequellen für die Wärmepumpen hauptsächlich die Erd-, die Grundwasser- oder die Umgebungsluftwärme verwendet. Die Geothermie entspricht der Wärme, welche in der Erdkruste gespeichert wird. Diese stammt einerseits von den thermischen Prozessen in der Erde und andererseits von der Sonnenstrahlung und Konvektion mit der Umgebungsluft. Die Wärmeentnahme wird anhand von einer Erdwärmesonde ermöglicht, diese entspricht Rohrbündeln, welche in tiefe Bohrungen hineingebracht werden. In der Schweiz erreichen die Erdwärmesonden normalerweise eine Tiefe von 50-250 Meter.

Die Umgebungsluftwärme kann durch Einsaugen der Umgebungsluft in die Wärmepumpe ausgenutzt werden. Diese Wärme ist am einfachsten zu nutzen, da Umgebungsluft überall vorhanden ist und kein spezieller Aufbau benötigt wird.

Offensichtlich hängt der Wirkungsgrad der Wärmepumpe jeweils von der durchschnittlichen Quellentemperatur ab sowie von der Fähigkeit der Quelle, die Wärme abzugeben. Die Erde oder das Grundwasser besitzen normalerweise ein grösseres Wärmepotential, verursachen jedoch wegen der Bohrarbeiten einen grösseren Aufwand und höhere Anschaffungskosten.

### ***Wärmeabgabe***

Das Wärmeabgabemedium sorgt für den Wärmetransport von der Wärmepumpe in das Haus. Normalerweise wird Heizwasser (für Heizanlagen mit Heizkörper- und Fussbodenheizung) oder Luft (für Heizanlagen mit aktiver Lüftung) für diese Aufgabe gewählt.

Wenn das Heizwasser als Wärmeabgabemedium gewählt wird, kann die Wärmepumpe zusätzlich für die Erwärmung des Trinkwassers verwendet werden. In diesem Fall darf aus hygienischen Gründen der Heizwasserkreislauf nicht mit dem Trinkwasserkreislauf im Kontakt kommen, deshalb werden für die Wärmeübertragung in den Warmwasserspeicher Wärmetauscher eingesetzt.

Es können verschiedenartige hydraulische Schaltungen für die Wärmeabgabe mit Heizwasser gewählt werden, in Abhängigkeit vom Gebäudetyp und von der Heizungsart. Standardschaltungen für die gewöhnlichen Kleinwärmepumpenanlagen sind in [11] beschrieben.

### ***Betriebsart***

Die Betriebsart kann je nach Wärmepumpentyp, Wärmequelle und Wärmeabgabesystem unterschiedlich sein. Die Art der Heizungsregelung wird hauptsächlich vom Kompressortyp bestimmt. Bei einem Kompressor mit variabler Drehzahl kann die Wärmemenge kontinuierlich geregelt werden, wogegen bei einem Kompressor mit nichteinstellbarer Drehzahl die Wärmepumpe nur ein- und ausgeschaltet und die Wärme nur mittels Heizpaketen abgegeben werden kann.

Zusätzlich wird bei Kombianlagen (wenn die Wärmepumpe sowohl für die Gebäudeheizung als auch für die Warmwasseraufbereitung eingesetzt wird) eine Koordination zwischen der Speicherladung und der Heizung des Gebäudes benötigt. Bei Wärmepumpen mit zwei Verflüssigern kann die Warmwasseraufbereitung parallel zur Gebäudeheizung betrieben werden. Wenn jedoch die Raum- und die Speicherheizung über einen einzigen Verflüssiger verfügt, soll wegen den grossen Temperaturunterschiede die Raumheizung alternativ zur Speicherheizung geregelt werden.

Die meisten Wärmepumpen in Einfamilienhäusern werden mit einem nicht-einstellbaren Kompressor betrieben und verwenden das Heizwasser als Wärmeabgabemedium. Diese Kleinwärmepumpenanlagen werden heutzutage fast ausschliesslich mit witterungsgeführten Zweipunkt-Reglern betrieben. Dabei wird die Heizwassertemperatur mittels einer Kennlinie mit Hysterese in Funktion der Aussenlufttemperatur geregelt.

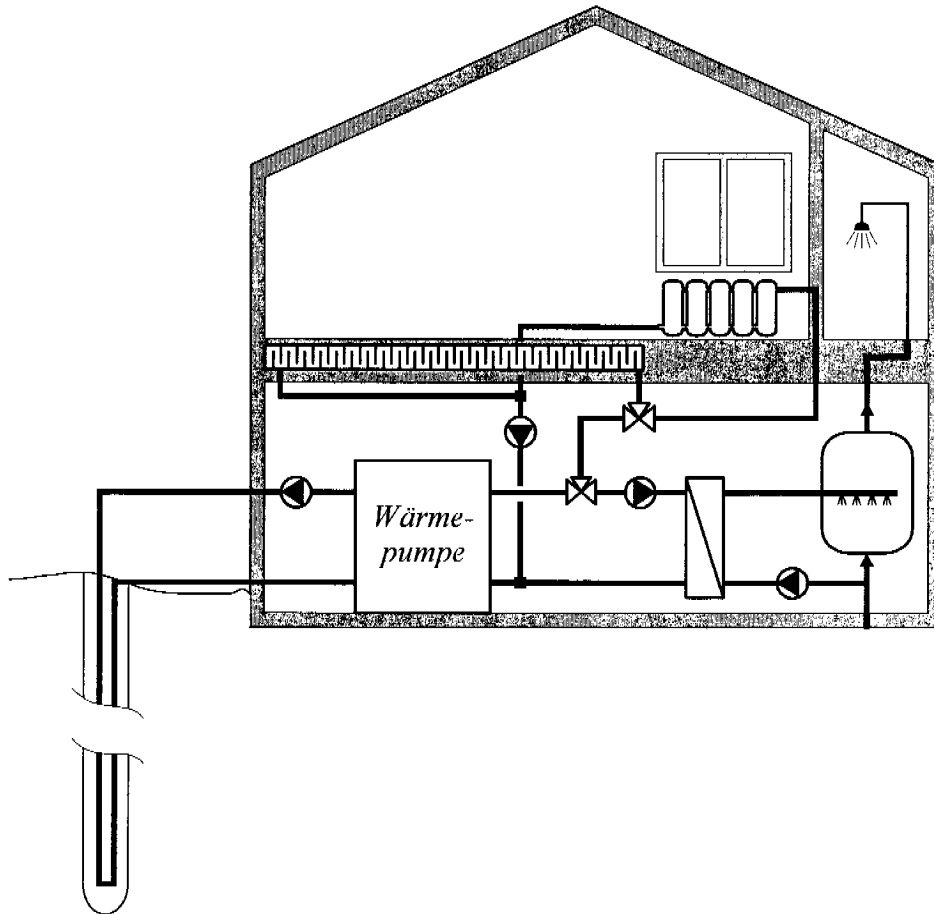


Abb. 1.2 Vereinfachte Darstellung eines Heizungssystems einer Kombianlage mit Sole/Wasser-Wärmepumpe.

## 1.1 Motivation

Der konventionelle Zweipunkt-Rücklauftemperaturregler ist eine sehr einfache Strategie, um die Heizung einer Kleinwärmepumpenanlage zu betreiben. Mit dieser Regelungsart versucht man meistens die Wärmeabgabe zu optimieren, während spezielle Forderungen wie Wärmepumpenarbeitszahl und variable Kostenperioden weniger berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass der effektive Hilfsenergieverbrauch und die Heizungskosten bezüglich der abgegebenen Wärme und des Heizkomforts nicht optimal sind. Deshalb sind sowohl die Hausbesitzer als auch betroffene Bundesstellen wie in der Schweiz das Bundesamt für Energie interessiert neue Regelungsstrategien zu untersuchen, welche mehr Gewicht auf die Optimierung des Wirkungsgrades der Wärmepumpe und die Herabsenkung der Heizungskosten setzen.

Die Verbesserungen, welche durch neue Regelungsstrategien ermöglicht werden können, sind folgendermassen beschrieben:

**a) Minimierung des Hilfsenergieverbrauchs**

- *Längere Laufzeiten der Wärmepumpe:* Bei konventionellen Zweipunkt-Reglern kann die Dauer der Heizpulse nicht vorgegeben werden. Das hat zur Folge, dass die Heizpulse oft zu kurz sind und deswegen die Arbeitszahl der Wärmepumpe schlecht ist.
- *Optimierung der Wärmepumpenarbeitszahl:* Die Wärmepumpe sollte immer dann eingeschaltet werden, wenn die Temperatur der Wärmequelle höher ist, so dass die Arbeitszahl maximiert werden kann.

**b) Minimierung der Heizkosten**

In vielen Kantonen der Schweiz gelten nachts die sogenannten Niedertarife, bei welchen die elektrische Energie deutlich weniger kostet. Solche Niedertarifzeiten sollten ausgenützt werden, um die Gesamtkosten der Heizung zu senken. Die Tariffenster können im konventionellen Regler höchstens teilweise berücksichtigt werden, z.B. durch Einführung eines Zeitprogramms mit verschiedenen Sollraumtemperaturen.

**c) Allgemeine Verbesserung des Regelungskonzepts**

- *Ersetzung der abstrakten Rücklauf-temperatur-Heizkurve:* In klassischen Reglern erfolgt die Einstellung der Kennlinie von den Fachleuten empirisch; die richtige Einstellung muss vielmehr durch den Betreiber nach und nach gefunden werden. Die neuen Einstellparameter sollten aussagekräftiger sein.
- *Entkopplung der Heizkurve vom Zeitprogramm:* Jede Änderung des Zeitprogramms bedingt eine neue Einstellung der Rücklauf-temperatur-Heizkurve. Es wäre deshalb sinnvoll, eine Regelungsstrategie zu entwickeln, welche den Heizkomfort unabhängig vom Zeitprogramm gewährleistet.
- *Automatische Erkennung der Gebäude-Heizkurve im Regler:* Die Einstellung der Wärmepumpenparameter durch den Betreiber ist oft schwierig. Zudem können die thermischen Eigenschaften des Gebäudes (z.B. wegen Trocknung bei Neubau) mit der Zeit ändern, weshalb die Parameter des Reglers mehrmals angepasst werden

müssen. Ein lernfähiger Regler sollte die thermischen Eigenschaften des Gebäudes automatisch identifizieren.

Diese Arbeit befasst sich hauptsächlich mit der Entwicklung und Optimierung neuer Heizungsregler für solche Kleinwärmepumpenanlagen sowie mit der Entwicklung neuer Methoden für den fairen Vergleich zwischen den neu entwickelten Regelungsstrategien und dem konventionellen Zweipunkt-Regler.

## 1.2 Ausgangslage

Am Institut für Mess- und Regeltechnik wurde bereits eine neue Regelungsstrategie basierend auf die modellbasierte prädiktive Regelung (MPC, von englisch Model Predictive Control) mit Pulsbreitenmodulation (PBM) entwickelt und erfolgreich an einem Wohnobjekt mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe [34, 39] getestet. Der MPC-Regler sorgt für eine optimale Verteilung der Wärme in Bezug auf die thermische Trägheit des Gebäudes, der Wettervorhersage für die nächsten 24 Stunden, sowie die Niedertarif- und Sperrzeiten der Elektrizitätswerke. Dabei werden die Kosten bzw. der elektrische Verbrauch minimiert und der Komfort bleibt vergleichbar mit konventionellen Regelungsstrategien. Da die Wärmepumpe mit einem einstufigen Kompressor arbeitet, wird mittels Pulsbreitenmodulation die notwendige Energie in „Wärmepaketen“ geeigneter Grösse dem Gebäude zugeführt. Die PBM sorgt dafür, dass die Wärmepumpe nicht zu oft ein- und ausgeschaltet wird; somit wird die Lebensdauer des Verdichters verlängert.

Parallel wurde am Prüfstand des Instituts eine Wärmepumpenanlage aufgebaut, um dynamische Untersuchungen an einer industriellen Sole/Wasser-Wärmepumpe durchzuführen [5, 41, 42]. Durch eine geeignete Regelung des Prüfstandes sollen realistische Temperaturtransienten an den Eingängen der Testwärmepumpe generiert werden. Die Sollwertverläufe sollen in Echtzeit durch Simulation eines Gebäudemodells und eines Erdsondenmodells berechnet werden (Emulation). Die neuen Heizungsregler können somit auf der Testwärmepumpe getestet werden und anhand der Gebäudeemulation können die Randbedingungen für einen fairen Vergleich zwischen Wärmepumpenreglern reproduziert werden. Am Anfang dieser Arbeit waren sowohl der Aufbau der Anlage als auch die Schnittstelle mit den Simulationsrechnern und die Signalerfassung bereits abgeschlossen, es fehlten noch die Regelung der Anlage und die Simulationsmodelle.

## 1.3 Ziele der Arbeit

Die Ziele dieser Arbeit sind einerseits die Erweiterung des MPC-Reglers und andererseits die Vervollständigung des Wärmepumpenprüfstandes für die Emulationen. Hauptsächlich sollen folgende Punkte untersucht werden:

### *Erweiterung des MPC-Reglers*

- **Identifikation der Gebäudeparameter:** Ein grosser Nachteil des MPC-Reglers gegenüber anderen Regelungsstrategien ist, dass die Reglerparameter bezüglich dem Gebäudetyp schwierig einzustellen sind. Der Regler soll deshalb mit einer Parameteridentifikationsmethode erweitert werden, welche anhand der durchgeführten Messungen die thermischen Eigenschaften des Gebäudes schätzt. Es sollen mehrere Methoden für die Parameteridentifikation untersucht und miteinander verglichen werden. Der endgültige Identifikationsalgorithmus soll folgende Bedingungen erfüllen:
  - Robustheit gegenüber Modellierungsfehlern und Rauschen.
  - Erkennung der Sonnenstrahlung.
  - Übereinstimmung der identifizierten Parameter mit physikalischen Grössen wie Zeitkonstante oder statische Kennlinie des Gebäudes.
  - Gute Reproduzierbarkeit des thermischen Verhaltens des Gebäudes für einen Zeithorizont von 24 Stunden.
- **Erweiterung des Reglers für Sole/Wasser-Wärmepumpen:** Der MPC-Regler in [39] ist nur für Luft/Wasser-Wärmepumpen geeignet, da die COP-Vorhersage (notwendig für die Heizoptimierung) anhand der Lufttemperaturprognosen (Quellentemperatur) bestimmt wird. Da der COP für Sole/Wasser-Wärmepumpen mit der Erde- bzw. Soletemperatur verknüpft ist, soll eine andere Strategie für die COP-Vorhersage realisiert werden.
- **Erweiterung des Reglers für Kombianlagen:** Der neue Regler soll sowohl für die Gebäudeheizung als auch für die Warmwasseraufbereitung eingesetzt werden. Deshalb soll eine geeignete Regelungsstrategie für die Trinkwassererwärmung und die Koordination der Kombianlageheizung entwickelt werden.

### ***Vervollständigung des Wärmepumpenprüfstandes***

- **Entwicklung des Anlagereglers:** Um die Emulation zu ermöglichen, sollen die Temperaturen am Eingang der Testwärmepumpe geregelt werden. Dafür soll ein geeigneter Regler basierend auf der Arbeit in [19] entwickelt werden.
- **Entwicklung der Simulationsmodelle für die Emulation:** Das thermische Verhalten des Gebäudes, der Erdwärmesonde und des Warmwasserspeichers soll möglichst genau reproduziert werden, um möglichst korrekte Vergleiche der Wärmepumpenregler anhand der Emulationen zu ermöglichen.
- **Durchführung der Emulationen:** Die neuen Regelungsstrategien sollen anhand der Emulationen am Prüfstand miteinander und mit dem herkömmlichen witterungsgeführten Rücklauftemperaturregler verglichen werden.

## **1.4 Zusammenarbeit**

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts „Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen“ im Auftrag des Bundesamtes für Energie in Zusammenarbeit mit Gabathuler AG, Satag Thermotechnik AG und Siemens Building Technologies durchgeführt [4, 12, 13, 32]. Das Projekt wurde in vier Phasen aufgeteilt, wobei die Arbeit zu dieser Dissertation in den letzten zwei Phasen ausgeführt wurde. Ziel des Projekts war, neue Regelungsstrategien für Kleinwärmepumpenanlagen zu entwickeln, welche sich auf die Pulsbreitenmodulation stützen. In den ersten zwei Phasen wurden drei neue Regelkonzepte entwickelt; der energiekenmlinienbasierte Regler (Gabathuler AG), der laufzeitkenmlinienbasierte Regler (Siemens) und der modellbasierte prädiktive Regler (Institut für Mess- und Regeltechnik). Diese wurden anschliessend an einer Referenzanlage getestet und miteinander verglichen. In den Phasen 3 und 4 wurden die Regler für Kombianlagen erweitert und am Wärmepumpenprüfstand anhand von Emulationen getestet.

Im Zusammenhang mit dem Projekt wurden im Auftrag des Bundesamtes für Energie folgende Projekte durchgeführt:

- Kurztestmethode für Kleinwärmepumpenanlagen [42]
- Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW [2, 11]
- Berechnungsmodul für Erdwärmesonden [18]

## **1.5 Beschreibung der Referenzanlagen für die Untersuchungen**

Vor einer Vermarktung soll der Wärmepumpenregler in echten Referenzanlagen untersucht und ausgewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus praktischen Gründen der Wärmepumpenregler nicht direkt in einem Wohnobjekt getestet, stattdessen wurden Simulationsmodelle verwendet. Das erste Wohnobjekt entspricht der Referenzanlage in Winterthur-Seen für das Projekt „Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen“. Eine weitere Anlage für die Untersuchungen entspricht einem Simulationsmodell, welches in der Fachhochschule beider Basel hergestellt wurde. Dieses Modell weist eine sehr träge Dynamik im Wärmeabgabesystem auf und stellt deshalb einen interessanten Fall für die Untersuchungen der Parameteridentifikationsmethoden dar. Die Haupteigenschaften der Referenzanlagen sind im folgenden kurz beschrieben.

### ***Referenzanlage Winterthur-Seen***

Das Gebäude entspricht einem sanierten Einfamilienhaus aus Massivbau (vgl. Abb. 1.3), dessen Heizung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe betrieben wird und das ein gemischtes Wärmeabgabesystem (Fussbodenheizung/Heizkörperheizung) besitzt. Wegen der grossen Fensterflächen auf der Südseite des Gebäudes sind die Sonnenstrahlungseffekte und daher die Störgrössen auf die Raumtemperatur grösser.

Die hydraulische Schaltung und die wichtigen Messstellen sind in Abb. 1.4 veranschaulicht. Im Heizwasserrücklauf ist ein Speicher installiert, um die Trägheit des Wärmeabgabesystems zu erhöhen.





Abb. 1.3: Referenzanlage Winterthur-Seen

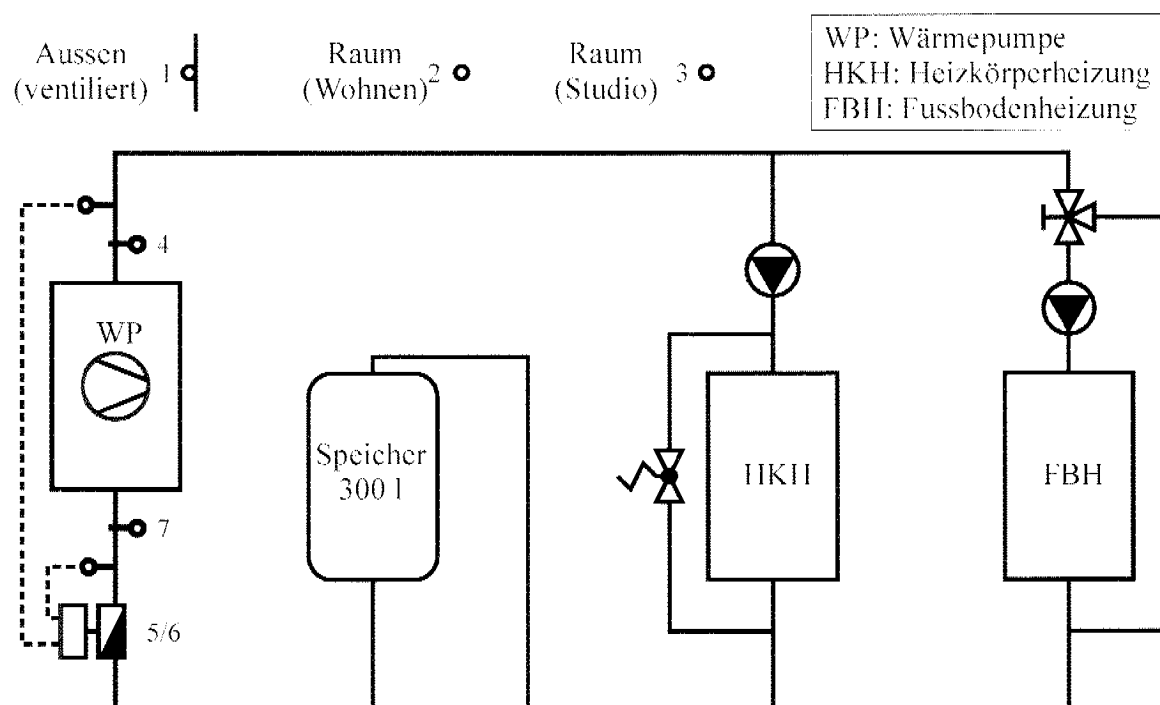


Abb. 1.4: Wärmcabgabesystem der Referenzanlage Winterthur-Seen (vgl. [13, 39]).

Messstellen: 1: Aussenlufttemperatur (Nordseite); 2: Wohnzimmertemperatur;  
3: Bürottemperatur; 4: Verflüssiger-Austrittstemperatur; 5: Wärmepumpen-Wärmeleistung;  
6: Volumenstrom; 7 Verflüssiger-Eintrittstemperatur.

### ***Simulationsmodell der Fachhochschule beider Basel***

Das Gebäudemodell (illustratives Schema in Abb. 1.5) ist in drei Stockwerke mit je einem Raum auf der Nordseite und einem Raum auf der Südseite aufgeteilt [2]. Das Wärmeabgabesystem besteht ausschliesslich aus der Fussbodenheizung; für die Raumtemperaturregelung ist in jedem Raum zusätzlich ein Thermostatventil montiert. Die Heizung wird mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe betrieben.

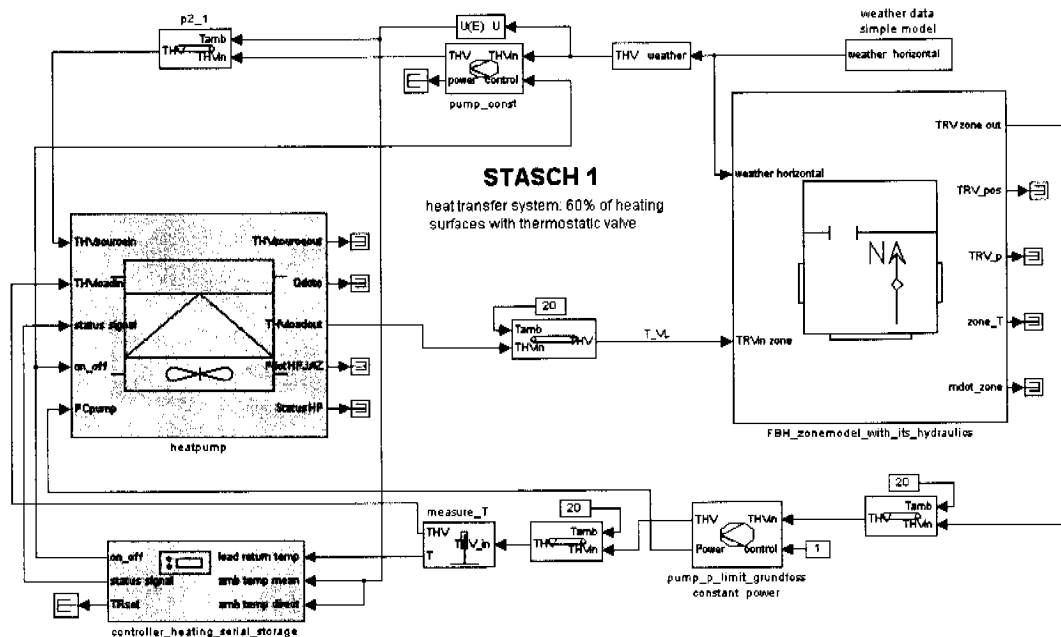


Abb. 1.5: Illustratives Schema des Gebäudemodells der FHBB

## **1.6 Aufbau der Arbeit**

### ***Kapitel 2: Modellierung einer Heizungsanlage für den Reglerentwurf***

In diesem Kapitel werden zwei einfache Gebäudemodelle vorgestellt, welche im adaptiven MPC-Wärmepumpenregler gebraucht werden. Diese Modelle sind in der Lage, das thermische Verhalten des Gebäudes zu beschreiben und vorherzusagen. Die Struktur dieser Gebäudemodelle ist sehr einfach, damit die Parameter online anhand eines Systemidentifikationsalgorithmus in einer echten Anlage geschätzt werden können.

### ***Kapitel 3: Parameteridentifikation eines Hausmodells***

Es werden verschiedene Parameteridentifikationsmethoden untersucht und auf das Problem der Gebäudeidentifikation angewendet. Als Randbedingung wird

das Hausmodell vom Kapitel 2 verwendet. Nach einer kurzen Einführung in die Systemidentifikation werden die bekanntesten Offline-Minimierungsalgorithmen für die Parameteridentifikation vorgestellt. Weiter werden die rekursiven Methoden untersucht, welche für die Echtzeitparameteridentifikation benötigt werden und im adaptiven MPC-Regler implementiert werden sollen. Schliesslich werden die Resultate der Echtzeit-Parameteridentifikation der Referenzanlagen vom Abschnitt 1.5 gezeigt.

#### ***Kapitel 4: Adaptiver modellbasierter prädiktiver Regler mit Pulsbreitenmodulation***

Der modellbasierte prädiktive Wärmepumpenregler wird erweitert, einerseits für die Heizungsregelung einer Kombianlage (Warmwasseraufbereitung und Gebäudeheizung) und andererseits mit einem Echtzeit-Parameteridentifikations-Algorithmus. Zusätzlich wird das Regelkonzept für Sole/Wasser-Wärmepumpen angepasst.

#### ***Kapitel 5: Alternative Regelvarianten***

Im Rahmen des Projekts „Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen“ wurden neben dem MPC-Regler zwei weitere Reglervarianten basierend auf der Pulsbreitenmodulation entwickelt. Diese sind der energie kennlinienbasierte Regler und der laufzeitkennlinienbasierte Regler. In diesem Kapitel wird das Prinzip dieser neuen Regelungsstrategien und des konventionellen Zweipunkt-Reglers erläutert.

#### ***Kapitel 6: Dynamische Emulation am Wärmepumpenprüfstand***

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Regelung des Wärmepumpenprüfstandes für die dynamischen Emulationen erläutert. Es werden das Gesamtkonzept des Anlagereglers beschrieben und die Hauptresultate der Regelung während einer Emulation gezeigt. Ferner werden die Simulationsmodelle des Gebäudes, des Warmwasserspeichers und der Erdwärmesonde vorgestellt, welche für die Emulationen gebraucht werden.

#### ***Kapitel 7: Vergleich der Resultate***

Es wird das Resultat der Emulationen am Wärmepumpenprüfstand und der Vergleich zwischen Wärmepumpenreglerstrategien gezeigt.

---

## 2 Modellierung einer Heizungsanlage mit Wärmepumpe für den Reglerentwurf

Die Heizungsanlage eines Gebäudes muss so konzipiert werden, dass die Temperatur in den Räumen möglichst komfortabel bleibt; damit sollen die Wärmeverluste vom Raum nach aussen gut ausgeglichen werden. Da diese Wärmeverluste hauptsächlich von der Temperaturdifferenz zwischen Raum und Aussenluft verursacht werden, wird der Wärmebedarf des Gebäudes mit den gewöhnlichen Regelkonzepten durch eine statische Kennlinie in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur bestimmt. Mit dem modellbasierten prädiktiven Regelungskonzept (MPC), welches in [39] und in Kapitel 3 beschrieben ist, besteht die Möglichkeit, die Hausheizung auch dynamisch zu optimieren, um zusätzlich die Trägheit des Gebäudes für die Berechnung des momentanen Wärmebedarfs zu berücksichtigen. Bei dieser Reglervariante wird jedoch ein dynamisches Gebäudemodell gebraucht, welches die Raumtemperaturverläufe möglichst gut vorhersagen kann. Zu diesem Zweck wird ein einfaches dynamisches Modell des Gebäudes gewählt, um eine schnelle Echtzeit-Heizungsoptimierung mit dem MPC-Regler bzw. eine Online-Parameteridentifikation des Gebäudemodells zu ermöglichen (vgl. Kapitel 3 und 4). Die Modelle, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, beschränken sich auf die Beschreibung eines Gebäudes mit Fussboden- und Heizkörperheizung. Die Zimmer werden durch einen einzigen Raum modelliert. Die Temperatur des Raummodells stellt eine mittlere Temperatur für das ganze Gebäude dar, da für die Wärmepumpenregelung nur der Gesamtenergiebedarf benötigt wird. Für die Regelung der lokalen Raumtemperatur in den einzelnen Zimmern werden Thermostatventile oder Handventile eingesetzt.

In diesem Kapitel werden zwei vereinfachte Hausmodelle vorgestellt, welche für die Parameteridentifikation und die Optimierung der Gebäudeheizung in Kapitel 3 verwendet werden. Im Abschnitt 2.1 wird das Hausmodell dritter Ordnung erläutert [33], welches für den MPC-Regler in [13, 34, 39] verwendet wurde. Im Abschnitt 2.2 wird das neue, weiter vereinfachte Hausmodell zweiter Ordnung beschrieben, welches für die adaptive MPC-Regelung (Kapitel 3 und 4) verwendet wird. In Abschnitt 2.3 werden die Modelle validiert

und miteinander verglichen. Schliesslich werden in Abschnitt 2.4 die Diskretisierung und weitere notwendige Anpassungen für die korrekte Einsetzung des Hausmodells im MPC-Regler beschrieben.

## 2.1 Hausmodell dritter Ordnung

Das Hauptziel eines Gebäudemodells ist die korrekte Beschreibung der Dynamik der wichtigsten Signale, wie die Raumlufttemperatur oder die Heizwassertemperatur. Dazu müssen zuerst alle möglichen Grössen definiert werden, welche das thermische Verhalten des Gebäudes beeinflussen können. In der Praxis sind vor allem der Verlauf der Aussenlufttemperatur und der Heizungswärme bedeutend für die Beschreibung des thermischen Verhaltens des Gebäudes. Somit soll das Gebäudemodell in der Lage sein, einerseits die Heizungsleistung von der Wärmepumpe zur Raumluft und andererseits die Wärmeverluste von der Raumluft nach aussen zu beschreiben. Dieses Modell wird im Wärmepumpenregler implementiert und wird benützt, um das Verhalten des Gebäudes vorherzusagen. Bei der Installation des Wärmepumpenreglers in einem neuen Haus müssen die Parameter des Modells dem Gebäudetyp angepasst werden. Damit die Validierung des Gebäudemodells nicht zu schwierig wird, muss die Struktur des Modells möglichst einfach gewählt werden.

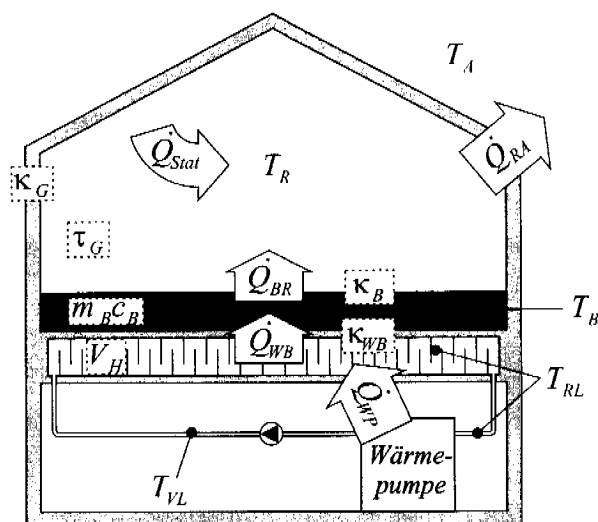


Abb. 2.1: Schema des Gebäudemodells dritter Ordnung. Das Modell besteht aus den drei Speichereinheiten Heizwasser, Fussboden und Raum mit den uniformen Temperaturen  $T_{RL}$ ,  $T_B$  und  $T_R$ .

Im Hausmodell dritter Ordnung wird die Dynamik des Heizwassers, des Fussbodens und des Raums beschrieben. Sie werden als Speicher mit einer uniformen Temperatur modelliert. Die Differentialgleichungen werden mit einer Wärmestrombilanz hergeleitet. In Abb. 2.1 ist das Schema des Gebäudemodells dritter Ordnung dargestellt. Die drei Speicher (Heizwasser im Fussboden, Fussboden und Raum) sind durch Wärmeströme gekoppelt. Das resultierende Differentialgleichungssystem besteht aus der Gesamt-Wärmestrombilanz der drei Speicher. Für den Heizwasserspeicher im Fussboden lautet die Differentialgleichung:

$$\rho_W \cdot c_W \cdot V_H \cdot \dot{T}_{RL}(t) = \dot{Q}_{WP}(t) - \dot{Q}_{WB}(t). \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Das Heizwasser im Fussboden bzw. in den Heizkörpern wird als Speicher mit Volumen  $V_H$ , Dichte  $\rho_W$ , spezifischer Wärmekapazität  $c_W$  und uniformer Temperatur  $T_{RL}$  modelliert. Das Heizwasser zirkuliert durch die Wärmepumpe und wird von  $T_{RL}$  auf  $T_{VL}$  geheizt, wobei angenommen wird, dass die Temperatur am Eintritt der Wärmepumpe gleich der Speichertemperatur ist. Der resultierende Wärmepumpenwärmestrom  $\dot{Q}_{WP}$  fließt ohne Verluste in den Heizwasserspeicher. Weiter verursacht die Temperaturdifferenz zwischen Heizwasserspeicher und Fussboden einen Wärmestrom  $\dot{Q}_{WB}$  vom Heizwasser in den Fussboden.

Der zweite Speicher im Gebäudemodell ist der Fussboden, dessen Energiebilanzgleichung lautet:

$$m_B \cdot c_B \cdot \dot{T}_B(t) = \dot{Q}_{WB}(t) - \dot{Q}_{BR}(t). \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Ähnlich wie beim Heizwasserspeicher wird auch der Fussboden als Speicher mit einer Masse  $m_B$ , der mittleren spezifischen Wärmekapazität  $c_B$  und der uniformen Temperatur  $T_B$  modelliert. Der Wärmestrom  $\dot{Q}_{WB}$  koppelt den Heizwasserspeicher in (Gl. 2.1) mit dem Fussboden und  $\dot{Q}_{BR}$  modelliert den Wärmestrom vom Fussboden in den Raum.

Der letzte Speicher ist der Raum und beschreibt das Verhalten der mittleren Raumlufttemperatur  $T_R$ :

$$\rho_G \cdot c_G \cdot V_G \cdot \dot{T}_R(t) = \dot{Q}_{BR}(t) - \dot{Q}_{RA}(t) + \dot{Q}_{Stat}. \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Die Wärmeverluste vom Raumspeicher nach aussen werden mit dem Wärmestrom  $\dot{Q}_{RA}$  modelliert. Der Wärmestrom  $\dot{Q}_{Stat}$  repräsentiert eine Wärmequelle und modelliert die mittleren statischen Tages-Wärmestromgewinne aus der diffusen Sonnenstrahlung, dem Cheminée, der Küche, den Personen usw. Der Parameter  $V_G$  entspricht dem Volumen des Raums und  $\rho_G$  bzw.  $c_G$  sind die hypothetische Dichte bzw. spezifische Wärmekapazität des Raums. Die letzten zwei Parameter entsprechen einem mittleren Wert der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität zwischen Luft und Wandmaterial; deshalb müssen die Aussen- bzw. Innenwände im Hausmodell dritter Ordnung nicht separat berücksichtigt werden. Das Resultat ist, dass die Dynamik der modellierten Raumtemperatur träger ist als die echte Raumlufthtemperatur. Somit können vom Hausmodell dritter Ordnung z.B. die momentanen Effekte einer starken Sonnenstrahlung auf die Raumlufthtemperatur nicht nachvollzogen werden. Der modellbasierte Heizungsregler benötigt jedoch nur das mittlere Verhalten der Raumlufthtemperatur, um den Wärmebedarf zu berechnen. Somit müssen die schnellen Schwankungen der Raumlufthtemperatur nicht modelliert werden.

Um das gekoppelte Differentialgleichungssystem zu vervollständigen, werden noch die Gleichungen der Wärmeströme zwischen den Speichern gebraucht. Anhand des bekannten Hauptsatzes der offenen Systeme (Energiebilanz) aus der Thermodynamik kann die Wärmepumpenleistung als Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  und Rücklauftemperatur  $T_{RL}$  der Wärmepumpe bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{WP}(t) = c_W \cdot \rho_W \cdot \dot{V}_W(t) \cdot (T_{VL}(t) - T_{RL}(t)), \quad (\text{Gl. 2.4})$$

wobei  $\dot{V}_W(t)$  der Volumenstrom des zirkulierenden Heizwassers ist. Für die Regelung wird jedoch die Wärmepumpenleistung aus der Wärmepumpenkennlinie des Herstellers bestimmt, da in der Praxis (aus Kostengründen) der Volumenstrom im Heizwasserkreislauf nicht gemessen wird. Die Wärmeströme zwischen Heizwasser und Fussboden, Fussboden und Raum bzw. Raum und Aussenluft werden durch einen linearen Ansatz angenähert (Wärmeleitung):

$$\text{Heizwasser} \rightarrow \text{Fussboden: } \dot{Q}_{WB}(t) = \kappa_{WB} (T_{RL}(t) - T_B(t)) \quad (\text{Gl. 2.5})$$

$$\text{Fussboden} \rightarrow \text{Raum: } \dot{Q}_{BR}(t) = \kappa_B (T_B(t) - T_R(t)) \quad (\text{Gl. 2.6})$$

$$\text{Raum} \rightarrow \text{Aussen: } \dot{Q}_{RA}(t) = \kappa_G (T_R(t) - T_A(t)). \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Die Wärmequelle  $\dot{Q}_{Stat}$  bestimmt die Heizgrenze, bei welcher das Gebäude geheizt werden muss. Mit dem Ansatz  $\dot{Q}_{Stat} = \kappa_G \cdot \Delta T_{Stat}$  können die effektiven Wärmeverluste folgendermassen definiert werden:

$$\dot{Q}_{RA}(t) - \dot{Q}_{Stat} = \kappa_G (T_R(t) - (T_A(t) + \Delta T_{Stat})) = \kappa_G (T_R(t) - \tilde{T}_A(t)). \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Durch Einsetzen der (Gl. 2.8) in (Gl. 2.3) und mit einer Laplace-Transformation kann die Übertragung von  $T_A$  nach  $T_R$  untersucht werden. Die Übertragungsfunktion entspricht einem Tiefpassfilter erster Ordnung:

$$T_R = \frac{1}{\tau_G s + 1} \left( (T_A + \Delta T_{Stat}) + \frac{1}{\kappa_G} \dot{Q}_{BR} \right), \text{ mit } \tau_G = \frac{\rho_G c_G V_G}{\kappa_G}. \quad (\text{Gl. 2.9})$$

Der Parameter  $\tau_G$  ist die Zeitkonstante des Tiefpassfilters. Er definiert die Trägheit des Gebäudes. Für die weiteren Untersuchungen wird die intuitivere Zeitkonstante  $\tau_G$  anstatt  $\rho_G c_G V_G$  als Modellparameter verwendet.

Ähnlich dem Raumspeichermode (vgl. (Gl. 2.9)) kann auch für die Beschreibung der Fussbodendynamik die Fussbodenzeitkonstante  $\tau_B = m_B c_B / \kappa_B$  eingeführt werden. Da auch die Grössenordnung des Wärmeleitkoeffizienten  $\kappa_B$  schwer zu schätzen bzw. zu interpretieren ist, kann der Parameter  $\kappa_B$  durch  $\kappa_B^* A_B$  (wo  $A_B$  die Fussbodenfläche und  $\kappa_B^*$  der spezifische Wärmeleitkoeffizient pro Fläche ist) ersetzt werden.

Die Gleichungen (Gl. 2.1), (Gl. 2.2) und (Gl. 2.3) mit (Gl. 2.5), (Gl. 2.6) und (Gl. 2.8) können mit einiger Umrechnung zu einer Zustandsraumdarstellung umgeschrieben werden. Das resultierende gekoppelte Differentialgleichungssystem lautet:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{RL}(t) \\ \dot{T}_B(t) \\ \dot{T}_R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\kappa_{WB}}{\rho_W c_W V_H} & \frac{\kappa_{WB}}{\rho_W c_W V_H} & 0 \\ \frac{\kappa_{WB}}{m_B c_B} & -\frac{\kappa_{WB} + \kappa_B}{m_B c_B} & \frac{\kappa_B}{m_B c_B} \\ 0 & \frac{\kappa_B}{\kappa_G \tau_G} & -\frac{\kappa_B + \kappa_G}{\kappa_G \tau_G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{RL}(t) \\ T_B(t) \\ T_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\rho_W c_W V_H} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_G} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_A(t) + \Delta T_{Stat} \\ \dot{Q}_{WP}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 2.10})$$



Weiter ist für die Charakterisierung des thermischen Verhaltens des Gebäudes der statische Wärmebedarf in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur  $T_A$  von Interesse. Die statische Übertragungsfunktion des Differentialgleichungssystems in (Gl. 2.10) gelöst nach  $\dot{Q}_{WP}$  lautet:

$$\dot{Q}_{WP,Stat} = \kappa_G (T_R - (T_A + \Delta T_{Stat})) = \kappa_G (T_R - \tilde{T}_A). \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Genauer gesagt, ist der statische Wärmebedarf des Gebäudes proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Sollraumtemperatur und Aussentemperatur. Die statische Kennlinie des Gebäudemodells dritter Ordnung von (Gl. 2.10) ist in Abb. 2.2 dargestellt.

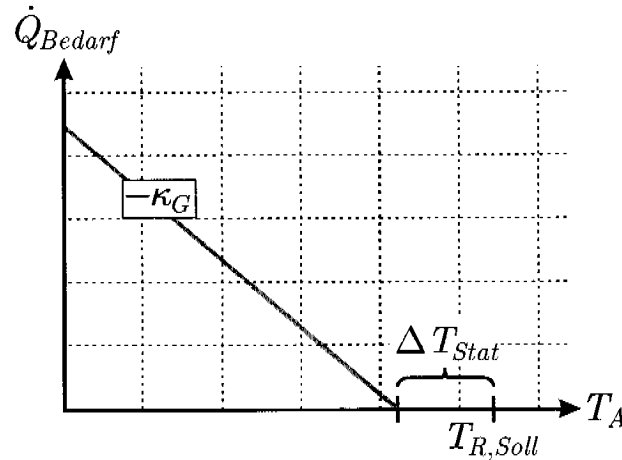


Abb. 2.2: Statische Kennlinie des Gebäudemodells dritter Ordnung.

Das Gebäudemodell dritter Ordnung hängt insgesamt von den 7 Parametern  $V_H$ ,  $\kappa_{WB}$ ,  $m_{BCB}$ ,  $\kappa_B$ ,  $\tau_G$ ,  $\kappa_G$  und  $\Delta T_{Stat}$  ab. Diese sollen jedem Wohnobjekt, in welchem der MPC-Regler mit dem Hausmodell dritter Ordnung installiert wird, angepasst werden. Dieses Hausmodell ist für die Beschreibung der Gebäude mit einem trägen Fussboden geeignet und entkoppelt weiter die Heizwassertemperatur von der Raumtemperatur.



Ähnlich dem Hausmodell dritter Ordnung in Abschnitt 2.1 werden die Gleichungen des Modells anhand einer Wärmestrombilanz bestimmt. Für die zwei Speicher lauten diese:

$$\text{Heizwasser:} \quad \rho_W \cdot c_W \cdot V_H \cdot \dot{T}_{RL}(t) = \dot{Q}_{WP}(t) - \dot{Q}_{WR}(t) \quad (\text{Gl. 2.12})$$

$$\text{Raum:} \quad \rho_G \cdot c_G \cdot V_G \cdot \dot{T}_R(t) = \dot{Q}_{WR}(t) - \dot{Q}_{RA}(t) + \dot{Q}_{Stat}. \quad (\text{Gl. 2.13})$$

Der Wärmestrom  $\dot{Q}_{WR}$  fließt direkt vom Heizwasser in den Raum. Die Trägheit des Fussbodens wird teilweise vom Raumspeicher (Gl. 2.13) durch die Parameter  $\rho_G$  und  $c_G$  modelliert. Die Gleichungen der Wärmeströme werden anhand eines linearen Ansatzes definiert:

$$\text{Heizwasser} \rightarrow \text{Raum:} \quad \dot{Q}_{WR}(t) = \kappa_{WR} (T_{RL}(t) - T_R(t)) \quad (\text{Gl. 2.14})$$

$$\text{Effektive Wärmeverluste:} \quad \dot{Q}_{RA}(t) = \kappa_G (T_R(t) - (T_A(t) + \Delta T_{Stat})). \quad (\text{Gl. 2.15})$$

In (Gl. 2.15) wurden die Wärmegewinne  $\dot{Q}_{Stat}$  bereits berücksichtigt. Durch Einsetzen der (Gl. 2.14) und (Gl. 2.15) in (Gl. 2.12) und (Gl. 2.13) kann das Hausmodell zweiter Ordnung in eine Zustandsraumdarstellung umgeformt werden:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{RL}(t) \\ \dot{T}_R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\kappa_{WR}}{\rho_W c_W V_H} & \frac{\kappa_{WR}}{\rho_W c_W V_H} \\ \frac{\kappa_{WR}}{\kappa_G \tau_G} & -\frac{\kappa_{WR} + \kappa_G}{\kappa_G \tau_G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{RL}(t) \\ T_R(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\rho_W c_W V_H} \\ \frac{1}{\tau_G} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_A(t) + \Delta T_{Stat} \\ \dot{Q}_{WP}(t) \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 2.16})$$

Die Zeitkonstante des Raums  $\tau_G$  wird wie im Hausmodell dritter Ordnung (Gl. 2.9) definiert. Wie in (Gl. 2.11) und in Abb. 2.2 gezeigt wird, definieren die Parameter  $\kappa_G$  bzw.  $\Delta T_{Stat}$  wiederum die Stetigkeit bzw. Verschiebung der statischen Kennlinie des Gebäudemodells.

## 2.3 Modellvalidierung

Wie in Kapitel 3 und 4 erläutert, wird das Gebäudemodell vom modellbasierten prädiktiven Regler gebraucht, um eine korrekte Heizungsoptimierung durchzuführen. Die Hausmodelle dritter und zweiter Ordnung sind eine grosse Vereinfachung der Realität, deshalb wird folgendermassen geprüft, ob im Mittel diese Modelle die Dynamik eines Einfamilienhauses nachvollziehen können.

Für die Validierung werden erstens die Messreihen von der Referenzanlage Winterthur-Seen aus [13] verwendet. In Abb. 2.4 wird die gemessene Raumtemperatur für die Heizperiode 20.11.00-04.01.01 mit den simulierten Temperaturen der Gebäudemodelle zweiter und dritter Ordnung verglichen.

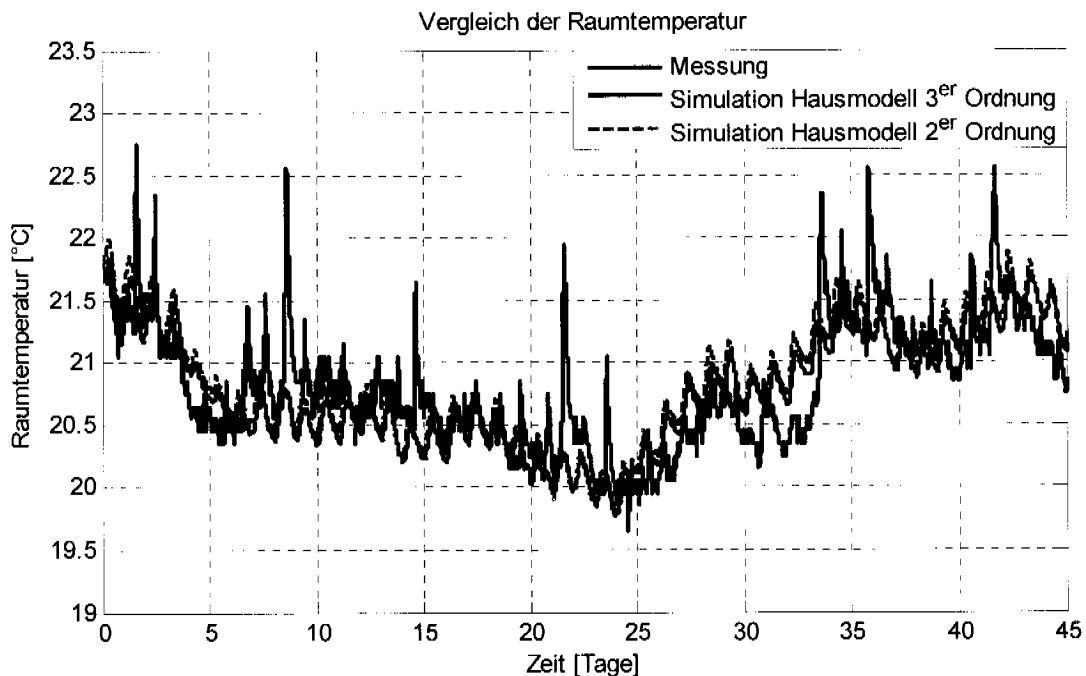


Abb. 2.4: Vergleich zwischen gemessenem Raumtemperaturverlauf und den simulierten Daten des Modells zweiter bzw. dritter Ordnung. Messreihe 20.11.00-4.1.01.

Das mittlere Verhalten kann von beiden Modellen gut nachvollzogen werden, jedoch werden die schnellen Temperaturschwankungen während der starken Sonnenstrahlungen von den zwei Modellen nicht reproduziert. Um die Sonnenstrahlungseffekte zu berücksichtigen, sollten die Modelle mit einem Sonnenstrahlungsmodell erweitert werden. Der Vergleich der Rücklauftemperatur für die zweite Woche der Messreihe ist in Abb. 2.5 dargestellt.

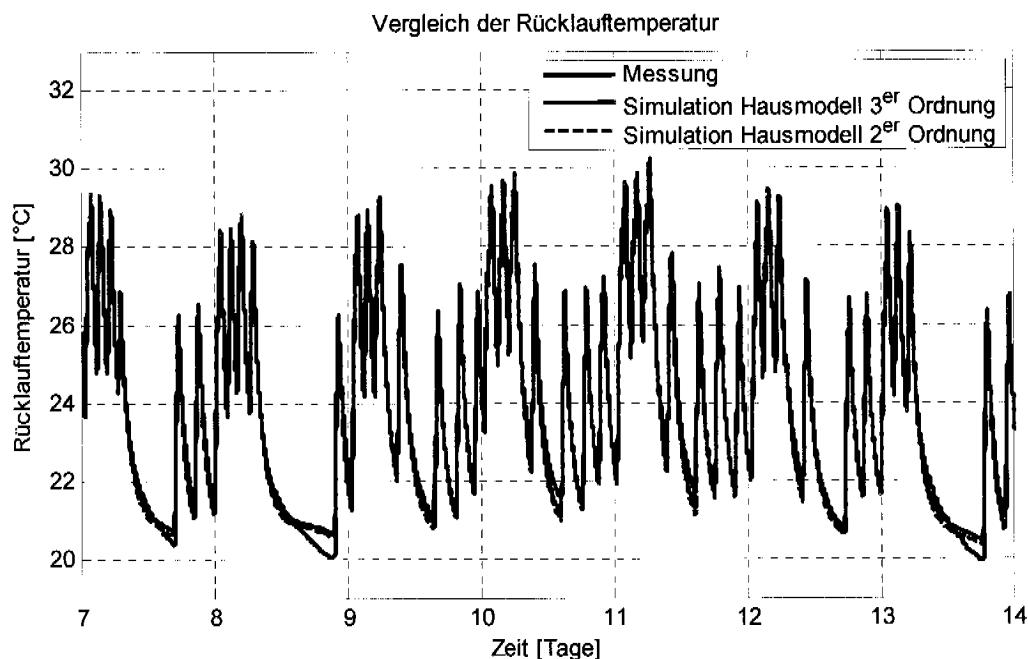


Abb. 2.5: Vergleich zwischen gemessener Heizwasser-Rücklauftemperatur und den Simulationsresultaten der Modelle zweiter und dritter Ordnung.  
Messreihe 20.11.00-4.1.01.

Die Schwankungen der Temperatur beim Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe werden von beiden Modellen gut nachvollzogen. Wenn die Wärmepumpe lang ausgeschaltet bleibt, werden die Wärmeverluste im Heizkreislauf durch die Temperatursenkung der Heizwasserrücklauftemperatur ersichtlich (Tage 8 und 13 in Abb. 2.5). Da diese Wärmeverluste in den Modellen nicht berücksichtigt werden, bleiben die Heizwassertemperaturen der Simulationsmodelle höher als die effektiven Temperaturen. Die Trägheit der Heizwassertemperatur in der Referenzanlage Winterthur-Seen wird eher vom Speicher (vgl. Abschnitt 1.5) im Heizwasserkreislauf als vom Fussboden verursacht, deshalb werden mit dem Hausmodell zweiter Ordnung ähnliche Resultate wie mit dem Hausmodell dritter Ordnung erhalten. Die Werte der identifizierten Parameter (Tabelle 2.1) und die Übertragungsfunktion (Bodediagramm) zeigen ebenfalls, dass das Verhalten beider Modelle ähnlich ist. Auch die identifizierte Gebäudekennlinie stimmt mit den experimentellen Resultaten überein.

Tabelle 2.1: Identifizierte Parameter für das Hausmodell zweiter und dritter Ordnung mit der Referenzanlage Winterthur-Seen.

	Hausmodell 3 <sup>er</sup> Ord.	Hausmodell 2 <sup>er</sup> Ord.
$V_H$	1.28 [m <sup>3</sup> ]	1 [m <sup>3</sup> ]
$\kappa_{WB}$ bzw. $\kappa_{WR}$	1160 [W/K]	1100 [W/K]
$m_{BCB}$	455.10 <sup>5</sup> [J/K]	-
$\kappa_B$	6155 [W/K]	-
$\kappa_G$	260 [W/K]	260 [W/K]
$\tau_G$	240 [h]	240 [h]
$\Delta T_{Stat}$	3.3 [K]	3.3 [K]

Weiter wird das Beispiel einer trägeren Fussbodenheizung mit dem Modellvorschlag der Fachhochschule beider Basel (FHBB, vgl. Abschnitt 1.5) gezeigt. Der Raumtemperaturvergleich ist in Abb. 2.6 dargestellt. Die Tageschwankungen sind vor allem von der Sonnenstrahlung verursacht und können somit von den Simulationsmodellen nicht reproduziert werden. Der mittlere Temperaturverlauf wird jedoch von beiden Modellen gut nachvollzogen.

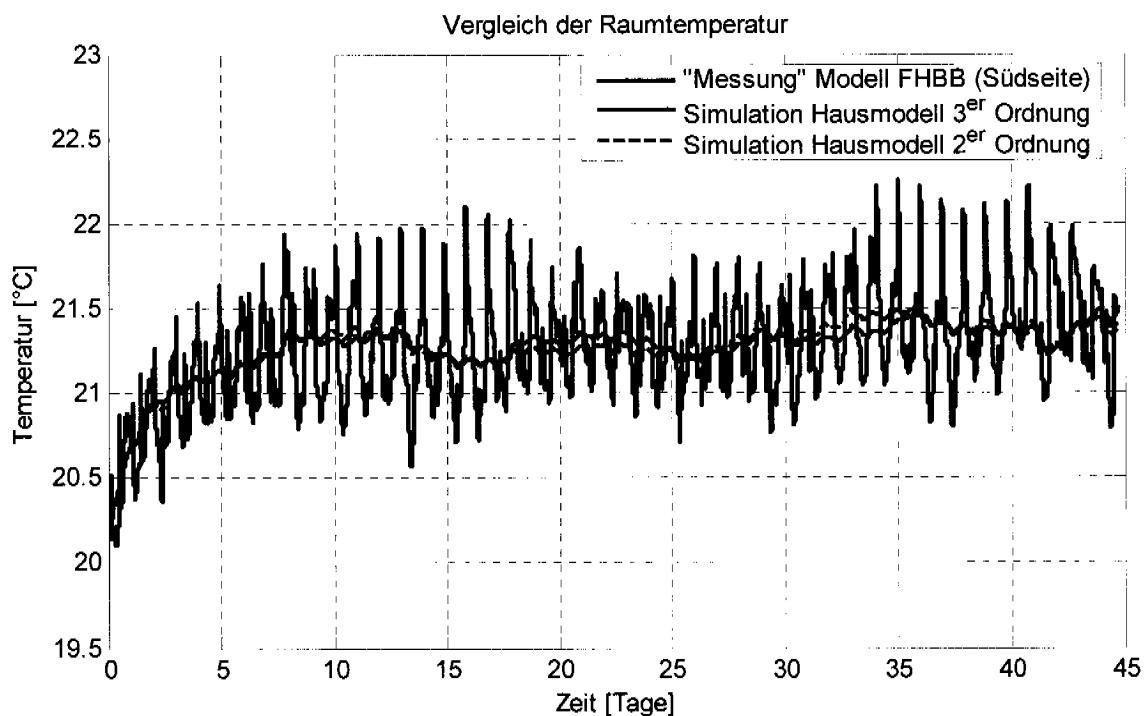


Abb. 2.6: Vergleich zwischen simulierter Messung des Raumtemperaturverlaufs mit dem FHBB-Modell und der simulierten Raumtemperatur des Modells zweiter bzw. dritter Ordnung.

Der Vergleich der Rücklauftemperatur des Heizwassers zeigt jedoch, dass das Hausmodell zweiter Ordnung die Schwankungen der Messung nicht so gut reproduziert. Die Begründung dafür ist, dass die Dynamik des Heizwasserspeichers im Hausmodell zweiter Ordnung träger gewählt werden muss, um die mittlere Spreizung zwischen der Heizwassertemperatur und der Raumtemperatur zu erhalten. Das Hausmodell dritter Ordnung kann hingegen der Rücklauftemperatur besser folgen, da der Fussbodenspeicher eine mittlere Temperaturspreizung zwischen dem Raum und dem Heizwasser ermöglicht.

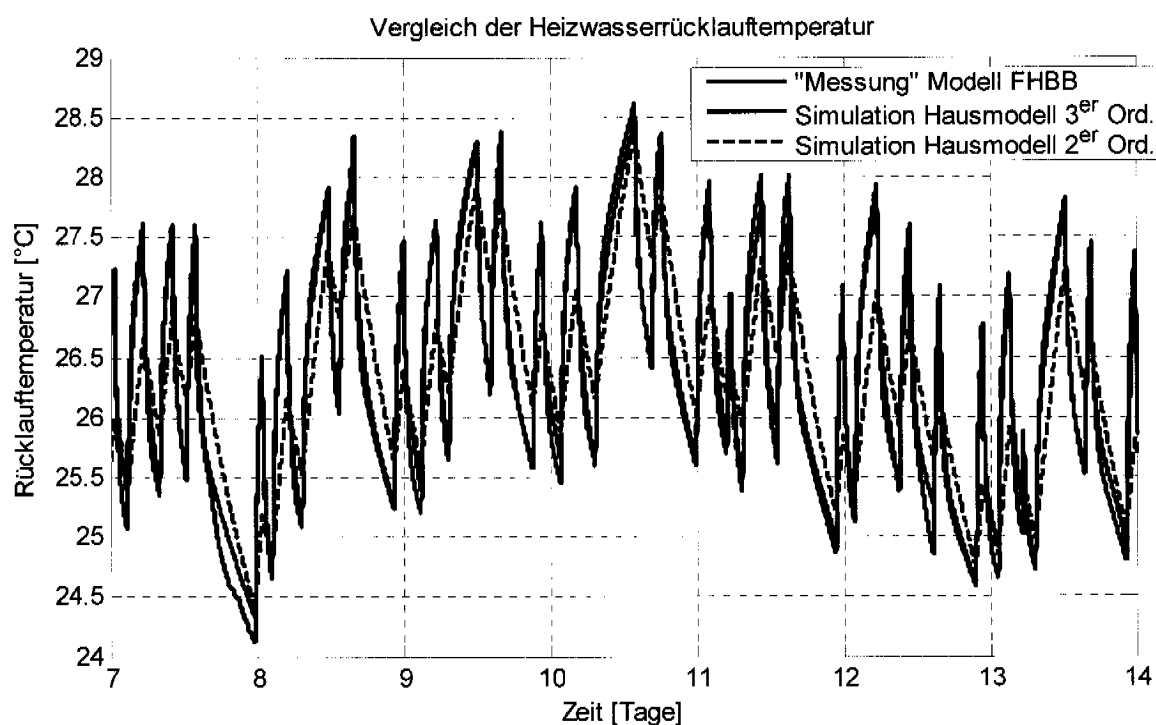


Abb. 2.7: Vergleich zwischen Simulation der gemessenen Heizwasserrücklauftemperatur mit dem FHBB-Modell und der simulierten Rücklauftemperatur des Modells zweiter bzw. dritter Ordnung.

Im Gegenteil zum Hausmodell zweiter Ordnung, liefert das Hausmodell dritter Ordnung zusätzlich die Schätzung der Bodentemperatur. Um die Parameter genauer zu identifizieren, wird auch diese Temperatur mit den Messungen verglichen. Die Abb. 2.8 zeigt die gemessenen Temperaturen in drei verschiedenen Tiefen des Fussbodens im Gebäudemodell der FHBB und die entsprechende Simulation des Hausmodells dritter Ordnung.

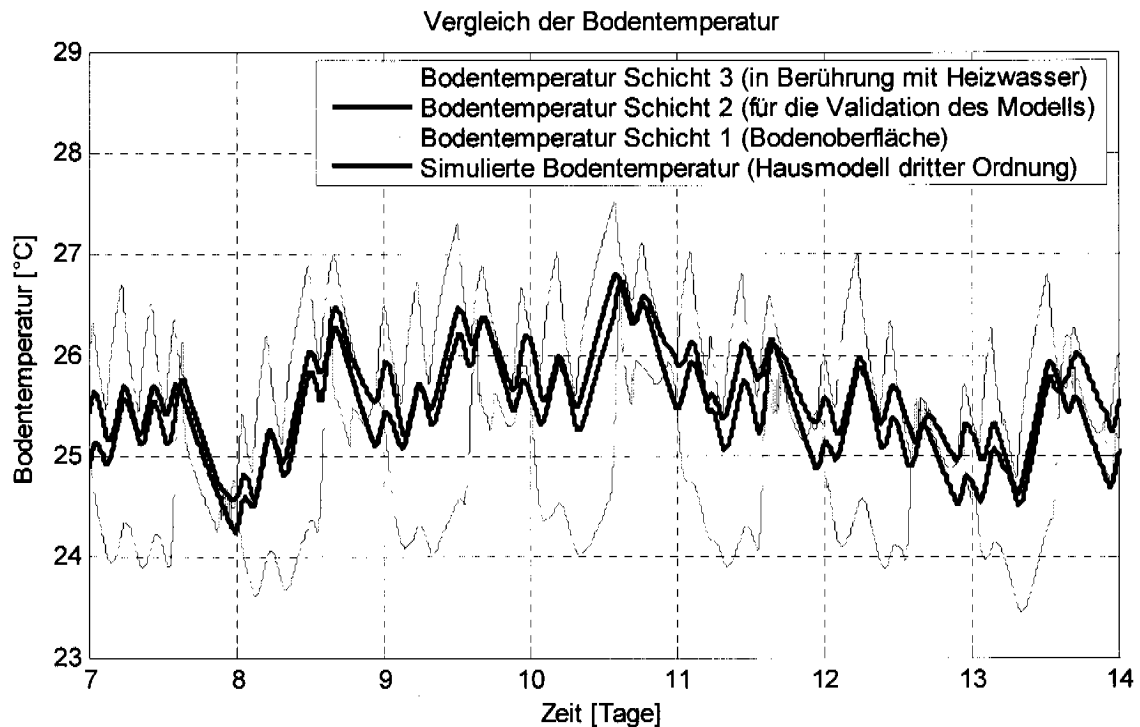


Abb. 2.8: Vergleich zwischen der Simulation der gemessenen Bodentemperatur des Raums auf der Südseite (FHBB-Modell) und der simulierten Bodentemperatur des Modells dritter Ordnung. Für die Validierung des Modells dritter Ordnung wurde die Bodentemperatur der zweiten Schicht gewählt.

Der optimale Parametersatz und die Güte der Lösung hängen auch von der Tiefe ab, in welcher die Temperatur gemessen wird. Für die Validierung wurde hier die mittlere Schicht verwendet. In der Praxis ist die Messung der Bodentemperatur kaum möglich, da die Wahl getroffen werden soll, in welchem Raum und in welcher Bodentiefe der Sensor positioniert werden muss. Deshalb wird auch die Identifikation der sieben Parameter des Hausmodells dritter Ordnung für echte Wohnobjekte schwieriger.

Die Parameter der Hausmodelle zweiter und dritter Ordnung für das FHBB-Gebäudemodell sind in der Tabelle 2.2 zusammengefasst. Wie auch Abb. 2.7 zeigt, ist im Hausmodell zweiter Ordnung das identifizierte Heizwasservolumen und somit die Trägheit des Heizwasserspeichers deutlich grösser im Vergleich zu den Resultaten des FHBB-Modells. Auch der Wärmeleitungskoeffizient ist tief, um höhere mittlere Heizwassertemperaturen zu erreichen. Die statische Kennlinie und die Zeitkonstante des Gebäudes sind in beiden Modellen ungefähr gleich. Die statische Kennlinie entspricht der effektiven Gebäudekennlinie des FHBB-Modells. Der Parameter von  $m_{BCB}$  im Hausmodell dritter Ordnung enthält viele Informationen (Dichte, spezifische Wärme-



kapazität, Dicke und Fläche des Bodens). Dieser ist deshalb schwierig nachzuprüfen bzw. ist nicht sehr übersichtlich. Mit typischen Werten der Dichte  $\rho$  (500-2500 kg/m<sup>3</sup>), der spezifischen Wärmekapazität  $c_B$  (1000-3000 J/(K.kg)) bzw. der Dicke (10-20 cm) für den Boden und bei einer Gesamt-Bodenfläche  $A_B$  von 170 m<sup>2</sup> (vgl. [36]) stimmt die Grössenordnung des Parameters  $m_B c_B$  in der Tabelle 2.2 überein.

Tabelle 2.2: Identifizierte Parameter für das Hausmodell zweiter und dritter Ordnung mit dem Modell der FHBB.

	Hausmodell 3er Ord.	Hausmodell 2er Ord.
$V_H$	1.5 [m <sup>3</sup> ]	7.4 [m <sup>3</sup> ]
$\kappa_{WB}$ bzw. $\kappa_{WR}$	3060 [W/K]	510 [W/K]
$m_B c_B$	420.10 <sup>5</sup> [J/K]	-
$\kappa_B$	560 [W/K]	-
$\kappa_G$	125 [W/K]	125 [W/K]
$\tau_G$	280 [h]	260 [h]
$\Delta T_{Stat}$	-3.4 [K]	-3.4 [K]

Obwohl das Hausmodell dritter Ordnung bessere Resultate liefern kann, zeigen diese Untersuchungen, dass das Hausmodell zweiter Ordnung vernünftige Ergebnisse ergibt und auch für die Heizungsregelung der Gebäude mit trägerer Fussbodenheizung eingesetzt werden kann.

## 2.4 Modellanpassung für den Regler

Das Hausmodell, welches im Abschnitt 2.2 oder 2.1 vorgestellt wurde, wird im modellbasierten prädiktiven Heizungsregler einerseits zur Parameteridentifikation und andererseits für die Optimierung des Heizungsverlaufs gebraucht. Da der Heizungsregler digital ist, wird eine zeitdiskrete Version des Hausmodells erfordert. Die Abtastzeit des zeitdiskreten Hausmodells soll gleich der Abtastzeit des MPC-Reglers gewählt werden; diese beträgt typischerweise 1 Stunde. Bei der Diskretisierung sollen die Approximationsfehler und die Aliasing-Effekte der Signale, welche von der hohen Abtastzeit verursacht werden, möglichst klein gehalten werden.

Das zeitdiskrete Zustandsraummodell kann am einfachsten mit der Euler-Approximation gefunden werden. Für das Hausmodell zweiter Ordnung lautet die diskrete Version des Zustandsraummodells in (Gl. 2.16):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{RL}(t+1) \\ T_R(t+1) \end{bmatrix} &= F \cdot \begin{bmatrix} T_{RL}(t) \\ T_R(t) \end{bmatrix} + G \cdot \begin{bmatrix} T_A(t) + \Delta T_{Stat} \\ \dot{Q}_{WP}(t) \end{bmatrix} \\ y(t) &= H \cdot \begin{bmatrix} T_{RL}(t) \\ T_R(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 2.17})$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } F &= \begin{bmatrix} 1 - t_s \frac{\kappa_{WR}}{\rho_W c_W V_H} & t_s \frac{\kappa_{WR}}{\rho_W c_W V_H} \\ t_s \frac{\kappa_{WR}}{\kappa_G \tau_G} & 1 - t_s \frac{\kappa_{WR} + \kappa_G}{\kappa_G \tau_G} \end{bmatrix} & G &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{t_s}{\rho_W c_W V_H} \\ \frac{t_s}{\tau_G} & 0 \end{bmatrix} \\ H &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ falls } T_R \text{ gemessen, } H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ sonst.} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 2.18})$$

Das Gebäudemodell dritter Ordnung wird mit der gleichen Methode diskretisiert. Die zeitdiskrete Differentialgleichung ist in [39] zu finden. Für eine korrekte Beschreibung des Systems wird eine Abtastzeit  $t_s$  von 1 bis 60 Sekunden gewählt. Für grössere Abtastzeiten sind ohne eine geeignete Signalfilterung Aliasing-Effekte zu erwarten.

Für die Aufgabe der Parameteridentifikation wird die Abtastzeit von 60 Sekunden für das zeitdiskrete Hausmodell gewählt. Der MPC-Regler operiert hingegen mit einer Abtastzeit von einer Stunde und liefert den mittleren Wärmeleistungsbedarf für diese Periode. Dafür wird ein zeitdiskretes Hausmodell mit derselben Abtastzeit benötigt. Die Abtastzeit des Gebäudemodells soll deshalb von einer Minute auf eine Stunde erhöht werden, mit der Bedingung, dass das neu abgetastete Modell das Verhalten des Gebäudes gut beschreiben kann. Zudem müssen die Signale vor der Abtastung mit einem vernünftigen Filter gefiltert werden, so dass keine wichtige Signalinformation verloren geht.

Für die Veränderung der Abtastrate des Gebäudemodells wird das einfache Euler-Verfahren (rückwärts) verwendet. Diese Methode ermöglicht die Darstellung mit einem Zustandsraum gleicher Ordnung und ist gegenüber anderen Methoden rechnerisch nicht aufwendig.

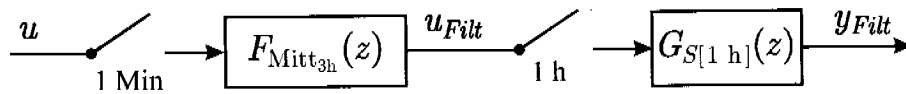
Laut Shannon-Theorem kann in den Signalen eines zeitdiskreten Systems mit Abtastzeit  $t_s$  höchstens die Frequenz  $1/(2t_s)$  vorkommen. In der Praxis soll jedoch für eine korrekte Beschreibung die Abtast-Frequenz mindestens zehn Mal grösser als die höchste bedeutende Frequenz jedes Signals sein. Da die Dynamik der Wärmepumpenleistung und der Heizwassertemperatur sehr schnell ist (1 bis 15 Minuten), müssen diese Größen vorher gefiltert werden, um in einem System mit einer Abtastzeit von einer Stunde die Aliasing-Effekte zu vermeiden. Um die Heizpulse mit dem MPC-Regler zu verteilen, wird die Methode der Pulsbreitenmodulation verwendet (weitere Informationen sind in Abschnitt 4.1.4 zu finden). Dabei darf die Wärmepumpe nur einmal jede 3-4 Stunden eingeschaltet werden. Innerhalb dieser Periode (Pulsbreite) kann die Schwankung der Raumtemperatur nicht optimiert werden (vgl. Kapitel 3), deshalb ist nur die mittlere Raumtemperatur von Bedeutung. Die beste Tiefpassfilter-Wahl für die Signale ist deshalb die Mittelwertfunktion über die Pulsbreite. In folgender Gleichung sind die Umformungen für die Filterung des Systems dargestellt:

$$F_{\text{Mitt}_{\text{PB}}}(z) \cdot \begin{bmatrix} T_{RL} \\ T_R \end{bmatrix} = F_{\text{Mitt}_{\text{PB}}}(z) \cdot G_S(z) \cdot \begin{bmatrix} T_A \\ \dot{Q}_{WP} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \text{Mitt}_{\text{PB}}(T_{RL}) \\ \text{Mitt}_{\text{PB}}(T_R) \end{bmatrix} = G_S(z) \cdot \begin{bmatrix} \text{Mitt}_{\text{PB}}(T_A) \\ \text{Mitt}_{\text{PB}}(\dot{Q}_{WP}) \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 2.19})$$

Diese Gleichung zeigt, dass, um das Ausgangssignal zu mitteln, der Filter sowohl am Eingangssignal als auch am Ausgangssignal angewendet werden kann.  $G_S(z)$  ist die zeitdiskrete Übertragungsfunktion des Gebäudes und  $F_{\text{Mitt}_{\text{PB}}}(z)$  entspricht der Übertragungsfunktion der Mittelwertfunktion über die Pulsbreite. Da der Filter linear ist, können  $F_{\text{Mitt}_{\text{PB}}}$  und  $G_S$  ausgetauscht und die Fenstermittlung des Eingangssignals  $\text{Mitt}_{\text{PB}}(u)$  vor der Übertragungsfunktion des Gebäudes gebildet werden. Wie das obere Schema von Abb. 2.9 verdeutlicht, kann nach einer Drei-Stunden-Fenstermittlung des Eingangssignals das System auf einer höheren Abtastzeit gebracht werden. Dieses Vorgehen entspricht dem unteren Schema von Abb. 2.9 (d.h. die Signale werden nach der Übertragungsfunktion mit kleinerer Abtastzeit gemittelt), angenommen, dass die Ungenauigkeit der Abtastzeiterhöhung der Übertragungsfunktion genügend klein bleibt.

Signalflussbild des Modells für den LQ-MPC Regler (Abtastzeit 1 h, Mittelung 3 h)



Äquivalentes Modell mit Abtastzeit 1 Min, Mittelung 3 h

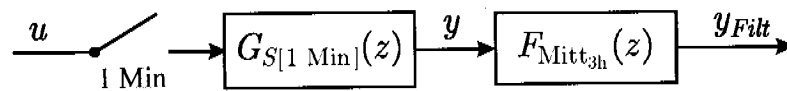


Abb. 2.9: Oben: Signalflussbild des Gebäudemodells angepasst für den MPC-Regler mit einer Abtastzeit von 1 h. Der Ausgang entspricht dem 3-h-Mittelwert (Pulsbreite). Unten: Äquivalentes Modell für die Berechnung des 3-h Mittelwertes mit 1 Min Abtastzeit.

Die Resultate der Simulationen sind in Abb. 2.10 dargestellt. Mit einer drei-stündigen Fenstermittelung der Eingangssignale (oberes Bild) folgt das zeitdiskrete Gebäudemodell mit einer Abtastzeit von eine Stunde (vgl. oberes Signalflussbild in Abb. 2.9) die Verläufe der gemittelten Raumtemperatur des Modells mit kleinerer Abtastzeit (unteres Signalflussbild in Abb. 2.9) sehr gut. Ohne Mittelung (unteres Bild in Abb. 2.10) sind die Aliasing-Fehler sehr stark und das Simulationsmodell mit der grossen Abtastzeit kann die Raumtemperatur nicht mehr korrekt reproduzieren.

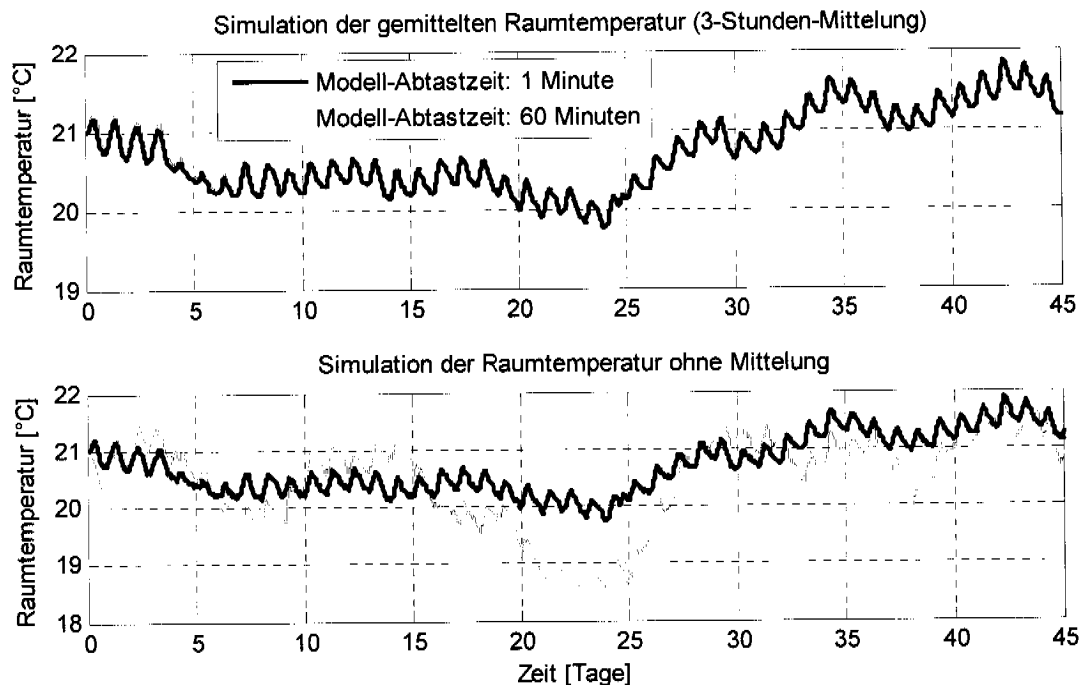


Abb. 2.10: Einfluss der Signalfilterung auf das zeitdiskrete Gebäudemodell für die LQ-MPC-Regelung (mit Abtastzeit 1 Stunde). Oben: Filterung der Eingangssignale mit einem 3-Stunden-Mittelwertfenster. Unten: Keine Filterung der Signale.

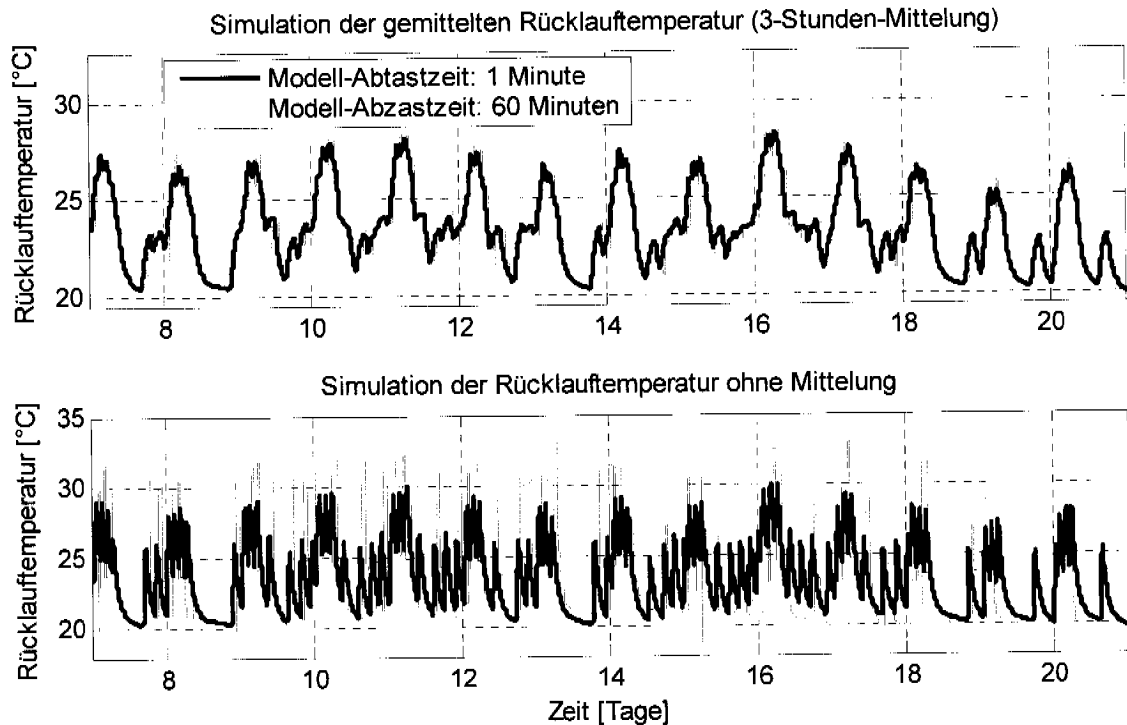


Abb. 2.11: Einfluss der Signalfilterung auf das zeitdiskrete Gebäudemodell für die LQ-MPC-Regelung (mit Abtastzeit 1 Stunde). Oben: Filterung der Eingangssignale mit einem 3-Stunden-Mittelwertfenster. Unten: Keine Filterung der Signale.

Die Rücklauftemperatur des Heizwassers weist höhere Frequenzen als die Raumtemperatur auf, wie das untere Bild von Abb. 2.5 zeigt. Nach der Mittelung kann jedoch das Gebäudemodell mit 1 Stunde Abtastzeit der gemittelten Rücklauftemperatur ziemlich gut folgen (Abb. 2.11, oberes Bild). Ohne Filterung (Abb. 2.11, unteres Bild) sind die Aliasing-Effekte sehr stark.

Für eine korrekte und eindeutige Signalrekonstruktion (z.B. mit dem Kalman-Filter) muss das System vollständig beobachtbar [14] sein. Die notwendige Bedingung für die vollständige Beobachtbarkeit lautet:

$$\text{Rank} \left( \begin{bmatrix} H^T & (H \cdot F)^T & \dots & (H \cdot F^{nx-1})^T \end{bmatrix} \right) \stackrel{!}{=} nx. \quad (\text{Gl. 2.20})$$

$F$  bzw.  $H$  sind die zeitdiskreten Systemmatrizen der Differentialgleichung bzw. der Ausgangsgleichung (vgl. (Gl. 2.17) und (Gl. 2.18) für das Modell zweiter Ordnung) und  $nx$  entspricht der Anzahl Zustandsgrößen. Eine schwächere Bedingung, falls (Gl. 2.20) nicht erfüllt ist, ist die Detektierbarkeit des Systems, das heisst, der Beobachter bleibt stabil und kann mit einer genügend langen Messung die Signale rekonstruieren, falls der Betrag der

nicht beobachtbaren zeitdiskreten Pole kleiner eins ist. Da in den gewöhnlichen Heizanlagen nur die Rücklauftemperatur des Heizwassers und die Aussentemperatur gemessen werden, soll das Hausmodell mit diesen zwei Signalen und der Wärmepumpenleistung aus der Herstellerkennlinie vollständig beobachtbar sein. Die Abb. 2.12 zeigt das Signalflussbild für die Rekonstruktion der Zustandsgrößen für das Hausmodell dritter und zweiter Ordnung. Mit dieser Konfiguration sind beide Systeme vollständig beobachtbar für das ganze Spektrum wählbarer Gebäudeparameter. Ohne Rückführung des Ausgangssignals  $T_{RL}$  bleibt das System detektierbar.

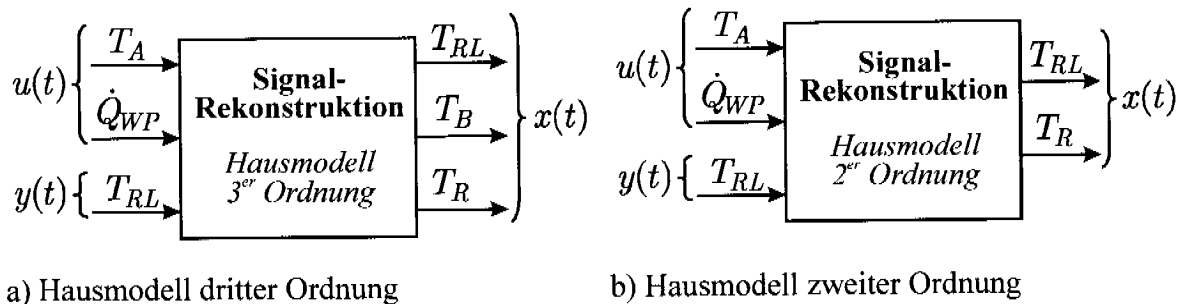


Abb. 2.12: Signalrekonstruktion anhand eines Beobachters mit dem Hausmodell dritter Ordnung (Bild a) und dem Hausmodell zweiter Ordnung (Bild b)

Falls auch die Parameter des Gebäudes identifiziert werden, wird das System in Abb. 2.12 möglicherweise nicht mehr beobachtbar und weitere Signale müssen rückgeführt werden (vgl. Kapitel 3).

Seite Leer /  
Blank leaf

---

### 3 Parameteridentifikation eines Hausmodells

Jede Wohnung besitzt eigene thermische Eigenschaften, welche von der Grösse, den Baumaterialien, den Fensterflächen und vom Heizungstyp des Gebäudes abhängen. Als Konsequenz muss jeder Heizungsregler dem Wohnungstyp angepasst werden, so dass die richtige Wärmemenge ins Gebäude gebracht wird. Zudem, insbesondere für neue Konstruktionen, können im Laufe der Jahre die thermischen Eigenschaften wegen Trocknung des Gebäudes ändern, somit muss der Heizungsregler immer wieder angepasst werden. In den herkömmlichen Heizungsreglern muss normalerweise einfach die statische Gebäudekennlinie definiert werden. Diese wird als lineare Funktion der Aussentemperatur angenommen und wird durch dessen Steigung und Offset definiert. Für den komplexeren MPC-Regler wird das thermische Verhalten des Gebäudes durch das Hausmodell zweiter oder dritter Ordnung (vgl. Kapitel 2) beschrieben. Ein Nachteil dieser Regelungsmethode ist, dass insgesamt 7 (Hausmodell dritter Ordnung) oder 5 (mit dem Hausmodell zweiter Ordnung) Parameter identifiziert werden müssen [32, 39]. Diese Parameter können nicht manuell im Reglergerät angepasst werden. Zuerst muss eine genügend lange Messung am Wohnobjekt durchgeführt und danach der optimale Parametersatz offline auf einem Rechner anhand eines Simulationsmodells bestimmt werden. Da dieses Verfahren sehr aufwendig ist, wird der MPC-Regler gegenüber den konventionellen Reglertypen bestraft. Das Ziel ist somit, einen geeigneten Echtzeitalgorithmus im Wärmepumpenregler zu implementieren, welcher die Aufgabe der Parameteridentifikation übernimmt.

Das Parameteridentifikationsverfahren soll den optimalen Parametersatz für das Gebäudemodell bestimmen, so dass einerseits der Fehler zwischen den aktuellen und den geschätzten Temperaturen minimal wird und andererseits das thermische Verhalten des Gebäudes für einen Zeithorizont von typischerweise einem Tag korrekt vorausgesagt wird. Da sich das Hausmodell aus physikalischen Differentialgleichungen zusammensetzt (vgl. Kapitel 2), müssen als weitere Bedingung die identifizierten Parameter physikalisch vertretbar sein. Das Systemidentifikationsproblem wird im allgemeinen als Minimierungsproblem formuliert, d.h. es werden die Parameter gesucht, welche eine Verlustfunktion (z.B. Summe der quadratischen Fehler zwischen Mes-



sung und Simulation) minimieren. Die Lösung der Systemidentifikation kann stark von Störungen wie Modellierungsfehlern (Vernachlässigung der Sonnenstrahlungseffekte bzw. des Fussbodens im Hausmodell zweiter Ordnung) und Messungenauigkeiten (Messrauschen und Approximation der Wärmepumpenleistung) abhängen. Im schlimmsten Fall kann die Lösung unbrauchbaren Parametern entsprechen, welche ein instabiles Modell ergeben können. Es ist deshalb wichtig, dass für das Problem der Parameterschätzung des Gebäudes die Identifikationsmethode robust gegen diese Störungen ist. Als weitere Aufgabe soll der mittlere Tagesenergiegewinn (z.B. wegen der Sonnenstrahlung) erkannt werden, so dass der Heizungsregler diese nachher kompensieren kann.

In diesem Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, um den optimalen Parametersatz des Hausmodells zweiter Ordnung zu identifizieren. Abschnitt 3.1 gibt eine kleine Erläuterung der parametrischen Identifikationsmethoden. Im Abschnitt 3.2 wird untersucht, ob und unter welchen Bedingungen das Problem der Parameteridentifikation lösbar ist. Die gewöhnlichen numerischen Suchverfahren werden in Abschnitt 3.3 beschrieben und abschliessend werden in Abschnitt 3.4 verschiedene rekursive Parameteridentifikationsmethoden untersucht, unter anderem der Algorithmus „Extended Kalman-Filter mit der rekursiven Maximum Likelihood Methode als Parameterschätzer“, welcher für die adaptive Version des MPC-Reglers in Kapitel 4 verwendet wird.

### 3.1 Einführung in die Systemidentifikation

Die Systemidentifikation umfasst eine grosse Gruppe von Methoden. Dazu existieren umfangreiche Vorgehensweisen, um die Lösung zu finden. In diesem Kapitel werden nur die Familien der parametrischen Identifikationsverfahren betrachtet, bei welchen das zu identifizierende Modell durch einen Parametersatz  $\theta$  parametrisiert wird. Das Problem der parametrischen Systemidentifikation besteht im Finden eines Parametersatzes eines Modells, so dass ein realer Prozess durch das Simulationsmodell gut reproduziert wird. Ein intuitiver Weg, um das Systemidentifikationsproblem zu lösen, ist die Minimierung der Fehler zwischen gemessenen und simulierten Signalen. Das Identifikationsproblem kann sonst z.B. auch statistisch als Maximierung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezüglich des Parametervektors  $\theta$  betrachtet werden.

Formell kann die Parameteridentifikation in vier Schritten (implizit oder explizit) durchgegangen werden (vgl. Abb. 3.1). Erstens muss die Modellstruktur gewählt werden. Offensichtlich wird eine einfache Struktur bevorzugt, so dass der Aufwand, um die Parameter zu identifizieren, kleiner wird. In diesem Kapitel werden nur die linearen und zeitdiskreten Modellstrukturen betrachtet, da diese für die Beschreibung eines Hausmodells hinreichend sind und in der Literatur ausführlich behandelt werden. Der zweite und dritte Schritt entsprechen der Wahl des zu minimierenden Gütekriteriums und dem Schätzer für die Ermittlung des Gütekriteriums.

	Modellstruktur	Gütekriterium	Methode	Minimierungsverfahren	
				Offline	Online
PLR	ARX	Summe der quadratische Residuen	Schätzung mit der PLR	I.S.	RLS
	ARMAX			ELS	
PEM	ARX	Allgemeine Funktion der Residuen	Prediction Error (PE)	I.S.	RLS
	ARMAX			Gradienten-Methode Gauss-Newton Levenberg-Marquardt	Rekursive Gauss-Newton (RPEM, RML.)
	OE				
	Zustandsraummodell		Kalman Filter (KF)		
Bayesian	Erweitertes Zustandsraummodell	Zustandskovarianzmatrix		Extended Kalman Filter als Parameterschätzer	
	Lineare Regression als Zustandsraummodell				

Abb. 3.1 Vorschlag für das Vorgehen der Parameteridentifikation mit drei verschiedenen Systemidentifikations-Ansätzen. Pseudolineare Regression (PLR), Prediction Error Methode (PEM) und Bayesscher Ansatz.  
Die Beschreibung der Modellstrukturen befindet sich in Abschnitt 3.1.1.

Als vierter Schritt muss der Minimierungsalgorithmus gewählt werden. In den meisten Fällen entspricht letzterer numerischen Suchalgorithmen, da das Minimierungsproblem oft analytisch nicht gelöst werden kann. Die letzten drei Schritte hängen hauptsächlich von der gewählten Familie der Identifikationsmethoden ab. In Abb. 3.1 werden die Methoden und Strukturen gezeigt, welche in diesem Kapitel untersucht werden. Diese werden in drei Familien unterteilt (Abschnitte 3.1.2-3.1.4), die Pseudolineare Regressionsmethode (PLR), die Prediction Error Methode (PEM) und der Bayessche Ansatz.

Die Familie der pseudolinearen Regressionen (PLR, obere Reihe in Abb. 3.1) umfasst diejenigen Modellgleichungen, welche durch eine lineare Regression dargestellt werden können. Die Lösung der PLR wird normalerweise analy-

tisch mit der Least Squares (LS) Methode oder LS-Varianten gefunden. Eine andere Familie der Identifikationsmethoden ist die Prediction Error Methode (PEM, mittlere Reihe in Abb. 3.1); diese richtet sich auf die Minimierung des Fehlers zwischen gemessenem und simuliertem Ausgangssignal. Um den Prädiktionsfehler (Prediction Error, PE) zu schätzen, wird ein optimaler Prädiktor angewendet. Im Bayesschen Ansatz wird hingegen der Parametervektor als Zufallsvektor betrachtet und als (zu maximierendes) Gütekriterium die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Modellfehlers bezüglich  $\theta$  oder des Parametervektors  $\theta$  bezüglich den gemessenen Daten gewählt.

Man beachte, dass die Abb. 3.1 nur zur Veranschaulichung der Struktur dieses Kapitels dienen soll bzw. nur eine Zusammenfassung der Methoden enthält und keine allgemeine Vorgehensweise für die Parameteridentifikation darstellt. Zudem sind die Familien der Identifikationsmethoden oft miteinander korreliert und können nicht ganz voneinander getrennt betrachtet werden, zum Beispiel kann eine PLR als Spezialfall der PEM interpretiert werden oder eine allgemeine rekursive Methode in der Bayesschen Perspektive betrachtet werden.

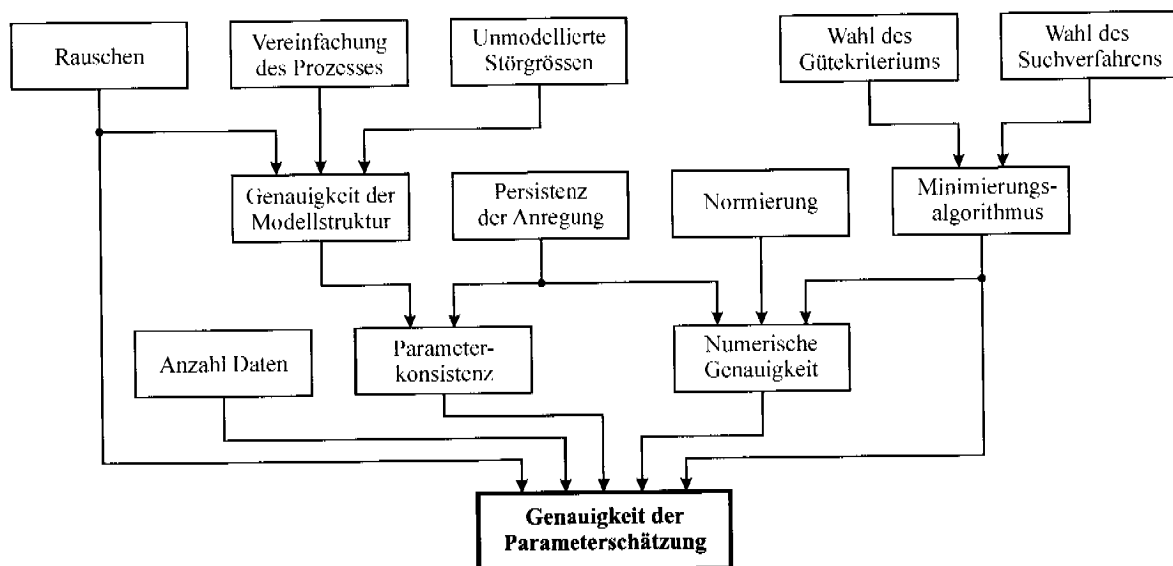


Abb. 3.2: Verketzung der möglichen Faktoren, welche die Genauigkeit der Lösung des Parameteridentifikationsproblems beeinflussen können.

In der Praxis sind die Werte der wahren Parameter unbekannt, weshalb die Güte der geschätzten Parameter mit der geschätzten Parameterunsicherheit und der Genauigkeit der Simulationsergebnisse bewertet werden muss. Wie in Abb. 3.2 gezeigt wird, können viele Faktoren die Ergebnisse der Parameteridentifikation beeinflussen. In der Praxis kann beim Entwurf des Identifikationsalgorithmus die Genauigkeit des Parameterschätzers nur mit der Wahl einer geschickten Modellstruktur bzw. einer korrekten Modellierung des Rauschens und der Wahl des Minimierungsalgorithmus beeinflusst werden. Andere Komponenten wie das Rauschen im Prozess, die Persistenz der Anregung und die Länge der Messung sind normalerweise vom System vorgegeben und können selten gewählt werden.

### 3.1.1 Modellstrukturen

Für die Beschreibung eines Prozesses können verschiedene Strukturen gewählt werden. Diese stellen die Randbedingungen für die Berechnung des optimalen Prädiktors und für die Parameteridentifikation dar. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten linearen zeitdiskreten Modellstrukturen, welche in den weiteren Abschnitten verwendet werden, kurz vorgestellt.

Die erste Variante, um die Modellstrukturen zu beschreiben, ist die Input-Output-Darstellung. Diese ist eine kompakte Form, um das Ausgangssignal als Funktion der alten Werte explizit zu beschreiben. Die allgemeine Gleichung lautet:

$$y(t) = G_{IO}(\theta, q^{-1}) \cdot u(t) + H_{IO}(\theta, q^{-1}) \cdot e(t) \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } E\{e(t)\} &= 0 \\ E\{e(t)e^T(\tau)\} &= \Lambda(\theta) \cdot \delta_{t\tau}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Die Übertragungsmatrix  $G_{IO}(\theta, q^{-1})$  beschreibt die Übertragung vom Eingangssignal  $u(t)$  nach dem Ausgangssignal  $y(t)$ . Hingegen stellt  $H_{IO}(\theta, q^{-1})$  den Einfluss des unbekannten weissen Rauschens  $e(t)$  mit Varianz  $\Lambda$  auf den Prozess dar. Die Übertragungsmatrizen  $G_{IO}(\theta, q^{-1})$  und  $H_{IO}(\theta, q^{-1})$  hängen vom Parametervektor  $\theta$  ab, die wahren (gesuchten) Parameter werden als  $\theta_0$  definiert. Der Symbol  $q^{-1}$  entspricht dem „Shift-Operator“, dabei gilt  $q^{-1} \cdot u(t) = u(t-1)$ . Die Übertragungsfunktionen  $G_{IO}$  und  $H_{IO}$  können

auch mit Hilfe der Polynomialmatrizen dargestellt werden. Der bekannteste Spezialfall ist sicher die ARMAX-Modellstruktur:

$$A_{IO}(\theta, q^{-1}) \cdot y(t) = B_{IO}(\theta, q^{-1}) \cdot u(t) + C_{IO}(\theta, q^{-1}) \cdot e(t) \quad (\text{Gl. 3.3})$$

und (vgl. (Gl. 3.1)):

$$\begin{aligned} G_{IO}(\theta, q^{-1}) &= A_{IO}^{-1}(\theta, q^{-1}) B_{IO}(\theta, q^{-1}) \\ H_{IO}(\theta, q^{-1}) &= A_{IO}^{-1}(\theta, q^{-1}) C_{IO}(\theta, q^{-1}). \end{aligned}$$

Die Polynomialmatrizen lauten:

$$\begin{aligned} A_{IO}(\theta, q^{-1}) &= I + A_{IO,1}(\theta) \cdot q^{-1} + \dots + A_{IO,na}(\theta) \cdot q^{-na} \\ B_{IO}(\theta, q^{-1}) &= B_{IO,1}(\theta) \cdot q^{-1} + \dots + B_{IO,nb}(\theta) \cdot q^{-nb} \\ C_{IO}(\theta, q^{-1}) &= I + C_{IO,1}(\theta) \cdot q^{-1} + \dots + C_{IO,nc}(\theta) \cdot q^{-nc}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Obwohl die ARMAX-Modellstruktur nicht der allgemeinen Input-Output-Darstellung (vgl. [21, 31]) entspricht, kann sie für die Beschreibung sämtlicher linearer zeitdiskreter Prozesse verwendet werden. Andere wichtige Modellstrukturen sind:

Output Error:  $C_{IO}(\theta, q^{-1}) = A_{IO}^{-1}(\theta, q^{-1}) \quad (\text{Gl. 3.5})$

ARX:  $C_{IO}(\theta, q^{-1}) = I. \quad (\text{Gl. 3.6})$

Die Output Error-Struktur (OE) entspricht einem Prozess mit Rauschen nur am Ausgang (Abb. 3.3 in der Mitte). Die Anwendung dieser Struktur in der Parameteridentifikation ist für diejenigen Modelle wertvoll, welche für die Simulationen verwendet werden (wenn die Rückführung des wahren Ausgangssignals für die Berechnung des geschätzten Ausgangssignals nicht möglich ist). Die ARX-Modellstruktur ist eine der einfachsten dynamischen Modellstrukturen und wird oft verwendet, da die Lösung der Parameteridentifikation analytisch (mit Least-Squares) berechnet werden kann. Der grosse Nachteil der ARX-Struktur ist die Einschränkung der Übertragungsfunktion des Rauschens ( $H_{IO}(\theta, q^{-1}) = A_{IO}^{-1}(\theta, q^{-1})$ ). Letztere kann auch grosse Inkonsistenz der Parameterschätzung verursachen.

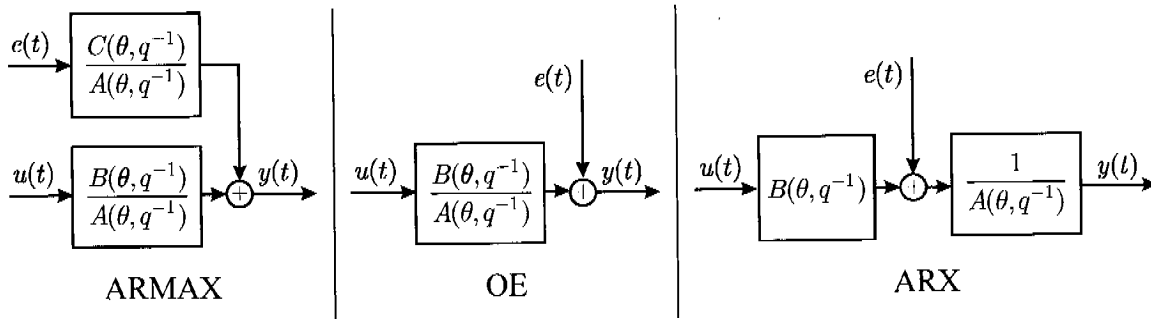


Abb. 3.3: Signalflossbild der Spezialfälle in der Input-Output-Darstellung (SISO).

Eine andere Modellstruktur-Variante ist die Zustandsraumdarstellung. Diese wird normalerweise für die Beschreibung physikalischer Differentialgleichungen verwendet. Ihre Struktur ist die folgende:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= F(\theta) \cdot x(t) + G_u(\theta) \cdot u(t) + G_v(\theta) \cdot v(t) \\ y(t) &= H(\theta) \cdot x(t) + r(t) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

mit:

$$\begin{aligned} E\{v(t)\} &= 0 & E\{v(t)v^T(\tau)\} &= R_v(\theta)\delta_{t\tau} \\ E\{r(t)\} &= 0 & E\{r(t)r^T(\tau)\} &= R_r(\theta)\delta_{t\tau} \\ & & E\{v(t)r^T(\tau)\} &= R_{vr}(\theta)\delta_{t\tau}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

Das Signal  $x(t)$  entspricht dem Zustandsvektor und die Matrizen  $F(\theta)$ ,  $G_u(\theta)$ ,  $G_v(\theta)$  und  $H(\theta)$  entsprechen den Systemmatrizen. Die unbekannten Störgrößen  $r(t)$  (Ausgangsrauschen) und  $v(t)$  (Prozessrauschen) werden als weisses Rauschen modelliert. Das Signalflossbild für den speziellen Fall mit  $G_u(\theta) = G_v(\theta)$  ist in Abb. 3.4 dargestellt. Dieser entspricht einem System mit überlagertem weissem Rauschen am Eingang und Ausgang.

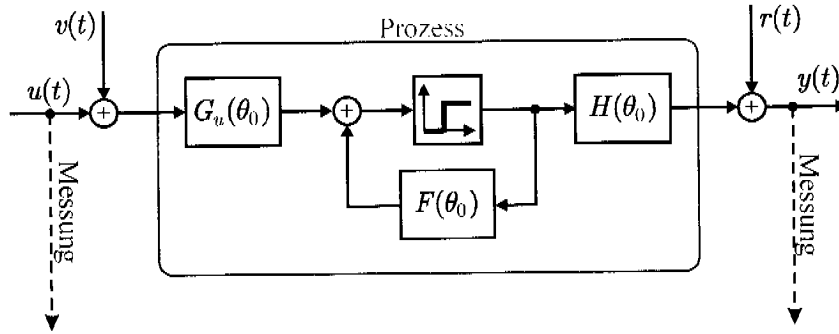


Abb. 3.4: Signalflussbild eines Prozesses mit Rauschen am Eingang und Ausgang (Zustandsraumdarstellung).

Die Strukturen in (Gl. 3.1)-(Gl. 3.2) und (Gl. 3.7)-(Gl. 3.8) (vgl. Abb. 3.3 und Abb. 3.4) entsprechen der Beschreibung des wahren Prozesses und stellen nur die Randbedingungen für die Parameteridentifikation dar. Der wahre Parametervektor entspricht  $\theta_0$ . Für die Berechnung der optimalen Schätzung des Ausgangssignals  $y(t)$  und des Parametervektors  $\theta$  muss zuerst ein optimaler Prädiktor hergeleitet werden.

### 3.1.2 Pseudolineare Regressionen (PLR)

Die Familie der PLR beinhaltet diejenigen Modellstrukturen, welche als lineare Regression (LR) dargestellt werden können. Für den allgemeinen MIMO-Fall (Multiple Input, Multiple Output) kann eine ARX-Modellstruktur mit folgender linearen Regression beschrieben werden:

$$y(t) = \Phi^T(t) \cdot \theta + e(t) \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Mit:

$$\begin{aligned} \theta &= \text{vec} \begin{bmatrix} A_{IO,1}(\theta) & \cdots & A_{IO,na}(\theta) & B_{IO,1}(\theta) & \cdots & B_{IO,nb}(\theta) \end{bmatrix} \\ \Phi^T(t) &= I \otimes \varphi^T(t) \\ \varphi^T(t) &= \begin{bmatrix} -y^T(t-1) & \cdots & -y^T(t-na) & -u^T(t-1) & \cdots & u^T(t-nb) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

$\theta$  ist der gesuchte Parametervektor und  $\varphi^T(t)$  die Regressormatrix.

Die Parameteridentifikation für die LR in (Gl. 3.9) erfolgt durch die Minimierung der Kovarianzmatrix der Residuen:

$$Q_N = \sum_{t=1}^N (y(t) - \Phi^T(t) \cdot \hat{\theta}) \cdot (y(t) - \Phi^T(t) \cdot \hat{\theta})^T = \sum_{t=1}^N \varepsilon(t) \cdot \varepsilon^T(t) \quad (\text{Gl. 3.11})$$

und liefert folgende analytische und globale Lösung:

$$\hat{\theta} = \left[ \sum_{t=1}^N \Phi(t) \cdot \Phi^T(t) \right]^{-1} \cdot \sum_{t=1}^N \Phi(t) \cdot y(t). \quad (\text{Gl. 3.12})$$

Wie in [35] bewiesen ist, minimiert diese Gleichung die ganze Musterkovarianzmatrix  $Q$  in (Gl. 3.11), so dass sämtliche skalaren nichtfallenden Funktionen von  $Q$  gleichzeitig minimiert werden. Die Wahl zum Beispiel des Gütekriteriums  $\det(Q)$  oder  $\text{spur}(S \cdot Q)$  (mit  $S$  eine positiv definite Gewichtungsmatrix) ist deshalb für die Lösung des Identifikationsproblems gleichbedeutend. Diese Aussage gilt jedoch nur, falls die Modellstruktur eine Form wie in (Gl. 3.9)-(Gl. 3.10) besitzt, d.h. die einzelnen Ausgangsgleichungen können ungekoppelt betrachtet werden. Im allgemeinen Fall, wenn  $\Phi$  nicht blockdiagonal ist, kann die Lösung auch von der Wahl des Gütekriteriums abhängen, der Erwartungswert des geschätzten Parameters entspricht jedoch noch dem Erwartungswert von (Gl. 3.12). Die optimale Wahl des Gütekriteriums ist dann  $\text{spur}(\Lambda^{-1} \cdot Q)$ , wo  $\Lambda$  die Fehlerkovarianzmatrix des Ausgangssignals ist. Somit wird die Kovarianzmatrix des geschätzten Parametervektors minimal. Die Lösung in (Gl. 3.12) soll dann entsprechend modifiziert werden (Abschnitt 3.3.1 und [31, 35]).

Die lineare Regression wird pseudolinear genannt, wenn in der Regressormatrix auch ungemessene und unbekannte Signale enthalten sind. Zum Beispiel für die ARMAX-Modellstruktur kommen in der Regressormatrix auch ältere Terme des unbekannten Rauschens  $e(t)$  dazu, da  $C_{IO}(\theta, q^{-1}) \neq C_{IO}(\theta, 0)$ . Als Konsequenz ist die Gleichung (Gl. 3.12) nicht mehr direkt lösbar. Um dieses Problem umzugehen, kann die Extended-Least-Squares Methode (ELS) verwendet werden. Diese Variante schätzt die Werte des Rauschens  $e(t)$  rekursiv, so dass die Regressormatrix bestimmt werden kann [22].



### 3.1.3 Prediction Error Methode (PEM)

Ein allgemeines Konzept, um die Systemidentifikation zu betreiben, ist die Prediction Error Methode, welche die Parameter sucht, bei welchen der Fehler zwischen dem gemessenen und dem vorhergesagten Ausgangssignal minimiert wird. Dazu werden ein Prädiktor für die Vorhersage des Ausgangssignals und ein Identifikationsalgorithmus für die Minimierung der Residuen bezüglich der Parameter benötigt.

#### 3.1.3.1 Optimaler Prädiktor für Input-Output-Strukturen

Die Vorhersage des Ausgangssignals wird normalerweise durch die parameterabhängige Filterung der gemessenen Signale bestimmt. Die Wahl der Struktur des Vorhersagefilters soll optimal der gewählten Modellstruktur angepasst werden. Für die Modellstruktur in der Input-Output-Darstellung (Gl. 3.1) kann der global optimale Prädiktor folgendermassen formuliert werden [31, 35]:

$$\hat{y}(t|t-1, \theta) = L_1(q^{-1}, \theta) \cdot y(t) + L_2(q^{-1}, \theta) \cdot u(t) \quad (\text{Gl. 3.13})$$

mit:

$$\begin{aligned} L_1(q^{-1}, \theta) &= I - H_{IO}^{-1}(q^{-1}, \theta) \\ L_2(q^{-1}, \theta) &= H_{IO}^{-1}(q^{-1}, \theta) \cdot G_{IO}(q^{-1}, \theta). \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.14})$$

Die Berechnung der Prädiktionsfehler (PE) entspricht in diesem Fall der Schätzung des unbekannten weissen Rauschens  $e(t)$ :

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t|t-1) = H_{IO}^{-1}(q^{-1}, \theta) [y(t) - G_{IO}(q^{-1}, \theta) \cdot u(t)] \approx e(t), \quad (\text{Gl. 3.15})$$

d.h. für  $\theta = \theta_0$  gilt  $\varepsilon = e$ , wo  $\theta_0$  dem wahren Parametervektor entspricht.

### 3.1.3.2 Optimaler Prädiktor für Strukturen in der Zustandsraumdarstellung

Um den optimalen Prädiktor einer Modellstruktur in der Zustandsraumdarstellung (Gl. 3.7) zu entwerfen, wird die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers minimiert:

$$\Sigma(t+1|t) = E \left\{ [x(t+1) - \hat{x}(t+1|t)][x(t+1) - \hat{x}(t+1|t)]^T \right\}. \quad (\text{Gl. 3.16})$$

Die globale Lösung dieses Minimierungsproblems entspricht dem bekannten Kalman-Filter. Die Gleichung der optimalen Schätzung des Zustandsvektors mit dem Kalman-Filter lautet [14, 28, 31]:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t+1|t) &= F(\theta)\hat{x}(t|t-1) + G_u(\theta)u(t) + K(t)[y(t) - H(\theta)\hat{x}(t|t-1)] \\ \Sigma(t+1|t) &= F(\theta)\Sigma(t|t-1)F^T(\theta) + G_v(\theta)R_v(\theta)G_v^T(\theta) - K(t)Q(t)K^T(t) \\ K(t) &= [F(\theta)\Sigma(t|t-1)H^T(\theta) + G_v(\theta)R_{vr}(\theta)]Q^{-1}(t) \\ Q(t) &= H(\theta)\Sigma(t|t-1)H^T(\theta) + R_r(\theta), \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.17})$$

wobei  $\Sigma(t+1|t)$  die Vorhersage der Schätzfehler-Kovarianzmatrix (Riccati-Gleichung) entspricht,  $K(t)$  die Kalman-Filter-Verstärkungsmatrix ist und  $Q(t)$  die Kovarianzmatrix des Ausgangssignal-Schätzfehlers ist.

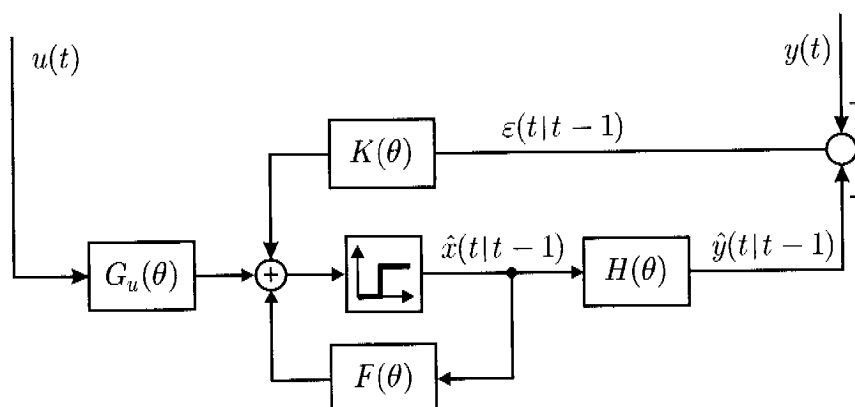


Abb. 3.5: Signalflussbild des Kalman-Filters als Prädiktor.

Für die Implementierung des Algorithmus ist es praktisch, die Kalman-Filter-Gleichungen in zwei Teilschritte zu unterteilen. Der neue Algorithmus, welcher aus einem Update-Schritt und einem Extrapolationsschritt besteht, lautet [31]:

Update-Schritt:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t|t) &= \hat{x}(t|t-1) + L(t)[y(t) - H(\theta)\hat{x}(t|t-1)] \\ \Sigma(t|t) &= [I - L(t)H(\theta)]\Sigma(t|t-1)[I - L(t)H(\theta)]^T + L(t)R_r(t)L^T(t) \\ L(t) &= \Sigma(t|t-1)H^T(\theta)Q^{-1}(t) \\ Q(t) &= H(\theta)\Sigma(t|t-1)H^T(\theta) + R_r(t)\end{aligned}\quad (\text{Gl. 3.18})$$

mit:

$$\begin{aligned}\hat{x}(-1|0) &= \xi_0 \\ \Sigma(-1|0) &= \Pi_0\end{aligned}\quad (\text{Gl. 3.19})$$

Extrapolationsschritt:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t+1|t) &= F(\theta)\hat{x}(t|t) + G_u(\theta)u(t) + G_v(\theta)R_{vr}(t)Q^{-1}(t)[y(t) - H(\theta)\hat{x}(t|t-1)] \\ \Sigma(t+1|t) &= F(\theta)\Sigma_1(t|t)F^T(\theta) + G_v(\theta)R_v(t)G_v^T(\hat{\theta}) - G_v(\theta)R_{vr}(t)Q^{-1}(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\theta) \\ &\quad - F(\theta)L(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\theta) - G_v(\theta)R_{vr}(t)L^T(t)F^T(\theta).\end{aligned}\quad (\text{Gl. 3.20})$$

Die Matrix  $L(t)$  ist die Verstärkungsmatrix im Update-Schritt. Die Beziehung zur Kalman-Filter-Verstärkungsmatrix  $K(t)$  lautet:

$$K(t) = F(\theta)L(t) + G_v(\theta)R_{vr}(t)Q^{-1}(t). \quad (\text{Gl. 3.21})$$

### 3.1.3.3 Wahl des Gütekriteriums

Nach der Auslegung des optimalen Prädiktors muss die zu minimierende Verlustfunktion festgelegt werden. Dazu wird die Musterkovarianzmatrix des Prädiktionsfehlers definiert:

$$Q_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t, \theta) \varepsilon^T(t, \theta). \quad (\text{Gl. 3.22})$$

Da diese im allgemeinen keine skalare Funktion ist (falls der Prozess mehrere Ausgangssignale hat), muss ein geeignetes skalares zu minimierendes Gütekriterium gewählt werden. Eine erste Möglichkeit, welche in den weiteren Abschnitten untersucht wird, lautet:

$$V_N(\theta) = \Lambda_N(\theta)^{-1} \text{spur}(Q_N(\theta)). \quad (\text{Gl. 3.23})$$

Wie in [22, 31, 35] gezeigt wird, entspricht die Matrix  $\Lambda_N(\theta)^{-1}$  der optimalen Gewichtungsmatrix für diese Verlustfunktion, um die asymptotische Effizienz der Parameterschätzung zu erreichen. Somit wird der Erwartungswert der Kovarianzmatrix der Parameterschätzung minimal. Eine andere Möglichkeit für die Wahl des Gütekriteriums lautet:

$$V_N(\theta) = \det(Q_N(\theta)). \quad (\text{Gl. 3.24})$$

Diese Lösung wird auch Maximum-Likelihood-Schätzung benannt, welche eine spezielle Form der Likelihood-Funktion maximiert. Die allgemeine Likelihood-Funktion lautet:

$$\text{Lik}(\theta) = \frac{1}{(2\pi)^{N \cdot ny/2} [\det(\Lambda(\theta))]^{N/2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \varepsilon^T(t, \theta) \Lambda^{-1}(\theta) \varepsilon(t, \theta) \right]. \quad (\text{Gl. 3.25})$$

Die Formel der Likelihood-Funktion ist äquivalent der Funktion  $p(y(1) \dots y(N) | \theta)$ , d.h. sie ist die bedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der unabhängigen Ereignisse  $y(1) \dots y(N)$  mit einem bekannten Parameter  $\theta$ . Der Unterschied zwischen Likelihood und der bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist, dass  $p(y(1) \dots y(N) | \theta)$  als Funktion von  $y(1) \dots y(N)$  mit fixem Parameter  $\theta$  interpretiert wird, wogegen die Likelihood-Funktion eine Funktion von  $\theta$  mit den vorgegebenen Ereignissen  $y(1) \dots y(N)$  ist.  $\text{Lik}(\theta)$  darf somit nicht mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion vertauscht werden. Der optimale Parameter  $\theta_{ML}$ , welcher die Likelihood-Funktion maximiert, entspricht der Schätzung des wahrscheinlichsten Wertes von Parameter  $\theta$ , welcher die Ereignisse produziert haben könnte. Anstatt  $\text{Lik}(\theta)$  zu maximieren wird normalerweise die logarithmierte Likelihood-Funktion minimiert:

$$\ln[\text{Lik}(\theta)] = -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \varepsilon^T(t, \theta) \Lambda^{-1}(\theta) \varepsilon(t, \theta) - \frac{N}{2} \ln[\det(\Lambda(\theta))]. \quad (\text{Gl. 3.26})$$

Falls die Matrix  $\Lambda(\theta)$  nicht vom Parametervektor  $\theta$  abhängt und völlig unbekannt ist ( $\Lambda(\theta) = \Lambda$ ), kann als optimaler Schätzer  $\Lambda_N = Q_N$  gewählt werden [31]. Wie in [31, 35] gezeigt wird, reduziert sich die Maximierung von (Gl. 3.25) auf die Minimierung von (Gl. 3.24) mit (Gl. 3.22). Im allgemeinen Fall, wenn  $\Lambda(\theta)$  vom Parametervektor abhängt (z.B. mit einem Kalman-Filter als Prädiktor), muss (Gl. 3.26) ausgewertet werden.

Bei der PEM-Familie erfolgt das Lösen des Minimierungsproblems (wie z.B. (Gl. 3.23), (Gl. 3.24) oder (Gl. 3.26)) normalerweise mit numerischen Suchalgorithmen. Diese sind meistens Offline- und iterative Methoden; für die rekursiven Varianten werden Modifikationen der Offline-Algorithmen verwendet.

### 3.1.4 Bayesscher Ansatz

Die Charakteristik des Bayesschen Ansatzes ist, dass die unbekannten Parameter als Zufallsvariablen betrachtet werden. Jedem Parameter wird eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zugeteilt, letztere wird bei jeder neuen Messung aktualisiert. Für die Untersuchungen mit dem Bayesschen Ansatz ist also die bedingte a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $p(\theta|y(1)\dots y(N))$  von Interesse. Für die Berechnung wird die bekannte Bayes-Regel angewendet:

$$p(\theta|y(1)\dots y(N)) = \frac{p(y(1)\dots y(N)|\theta) \cdot p(\theta)}{p(y(1)\dots y(N-1))}, \quad (\text{Gl. 3.27})$$

wo  $p(y(1)\dots y(N)|\theta)$  wie in (Gl. 3.25) definiert ist (Gaussverteilung) und  $p(\theta)$  die a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Parametervektors  $\theta$  ist. Je länger die Messung ist, desto kleiner wird der Einfluss der a priori Schätzung  $p(\theta)$  für das Resultat der Parameterschätzung. Bei den rekursiven Suchalgorithmen kann jedoch die Wahl der a priori Schätzung  $p(\theta)$  die Konvergenzeigenschaften des geschätzten Parametersatzes stark beeinflussen.

Eine Methode für die Berechnung des Parametervektors ist die bekannte Maximum a posteriori (MAP) Schätzung, welche den Parametervektor  $\theta$  findet, so dass  $p(\theta|y(1)\dots y(N))$  maximal ist. Eine zweite Methode, die häufig ver-

wendet wird, ist der Extended Kalman-Filter als Parameterschätzer. Mit diesem Verfahren wird der Parametervektor als Zustand modelliert und somit als Zustandsvektor betrachtet. Die Parameteroptimierung erfolgt durch die Minimierung der Zustandskovarianzmatrix, d.h. bei einer Gaussverteilung wird die geschätzte Varianz minimiert.

Eine mögliche Variante des Kalman-Filters als Parameterschätzer ist die Betrachtung der linearen Regression als Zustandsraummodell. Im MIMO-Fall kann somit die lineare Regression:

$$\begin{aligned} y(t) &= \Phi^T(t)\theta + e(t) \\ \text{mit } E\{e(t)\} &= 0, \quad E\{e(t)e^T(t)\} = \Lambda(t) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.28})$$

als Zustandsraummodell dargestellt werden:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= F \cdot x(t) = I \cdot x(t) = \theta \\ y(t) &= H(t) \cdot x(t) + r(t) = \Phi^T(t) \cdot \theta + e(t). \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.29})$$

Für die Parameteridentifikation wird der Kalman-Filter von (Gl. 3.17) verwendet [31]. Es kann gezeigt werden [22], dass die Lösung der rekursiven LS-Methode mit der Verlustfunktion in (Gl. 3.23) entspricht (vgl. Abschnitt 3.4.1).

Eine zweite Variante der Anwendung des Kalman-Filters als Parameterschätzer ist die Erweiterung des Zustandsvektors einer Zustandsraumdarstellung ((Gl. 3.7)-(Gl. 3.8)) mit dem gesuchten Parametervektor. Das Modell wird somit folgendermassen erweitert:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(t+1) \\ \theta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F(\theta) \cdot x(t) + G_u(\theta) \cdot u(t) \\ \theta \end{bmatrix} \\ y(t) &= H(\theta) \cdot x(t). \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.30})$$

Da die Systemmatrizen vom Parametervektor  $\theta$  abhängen, ist die obere Gleichung nichtlinear. Für das Lösen des Problems muss der Extended Kalman-Filter verwendet werden, d.h. das neue System wird bei jedem Zeitschritt linearisiert und mit dem gewöhnlichen KF-Algorithmus gelöst. Der vollständige Algorithmus für das Problem der Parameteridentifikation eines Gebäudes befindet sich im Abschnitt 3.4.3.

## 3.2 Problemformulierung und Eindeutigkeit der Lösung

Neben der Regelung der Gebäudeheizung mit der Wärmepumpe können die Messungen der Temperaturen und Wärmeströme in der Wohnung auch die Schätzung der wichtigen Eigenschaften des Gebäudes ermöglichen. So können zum Beispiel, falls die gemessenen Signale genügend angeregt und die Sensoren richtig platziert sind, die Parameter des Hausmodells in Kapitel 2 identifiziert werden. In diesem Abschnitt wird die Lösbarkeit des Parameteridentifikationsproblems untersucht, d.h. unter welchen Bedingungen eine eindeutige globale oder eine lokale Lösung existiert. Als erster Schritt wird somit für die Untersuchungen der deterministische Fall mit einer perfekten Modellstruktur betrachtet. Eine weitere Problematik, welche in diesem Abschnitt untersucht wird, ist der Einfluss der Störungen wie das Messrauschen oder die Sonnenstrahlung auf die Lösung des Identifikationsproblems. Dafür werden verschiedene Gütekriterien und Modellstrukturen verglichen.

Es wird in diesem Abschnitt gezeigt, dass die Anwendung einer ARX-Modellstruktur sowohl für das Gebäudemodell dritter als auch zweiter Ordnung ungeeignet ist, wegen dem zu starken Einfluss der Störungen (Rauschen, Sonnenstrahlungen, Modellierungsfehler). Es wird weiter gezeigt, dass die Parameterlösung mit dem Prädiktor für eine OE-Struktur oder mit einem Kalman-Filter als Prädiktor robust bezüglich Störungen ist. Die Parameterlösung mit einem Kalman-Filter als Prädiktor kann jedoch schlecht bzw. unphysikalisch werden, falls die unmodellierten Störungen (Modellierungsfehler oder Sonnenstrahlung) zu stark sind.

Zuerst wird das Hausmodell dritter Ordnung in (Gl. 2.10) betrachtet. Damit das Problem im deterministischen Fall (ohne Rauschen) analytisch gelöst werden kann, wird ein Gleichungssystem der Ordnung  $n\theta$  (wo  $n\theta$  der Anzahl der zu identifizierenden Parameter entspricht) gebraucht. Unter der Annahme, dass nur die Aussenlufttemperatur, die Wärmepumpenleistung und die Heizwasserrücklauf Temperatur als Messdaten zur Verfügung stehen, kann nach einer Diskretisierung mit dem Euler-Verfahren und einer geeigneten Zusammenfassung der Signale bzw. Parameter [6] das System in (Gl. 2.10) als lineare Regression formuliert werden:

*Linear Regression des Hausmodells dritter Ordnung (MISO)*

$$y(t) = \varphi^T(t) \cdot \theta$$

$$= - \begin{bmatrix} t_S \cdot (T_{RL}(t-1) - 2 \cdot T_{RL}(t-2) + T_{RL}(t-3)) \\ t_S \cdot (\dot{Q}_{WP}(t-1) - 2 \cdot \dot{Q}_{WP}(t-2) + \dot{Q}_{WP}(t-3)) \\ t_S^2 \cdot (T_{RL}(t-2) - T_{RL}(t-3)) \\ t_S^2 \cdot (\dot{Q}_{WP}(t-2) + \dot{Q}_{WP}(t-3)) \\ t_S^3 \cdot (T_{RL}(t-3) - \tilde{T}_A(t-3)) \\ t_S^3 \cdot \dot{Q}_{WP}(t-3) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.31})$$

$$\text{mit: } y(t) = T_{RL}(t) - 3 \cdot T_{RL}(t-1) + 3 \cdot T_{RL}(t-2) - T_{RL}(t-3). \quad (\text{Gl. 3.32})$$

und mit:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\kappa_B + \kappa_G}{\tau_G \kappa_G} + \frac{\kappa_{WB} + \kappa_B}{m_B c_B} + \frac{\kappa_{WB}}{\rho_W c_W V_H} \\ \theta_2 &= -\frac{1}{\rho_W c_W V_H} \\ \theta_3 &= \frac{\kappa_{WB} \kappa_B + \kappa_{WB} \kappa_G + \kappa_B \kappa_G}{m_B c_B \tau_G \kappa_G} + \frac{\kappa_{WB} \kappa_B + \kappa_{WB} \kappa_G}{\rho_W c_W V_H \tau_G \kappa_G} + \frac{\kappa_{WB} \kappa_B}{\rho_W c_W V_H m_B c_B} \\ \theta_4 &= -\frac{\kappa_B + \kappa_G}{\rho_W c_W V_H \tau_G \kappa_G} - \frac{\kappa_{WB} + \kappa_B}{\rho_W c_W V_H m_B c_B} \\ \theta_5 &= \frac{\kappa_{WB} \kappa_B}{m_B c_B \rho_W c_W V_H \tau_G} \\ \theta_6 &= \frac{\kappa_{WB} \kappa_B + \kappa_{WB} \kappa_G + \kappa_B \kappa_G}{m_B c_B \rho_W c_W V_H \tau_G \kappa_G} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.33})$$

Die stationäre Temperaturdifferenz  $\Delta T_{stat}$  wird hier als bekannt angenommen und wird direkt mit der gemessenen Aussentemperatur addiert (vgl. (Gl. 2.8)). Die Parameter  $\theta_1 \dots \theta_6$  sind bekannte Funktionen der 6 zu identifizierenden physikalischen Parameter. Mit acht Messungen kann ein lineares Gleichungssystem 6<sup>ter</sup> Ordnung gebildet werden:

$$\begin{cases} \varphi^T(3) \cdot \theta &= y(3) \\ \vdots &= \vdots \\ \varphi^T(8) \cdot \theta &= y(8) \end{cases} \Leftrightarrow \varphi^T \theta = Y. \quad (\text{Gl. 3.34})$$

Da  $\varphi^T$  mit einer persistenten Anregung vollen Rang besitzt und somit invertierbar ist (lösen mit Maple), besitzt das deterministische System eine ein-



deutige globale Lösung [29]. Ähnlich kann geprüft werden, dass auch das System zweiter Ordnung eine eindeutige globale Lösung besitzt.

Weiter wird der Einfluss der möglichen Störgrößen wie Rauschen, Sonnenstrahlung und Modellierungsfehler auf die Lösung der Parameteridentifikation untersucht. Da dieses System nicht deterministisch ist, hängt nun die Lösung auch von der gewählten Modellstruktur des Rauschens und vom gewählten Gütekriterium ab. Für den Vergleich werden also verschiedene Prädiktoren untersucht, dabei wird (Gl. 3.24) mit (Gl. 3.22) als Gütekriterium gewählt. Die Daten werden von einem Hausmodell dritter Ordnung mit den Parametern aus Tabelle 2.2 (träge Fussbodenheizung) generiert.

Um das Gebäudemodell mit der Familie der pseudolinearen Regressionen als lineare Regression wie in (Gl. 3.9)-(Gl. 3.10) zu formulieren, müssen zuerst das Differentialgleichungssystem des Gebäudes umgeformt und die Signale geeignet gruppiert werden.

Für das Hausmodell dritter Ordnung (Gl. 2.10) als MISO (wenn nur die Heizwasserrücklauftemperatur zusätzlich zu den Eingangssignalen gemessen wird) entspricht (Gl. 3.31) und (Gl. 3.32) mit (Gl. 3.33) der gesuchten linearen Regression. Man beachte, dass mit dieser Umformung das Ausgangssignal für die Minimierung nicht mehr der Heizwasserrücklauftemperatur entspricht, sondern deren dritten Ableitung. Als Konsequenz wird der Einfluss des Rauschens die Konsistenz der Parameter deutlich verschlechtern. Der MIMO-Fall (wenn die Raumtemperatur zur Verfügung steht) kann wegen der Nichtlinearitäten nicht in die Form einer MIMO linearen Regression wie (Gl. 3.9) gebracht werden, sondern muss in zwei Schritten bestimmt werden. Die LR für die Differentialgleichung der Rücklauftemperatur lautet:

*Lineare Regression des Hausmodells dritter Ordnung  
(MIMO, Heizwasser- und Bodenspeicher)*

$$T_{RL}(t) - 2 \cdot T_{RL}(t-1) + T_{RL}(t-2) = \begin{bmatrix} (T_{RL}(t-1) - T_{RL}(t-2)) \cdot t_S \\ (T_R(t-2) - T_{RL}(t-2)) \cdot t_S^2 \\ \dot{Q}_{WP}(t-2) \cdot t_S^2 \\ ((\dot{Q}_{WP}(t-1) - \dot{Q}_{WP}(t-2)) \cdot t_S) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.35})$$

mit:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= -\frac{\kappa_{WB}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} - \frac{\kappa_{WB}}{m_B c_B} - \frac{\kappa_B}{m_B c_B} & \theta_2 &= \frac{\kappa_{WB} \cdot \kappa_B}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H \cdot m_B c_B} \\ \theta_3 &= \frac{\kappa_{WB} + \kappa_B}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H \cdot m_B c_B} & \theta_4 &= \frac{1}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H}.\end{aligned}\quad (\text{Gl. 3.36})$$

Angenommen, dass die Parameter des Bodens und des Heizwassers bekannt sind, kann die Differentialgleichung der Raumlufthtemperatur auch als lineare Regression dargestellt werden:

*Lineare Regression des Hausmodells dritter Ordnung  
(MIMO, Raumspeicher)*

$$\begin{aligned}T_R(t) - 2 \cdot T_R(t-1) + T_R(t-2) + \frac{\kappa_{WB} + \kappa_B}{m_B c_B} \cdot (T_R(t-1) - T_R(t-2)) = \\ = \begin{bmatrix} \frac{\kappa_{WB}}{m_B c_B} \cdot (T_{RL}(t-2) - T_R(t-2)) \cdot t_S^2 - (T_R(t-1) - T_R(t-2)) \cdot t_S \\ \frac{\kappa_{WB} + \kappa_B}{m_B c_B} \cdot (\tilde{T}_A(t-2) - T_R(t-2)) \cdot t_S^2 + (\tilde{T}_A(t-1) - \tilde{T}_A(t-2)) \cdot t_S \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{Gl. 3.37})$$

mit:

$$\theta_5 = \frac{\kappa_B}{\tau_G \cdot \kappa_G} \quad \theta_6 = \frac{1}{\tau_G}.\quad (\text{Gl. 3.38})$$

Der Einfluss des Messrauschens auf die ARX-Modellstruktur des Hausmodells dritter Ordnung ist in Abb. 3.6 dargestellt. Da die globale Lösung des Minimierungsproblems unter anderem auch von der Anzahl Daten und der Persistenz der Anregung abhängt (vgl. Abb. 3.2), sind in Abb. 3.6 die Parameterstreuungen einer Montecarlo-Simulation (0, 25, 50, 75 und 100 Perzentil) dargestellt. Die Abszissen entsprechen dem Anteil weissen Rauschens, welcher den Eingängen und Ausgängen des wahren Prozesses (Gl. 2.10) überlagert ist. Die globale Lösung des LS-Problems in (Gl. 3.11) für die sechs Parameter wird stark vom Rauschen beeinflusst (vgl. Tabelle 2.2). Im MISO-Fall sind die Parameterwerte, welche das LS-Problem minimieren, schon ab einer Rauschenvarianz von  $10^{-6}$  inakzeptabel, im MIMO-Fall sind die Resultate leicht besser, jedoch noch immer zu stark vom Rauschen abhängig.

Die LS-Methode für das Hausmodell dritter Ordnung ist somit ungeeignet und wird in den nächsten Abschnitten nicht mehr untersucht.

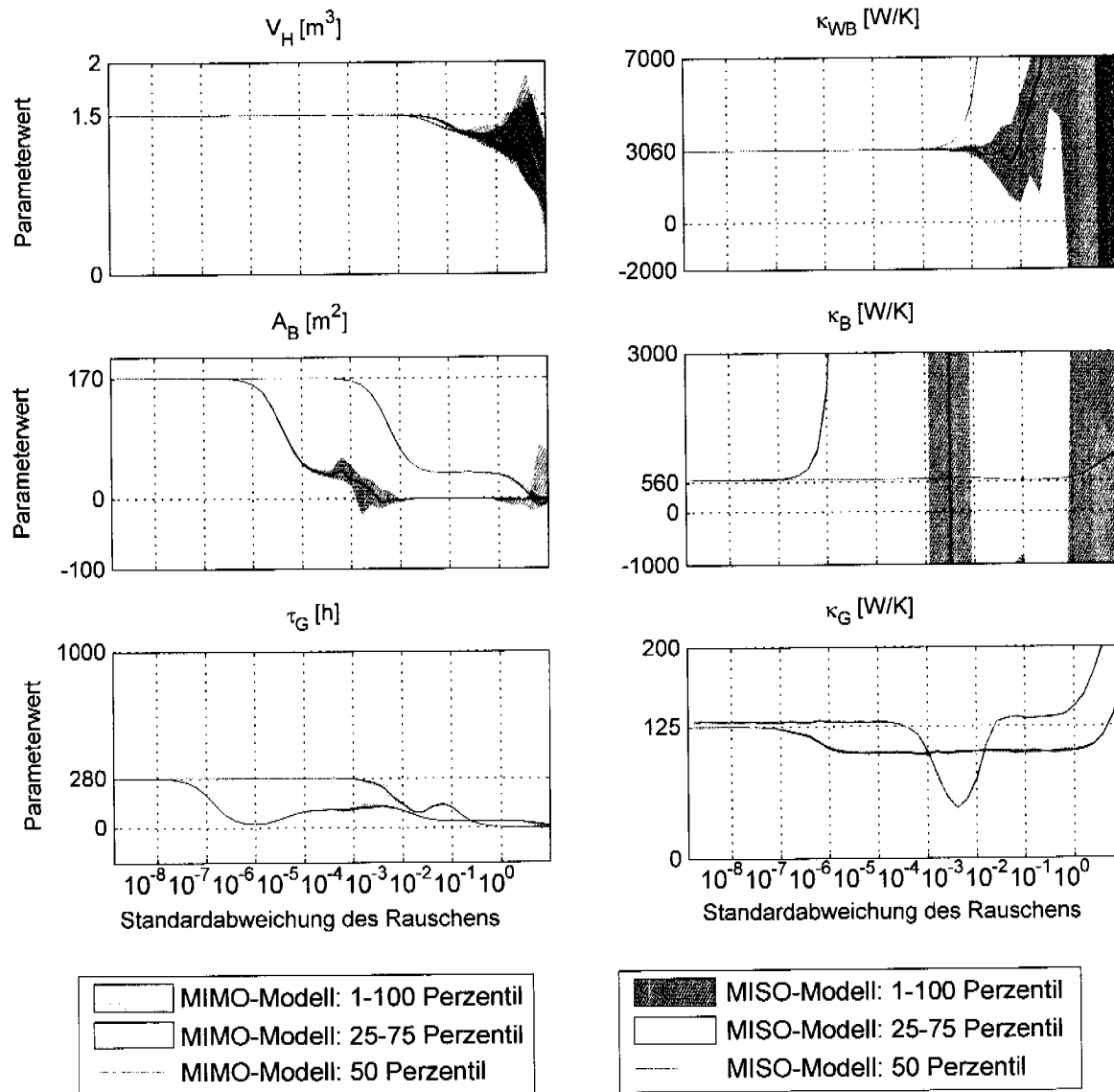


Abb. 3.6: Einfluss des Messrauschens auf die Lösung der Parameteridentifikation des Hausmodells dritter Ordnung als ARX Modellstruktur (LS).

MISO-Fall: (Gl. 3.31)-(Gl. 3.32). MIMO-Fall: (Gl. 3.35)-(Gl. 3.38)

Weiter wird das Hausmodell zweiter Ordnung als ARX-Modellstruktur untersucht. Als weiteres Hindernis für die Identifikation der Parameter kommt nun ein Modellierungsfehler dazu, da die Daten von einem Hausmodell dritter Ordnung mit träger Fussbodenheizung generiert werden (vgl. Tabelle 2.2). Ähnlich dem Gebäudemodell dritter Ordnung soll für die Problemformulierung mit einer LR im MISO-Fall das Zustandsraummodell in (Gl. 2.17) und (Gl. 2.18) folgendermassen umgeformt werden:

*Lineare Regression des Hausmodells zweiter Ordnung (MISO)*

$$T_{RL}(t) - 2 \cdot T_{RL}(t-1) + T_{RL}(t-2) = \begin{bmatrix} (T_{RL}(t-1) - T_{RL}(t-2)) \cdot t_S \\ (\dot{Q}_{WP}(t-1) - \dot{Q}_{WP}(t-2)) \cdot t_S \\ (T_{RL}(t-2) - \tilde{T}_A(t-2)) \cdot t_S^2 \\ \dot{Q}_{WP}(t-2) \cdot t_S^2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.39})$$

mit:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= -\frac{\kappa_{WR}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} - \frac{\kappa_G + \kappa_{WR}}{\tau_G \cdot \kappa_G} & \theta_2 &= \frac{1}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} \\ \theta_3 &= -\frac{\kappa_{WR}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H \cdot \tau_G} & \theta_4 &= \frac{\kappa_G + \kappa_{WR}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H \cdot \tau_G \cdot \kappa_G}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.40})$$

Für den MIMO-Fall lautet hingegen die lineare Regression:

*Lineare Regression des Hausmodells zweiter Ordnung (MIMO)*

$$\begin{bmatrix} T_{RL}(t) - T_{RL}(t-1) \\ T_R(t) - T_R(t-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_R(t-1) - T_{RL}(t-1)) \cdot t_S & 0 \\ \dot{Q}_{WP}(t-1) \cdot t_S & 0 \\ 0 & (T_{RL}(t-1) - T_R(t-1)) \cdot t_S \\ 0 & (\tilde{T}_A(t-1) - T_R(t-1)) \cdot t_S \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.41})$$

mit:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\kappa_{WR}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} & \theta_2 &= \frac{1}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} \\ \theta_3 &= \frac{\kappa_{WR}}{\kappa_G \cdot \tau_G} & \theta_4 &= \frac{1}{\tau_G}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.42})$$

Die gewählten Störgrößen entsprechen für die weiteren Untersuchungen einem weissen Rauschen mit Standardabweichung zwischen  $10^{-9}$  und  $10^0$  plus die Sonnenstrahlung, welche eine Tagesschwankung der Raumtemperatur zwischen 0 und 4°C verursacht.

In Abb. 3.7 ist die Abhängigkeit der globalen Lösung der Parameteridentifikation mit LS angewendet auf das Hausmodell zweiter Ordnung von den oben definierten Störgrößen dargestellt. Bei 60% der maximalen Störgrößen drif-

tet die globale Lösung der Parameter auf schlechte bzw. unphysikalische Werte und eine genauere Auswertung zeigt, dass die Parameter nur wegen dem Modellierungsfehler (ohne Rauschen) inkonsistent sind. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass mit einer schnelleren Dynamik der Fussbodenheizung die LS-Methode bessere Resultate erzielen kann.

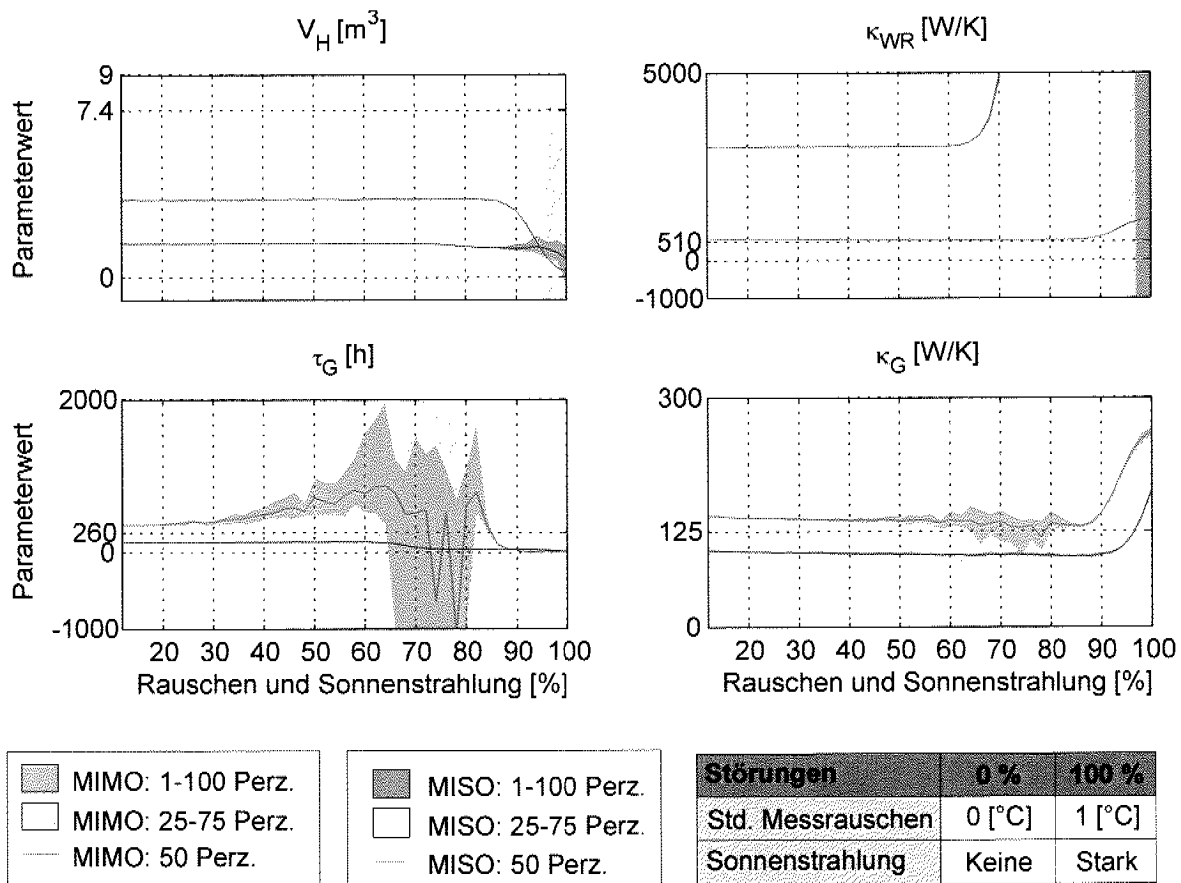


Abb. 3.7: Einfluss des Rauschens und der Sonnenstrahlung auf der Lösung der Parameteridentifikation eines Hausmodells zweiter Ordnung als ARX-Modellstruktur (LS).

Parameterwerte vgl. Tabelle 2.2.

Da das Hausmodell unter anderem für die Vorhersage der thermischen Eigenschaften des Gebäudes mit MPC gebraucht wird, ist es vernünftig, die Simulation des Modells zu optimieren, so dass die gemessenen Ausgangssignale für den Prädiktor unbekannt bleiben (d.h. sie sollen nicht für die Filterung verwendet werden). Diese Aussage kann als Minimierungsproblem formuliert werden, indem für die Berechnung des Gütekriteriums die Output-Error-Modellstruktur gewählt wird. Wenn dieses Problem als PEM mit Zustandsraummodell betrachtet wird, muss die Kalman-Verstärkungsmatrix des Prädiktors in (Gl. 3.17) gleich null gesetzt werden.

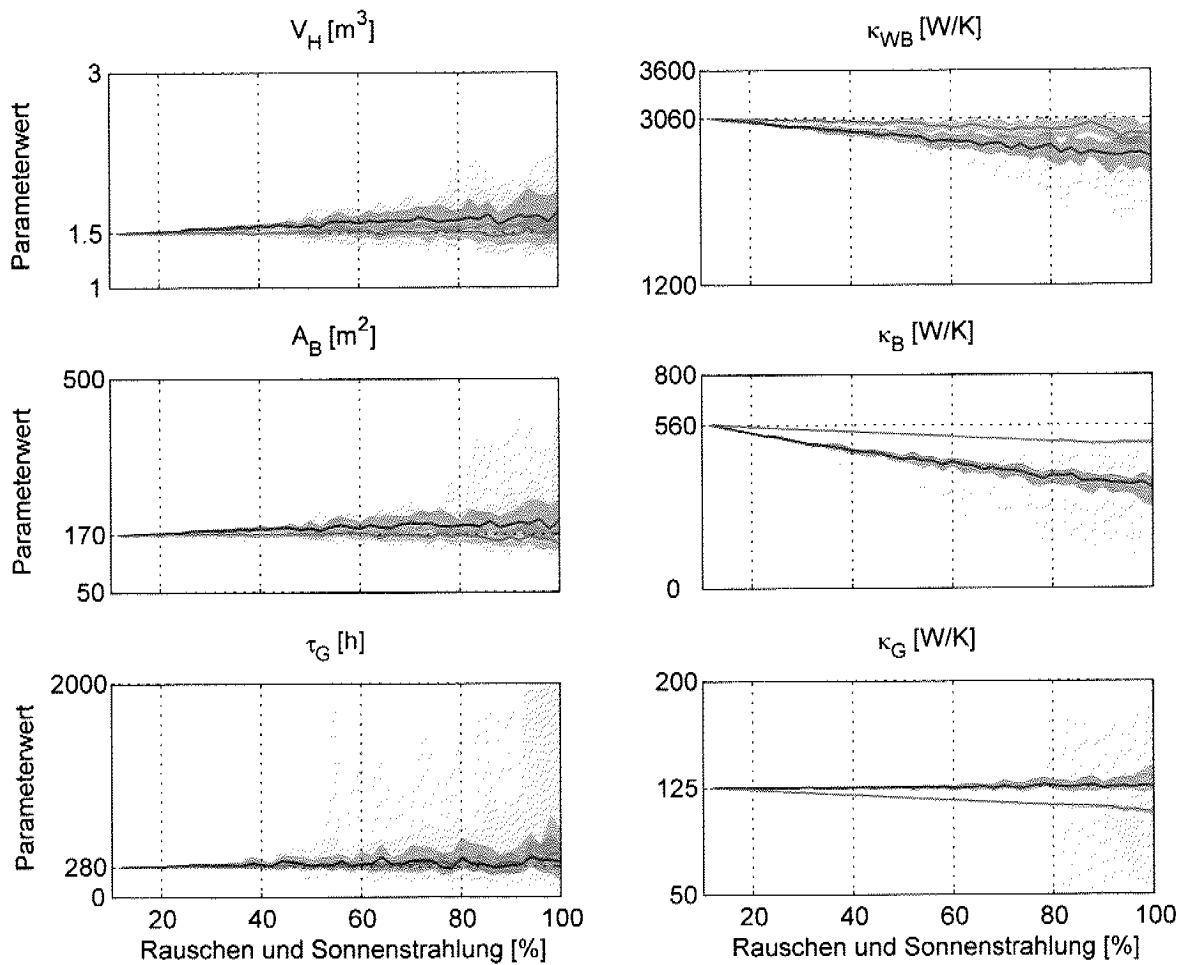


Abb. 3.8: Einfluss des Messrauschens und der Sonnenstrahlung auf der Lösung der Parameteridentifikation eines Hausmodells dritter Ordnung als OE Modellstruktur mit Maximum-Likelihood.

In Abb. 3.8 werden die Resultate des Minimierungsproblems in Abhängigkeit der Störgrößen (Rauschen und Sonnenstrahlung) mit einer Output-Error-Modellstruktur gezeigt. Als Gütekriterium wird (Gl. 3.24) mit (Gl. 3.22) gewählt. Die Resultate in Abb. 3.8 zeigen, dass mit dem Hausmodell dritter Ordnung (keine Modellierungsfehler) die Parameter auch mit starken Störungen im Mittel konsistent bleiben (vgl. Tabelle 2.2). Im MIMO-Fall kann sogar die Sonnenstrahlung berücksichtigt werden, d.h. der Parameterwert  $\kappa_G$  (Gebäudekennlinie) wird mit wachsender Sonnenstrahlung tiefer. Bei starker Sonnenstrahlung kann jedoch das Modell den Schwankungen der Raumlufttemperatur nicht mehr folgen und die optimale Lösung der Simulation entspricht einer glatten mittleren Raumtemperatur. Diese entspricht einer Verschiebung des Parameters  $\tau_G$  nach unendlich und als Konsequenz kann auch

$\kappa_G$  nicht mehr korrekt geschätzt werden. Dieses Problem kann behoben werden, indem eine obere Grenze für den Parameter  $\tau_G$  im Parameteridentifikations-Algorithmus eingeführt wird. Zudem sollten die Raumtemperaturfühler in einem Raum positioniert werden, wo die lokalen Effekte der Sonnenstrahlung einen kleinen Einfluss haben.

Mit dem Modell zweiter Ordnung als OE-Struktur ist der Einfluss der Störungen auf die Parameterkonsistenz ebenfalls klein (Abb. 3.9). Ferner ist im MIMO-Fall die Streuung der optimalen Parameter kleiner als im MISO-Fall, zudem können die Wärmegevinne der Sonnenstrahlung erkannt werden (tiefere Kennlinie  $\kappa_G$  bei starker Sonnenstrahlung).

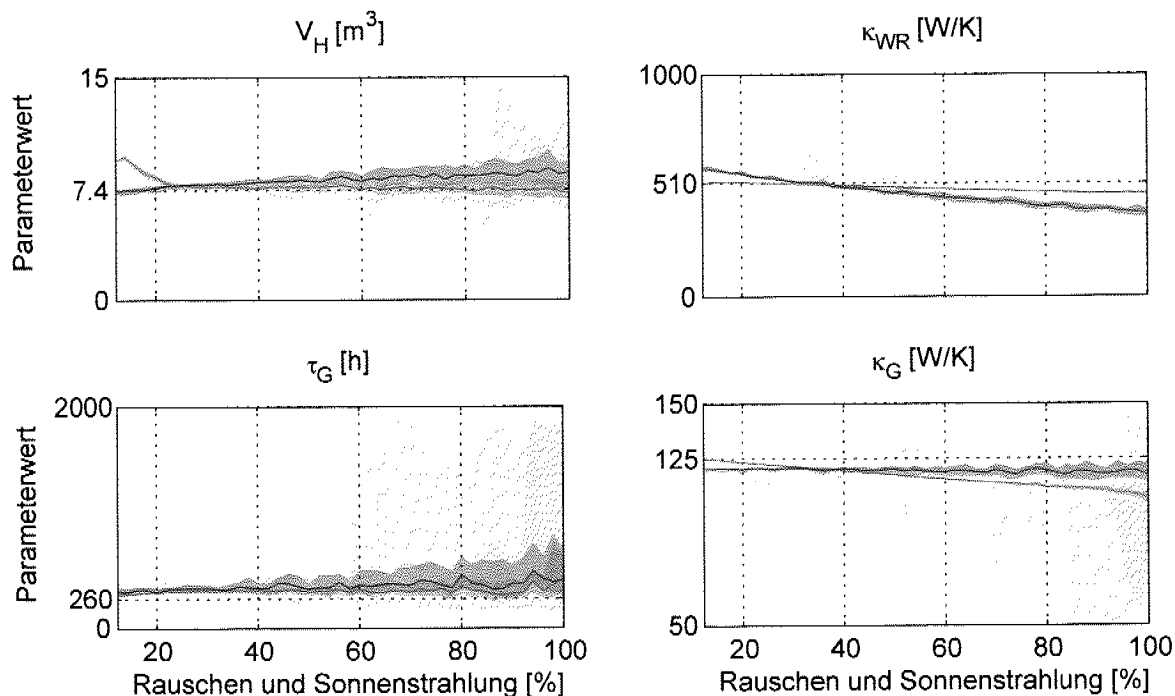


Abb. 3.9: Einfluss des Rauschens und der Sonnenstrahlung auf die Lösung der Parameteridentifikation eines Hausmodells zweiter Ordnung als OE-Modellstruktur mit Maximum-Likelihood.

Weiter wird der Einfluss der Störgrößen auf die Lösung der Parameteridentifikation untersucht, wenn ein Kalman-Filter als Prädiktor gewählt wird. Die Residuen werden in diesem Fall mit (Gl. 3.17) bestimmt (vgl. Abb. 3.5), dazu wird aber die Kenntnis der Kovarianzmatrizen der Störgrößen vorausgesetzt. Das Kalman-Filter gewährleistet die Minimierung der Fehlerkovarianzmatrix, falls das Modell (Parameter und Struktur) den wahren Prozess perfekt reproduziert. Man beachte jedoch, dass diejenigen Parameter, welche das Gütekri-

terium mit dem Kalman-Filter als Prädiktor minimieren, nicht unbedingt den korrekten Parametern des Prozesses entsprechen.

Für das Hausmodell zweiter Ordnung sind die Parameterwerte der minimalen Lösung des Gütekriteriums mit dem Kalman-Filter als Prädiktor (Montecarlo-Simulation) in Abb. 3.10 dargestellt. Im MISO-Fall bleibt zwar die Lösung im Mittel konsistent, die Streuung der Parameter ist jedoch ziemlich stark. Mögliche Gründe dafür können die unmodellierte Fussbodendynamik und die Sonnenstrahlung sein. Im MIMO-Fall sind die Resultate deutlich besser; die Streuung der Parameter bleibt auch im Vergleich zur OE-Modellstruktur kleiner.

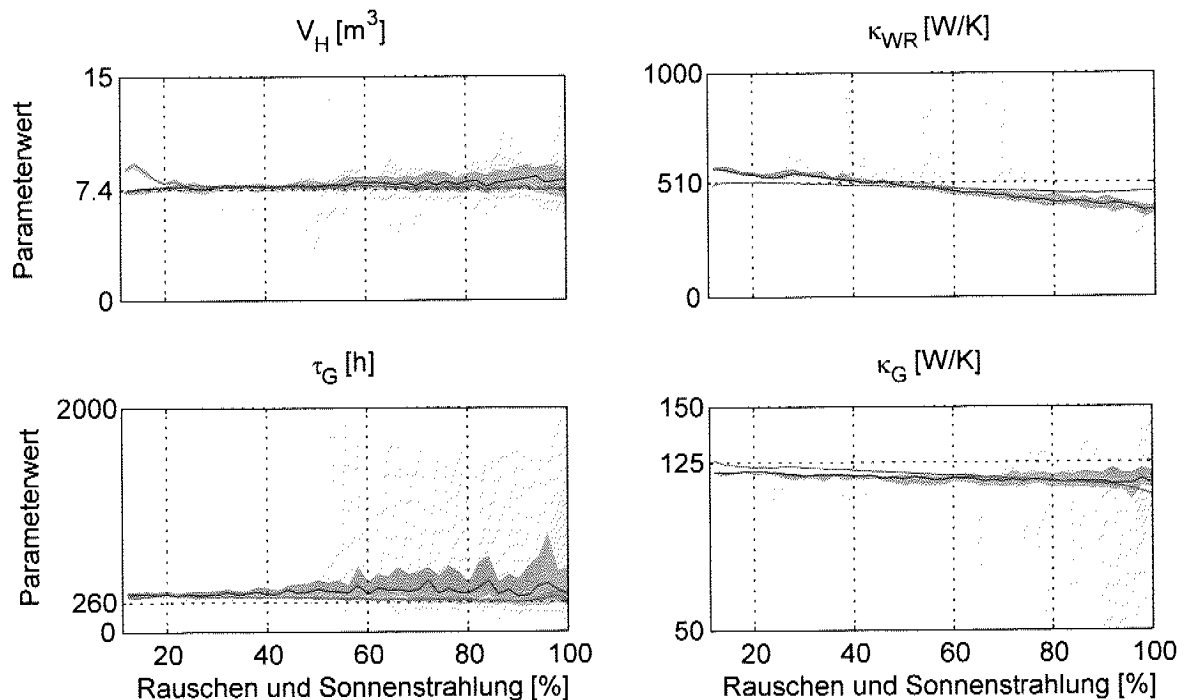


Abb. 3.10: Einfluss des Rauschens und der Sonnenstrahlung auf der Lösung der Parameteridentifikation eines Hausmodells zweiter Ordnung mit Kalman-Filter als Prädiktor und Maximum-Likelihood als Gütekriterium.

Die Parameterlösung mit dem Hausmodell dritter Ordnung und dem Kalman-Filter als Prädiktor ist sowohl im MISO- als auch im MIMO-Fall wegen unmodellierten Störgrößen schlecht (negative Zeitkonstanten bei stärkerer Sonnenstrahlung). Um die Lösung des Kalman-Filters zu verbessern, können auch die Parameter als Zustand modelliert werden, so dass letztere vom Kalman-Filter auch als „unsicher“ interpretiert werden. Diese Art, das Kalman-Filter zu interpretieren, entspricht einem Bayesschen Ansatz. Die Lösung



wird typischerweise rekursiv berechnet und hängt unter anderem von den gewählten Anfangsbedingungen ab. Diese Methode wird in Abschnitt 3.4 beschrieben.

### 3.3 Offline-Methoden

Wenn eine ganze Messung eines unbekannten Prozesses zur Verfügung steht und keine Echtzeit-Systemidentifikation notwendig ist, sind die Offline-Methoden geeignet, um die Parameter zu schätzen. Weiter sind diese Methoden für die Familie der PLR und PEM die Basis für die Entwicklung der rekursiven Algorithmen, deshalb werden die bedeutendsten Suchalgorithmen für die Offline-Parameteridentifikation in diesem Abschnitt zusammengefasst.

Für spezielle Strukturen kann die Lösung des Minimierungsproblems direkt analytisch gefunden werden. Ein Beispiel dafür ist die Least-Squares-Methode, welche in Abschnitt 3.3.1 untersucht wird. Für den allgemeinen Fall sind iterative Suchalgorithmen nötig, d.h. ausgehend von einer Anfangsschätzung des Parametervektors wird das Minimum mit der Hilfe der Informationen über die Gradienten der Funktion gesucht. Diese Varianten werden in Abschnitt 3.3.2 erläutert.

#### 3.3.1 Least-Squares (LS) Methode

Die Least-Squares-Methode wurde schon in den Abschnitten 3.1.2 und 3.2 ausführlich erläutert. Dieser Ansatz gehört jedoch zu der Gruppe der Offline-Methoden und wird deshalb für Korrektheit in diesem Abschnitt nochmals durchgesehen.

Im Ausblick der Herleitung des rekursiven LS-Algorithmus in Abschnitt 3.4.1 wird das optimale Gütekriterium für die allgemeine Form in (Gl. 3.9) ohne die Begrenzung von  $\Phi$  von in (Gl. 3.10) gewählt (vgl. Abschnitt 3.1.2, [21, 31]):

$$V_N(\theta) = \sum_{t=1}^N \varepsilon^T(t, \theta) \cdot \Lambda^{-1} \cdot \varepsilon(t, \theta), \quad (\text{Gl. 3.43})$$

wobei  $\Lambda$  die Kovarianzmatrix des Ausgangsfehlers ist. Als Beschränkung wird angenommen, dass  $\Lambda$  bekannt ist. Die Lösung des LS-Problems entspricht einer Modifikation der (Gl. 3.12) und zwar:

$$\hat{\theta} = \left[ \sum_{t=1}^N \Phi(t) \cdot \Lambda^{-1} \cdot \Phi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \Phi(t) \cdot \Lambda^{-1} \cdot y(t). \quad (\text{Gl. 3.44})$$

Im Abschnitt 3.2 wurde gezeigt, dass das Modell dritter Ordnung für das Lösen des Problems mit der Methode der kleinsten Quadrate nicht geeignet ist. Für die Untersuchungen wird deshalb nur das Hausmodell zweiter Ordnung betrachtet. Die linearen Regressionen für das Hausmodell zweiter Ordnung sind in (Gl. 3.39)-(Gl. 3.40) (MISO-Fall) und (Gl. 3.41)-(Gl. 3.42) (MIMO-Fall) dargestellt. Für das Lösen des Problems wird die Kovarianzmatrix des Ausgangsfehlers nicht gebraucht, da die linearen Regressionen für die Hausmodelle in die Form von (Gl. 3.9)-(Gl. 3.10) gebracht werden können und deshalb die Lösung in (Gl. 3.44) äquivalent mit (Gl. 3.12) ist.

### 3.3.2 Familie der Newtonschen Verfahren / Gauss-Newton-Methode

Wenn die analytische Lösung eines Minimierungsproblems nicht möglich oder zu aufwendig ist, können numerische Suchverfahren angewendet werden. Hier wird angenommen, dass die Position des globalen Minimums ungefähr bekannt ist, so dass der Suchalgorithmus zu keiner lokalen Lösung konvergiert und nicht divergiert. Der Offline-Algorithmus besteht normalerweise aus zwei iterativen Schritten. Zuerst wird die Schätzung der Richtung des Minimums bestimmt und danach wird die Schrittlänge geschätzt, um entlang des Richtungsvektors die Minimalstelle zu finden. Das Schema für das Vorgehen bei der iterativen Suche des Minimums einer Funktion wird in Abb. 3.11 gezeigt. Das Minimierungsproblem kann folgendermassen formuliert werden:

$$V(\theta_{Opt}) = \min_{\theta} \{V(\theta)\} = \min_{\theta} \left\{ \sum_{t=1}^N \ell(\varepsilon(t, \theta), \theta) \right\}. \quad (\text{Gl. 3.45})$$

Für den Fall der Parameteridentifikation entspricht die zu minimierende Funktion der Summe einer Funktion der Residuen über die Zeit. Beispiele

sind (Gl. 3.23) oder (Gl. 3.24). wobei  $\theta_{Opt}$  der gesuchte Parametervektor ist, welcher die Verlustfunktion  $V$  minimiert.

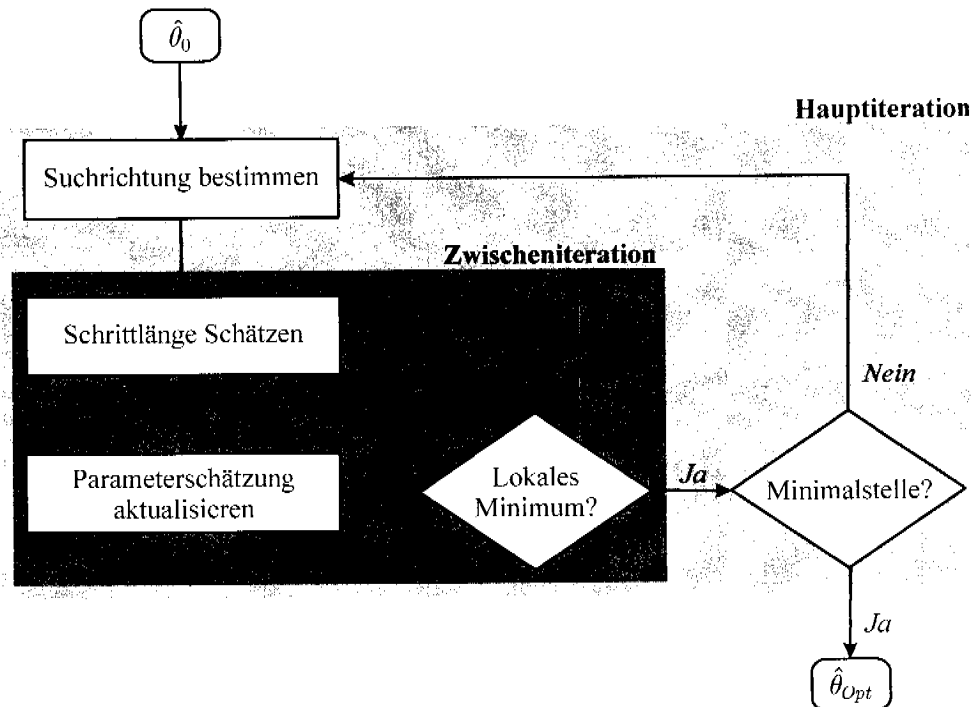


Abb. 3.11: Vorgehen für die iterative Suche einer Minimalstelle auf mittlere Skala.

Der einfachste Weg, um die Suchrichtung zu schätzen, ist die steilste Richtung zu wählen, d.h. in der Richtung des Gradienten der Verlustfunktion  $-\nabla_{\theta}V(\theta)$  zu suchen. Dieses Verfahren ist als Gradientenmethode bekannt, ist aber ungeeignet, um die Minimalstellen zu suchen, da oft viele Iterationsschritte nötig sind. Eine wesentlich bessere Variante ist die Familie der Newtonschen Methoden [23], welche die zu minimierende Funktion mit einem Polynom zweiter Ordnung annähern:

$$\min_{\theta} \{ \theta^T \cdot Hess \cdot \theta + c^T \cdot \theta + b \}. \quad (\text{Gl. 3.46})$$

Hiermit wird die Hesssche Matrix  $Hess$  definiert, welche der zweiten Ableitung der (Gl. 3.46) entspricht. Angewendet auf (Gl. 3.45) lautet somit die Suchrichtung, welche gleichzeitig das Problem in (Gl. 3.46) minimiert:

$$d = -V''(\theta)^{-1} \cdot V'(\theta) = -Hess(\theta)^{-1} \cdot V'(\theta). \quad (\text{Gl. 3.47})$$

Da die Auswertung der Hessschen Matrix  $Hess(\theta)$  für das Problem in (Gl. 3.45) mühsam sein kann, werden oft numerische Approximationsmethoden bevorzugt. Diese Vorgehensweisen werden Quasi-Newton-Methoden genannt. Die Abb. 3.12 zeigt den Vergleich zwischen Gradienten- und Newton-Verfahren. Wegen des langen engen Tals der Funktion konvergiert das Gradienten-Verfahren sehr langsam zur Minimalstelle. In der Abbildung sind die ersten 10000 Iterationen dargestellt. Das Newton-Verfahren konvergiert hingegen sehr schnell (nach 23 Iterationen).

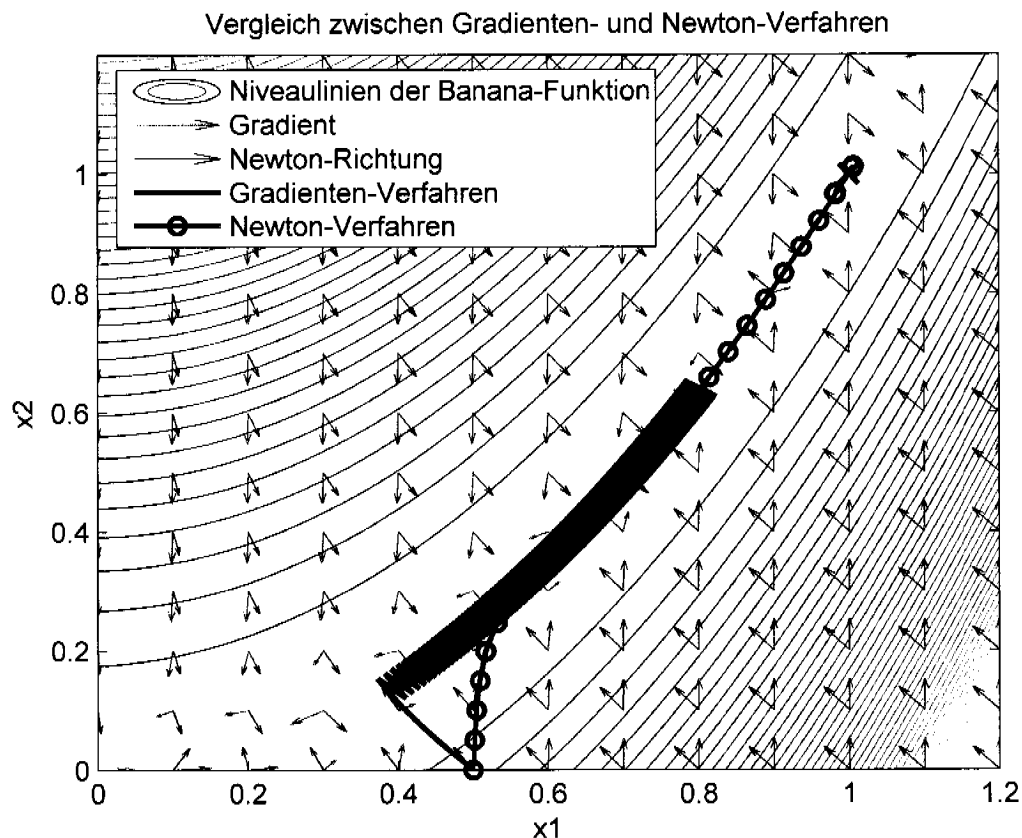


Abb. 3.12: Iterative Suche der Minimalstelle (Punkt [1 1]) der „Banana“-Funktion mit dem Gradienten-Verfahren und dem Newton-Verfahren.  
Die Schrittweite wurde konstant gewählt.

Wenn eine genügend lange Messung durchgeführt wird, kann die zweite Ableitung der Verlustfunktion  $V_N''(\theta)$  mit deren Erwartungswert ersetzt werden. Um die rechnerisch aufwendige Berechnung der zweiten Ableitungen zu vermeiden, kann folgende Gleichung verwendet werden [17, 23]:

$$Hess(\theta) \approx E\{V''(\theta)\} \approx E\{V'(\theta) \cdot [V'(\theta)]^T\}. \quad (\text{Gl. 3.48})$$

Diese Annahme kann für das Lösen des nichtlinearen Least-Squares-Problems (siehe unten) und der Maximum-Likelihood-Schätzungen (Abschnitt 3.4.2) verwendet werden. Der Algorithmus in (Gl. 3.47) mit dem Ansatz in (Gl. 3.48) wird Gauss-Newton-Verfahren genannt. Letzteres wird oft in der Parameteridentifikation verwendet und stellt die Basis für die Herleitung der RPEM-Methoden dar, welche in Abschnitt 3.4 beschrieben sind.

Die Gauss-Newton-Methode kann unbefriedigende Resultate liefern, wenn  $Hess_N(\theta)$  singulär (z.B. wenn die Anregung nicht genügend persistent ist) und deshalb nicht mehr invertierbar wird. Eine Möglichkeit, um dieses Problem zu beheben, ist die Levenberg-Marquardt-Methode, mit welcher die Matrix  $Hess_N(\theta)$  folgendermassen „regularisiert“ wird:

$$Hess_N(\theta) = V_N'(\theta) \cdot [V_N'(\theta)]^T + \delta \cdot I. \quad (\text{Gl. 3.49})$$

Der Parameter  $\delta$  ist eine Konstante. Bei  $\delta = 0$  entspricht das Levenberg-Marquardt-Verfahren der Gauss-Newton-Methode, und wenn  $\delta \rightarrow \infty$  nähert sich die Suchrichtung der steilsten Richtung (Gradienten-Verfahren).

Wenn die Suchrichtung bekannt ist, wird die Schrittlänge bzw. die lokale Minimalstelle in der Suchrichtung gesucht. Für diesen Zweck werden kubische oder quadratische Interpolationsmethoden (Zwischeniteration in Abb. 3.11) verwendet. Diese Zwischeniteration fällt bei rekursiven Methoden normalerweise aus und wird deshalb hier nicht weiter untersucht.

Wenn das Problem als Minimierung der quadratischen Fehler zwischen dem gemessenen und dem geschätzten Ausgangssignal (MISO System) betrachtet wird, kann die Verlustfunktion folgendermassen geschrieben werden:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t, \theta)]^2 = \frac{1}{2N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t, \theta)^2. \quad (\text{Gl. 3.50})$$

Dieser Ansatz ist als „nichtlineares Least-Squares-Problem“ bekannt. Um die Suchrichtung in (Gl. 3.47) zu bestimmen, werden die Ableitungen der Verlustfunktion anhand von (Gl. 3.50) bestimmt [21]:

$$V_N'(\theta) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \theta) \cdot \varepsilon(t, \theta) \quad (\text{Gl. 3.51})$$

$$V_N''(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \theta) \cdot \psi^T(t, \theta) - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi'(t, \theta) \cdot \varepsilon(t, \theta). \quad (\text{Gl. 3.52})$$

Die Matrix  $\psi(t, \theta)$  entspricht dem Gradienten des geschätzten Ausgangssignals  $\hat{y}(t, \theta)$  (bzw. der Residuen  $\varepsilon(t, \theta)$ ) bezüglich  $\theta$  und  $\psi'(t, \theta)$  ist die Hesssche Matrix von  $\hat{y}(t, \theta)$  bzw.  $\varepsilon(t, \theta)$ . Eine weitere Annahme, welche oft in der Parameteridentifikation gemacht wird, ist, dass die Residuen  $\varepsilon(t, \theta)$  in der Nähe der optimalen Lösung unabhängig sind. Als Konsequenz muss der Erwartungswert des zweiten Terms in (Gl. 3.52) ungefähr Null sein. Die zweite Ableitung der Verlustfunktion kann somit folgendermassen angenähert werden:

$$V_N''(\theta) \approx \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \theta) \cdot \psi^T(t, \theta) \triangleq \text{Hess}_N(\theta). \quad (\text{Gl. 3.53})$$

Diese Gleichung entspricht der Gauss-Newton-Annäherung in (Gl. 3.48) und kann als Linearisierung der nichtlinearen LS-Problems interpretiert werden [23].

## 3.4 Rekursive Methoden

Die Echtzeit-Algorithmen sind hauptsächlich rekursive Methoden, d.h. bei jedem Zeitschritt werden nur die neuen Informationen des Prozesses verarbeitet. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Rechenzeiten bei jedem Zeitschritt bekannt und klein sind, die Parameterschätzung ist aber nur sub-optimal und hängt oft stark von den gewählten Anfangsbedingungen ab.

In den folgenden Abschnitten werden einige rekursive Algorithmen vorgestellt und die Anpassungen für das Parameteridentifikationsproblem des Gebäudes gezeigt. Die Abschnitte 3.4.1 und 3.4.2 beschreiben die Modifikationen der Offline-Algorithmen für die Familie der Pseudolinearen Regressionen und der Prediction-Error-Methoden mit dem Kalman-Filter als Prädiktor. Im Abschnitt 3.4.3 wird der Bayessche Ansatz mit einem Extended Kalman-Filter untersucht. Als Erweiterung der RML-Methode von Abschnitt 3.4.2 wird in Abschnitt 3.4.4 die modifizierte rekursive Maximum-Likelihood-Methode vorgestellt. Diese betrachtet für die Schätzung der Residuen die Unsicherheit der geschätzten Parameter mittels eines Extended Kalman-Filters. Schliesslich werden die vorgestellten Methoden in Abschnitt 3.4.5 verglichen.

### 3.4.1 Rekursive Least-Squares-Methode (RLS)

Ausgehend von der Lösung in (Gl. 3.44) des Parameteridentifikationsproblems in (Gl. 3.43) kann die rekursive Variante der LS-Methode hergestellt werden. Der Algorithmus lautet [22, 31]:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{LS}(t) &= \hat{\theta}_{LS}(t-1) + L_{\theta}(t)[y(t) - \Phi^T(t)\hat{\theta}_{LS}(t-1)] \\ L_{\theta}(t) &= P(t)\Phi(t) = P(t-1)\Phi(t)[\Lambda + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)]^{-1} \\ P(t) &= P(t-1) - L_{\theta}(t)\Phi^T(t)P(t-1)\end{aligned}\tag{Gl. 3.54}$$

$$\text{Mit: } P(0) = \hat{P}_0 \quad \hat{\theta}_{LS}(0) = \hat{\theta}_0.\tag{Gl. 3.55}$$

Die Regression für das Gebäudemodell zweiter Ordnung ohne Rückführung der Raumtemperatur (MISO) ist in (Gl. 3.39) dargestellt und jene mit Rückführung der Raumtemperatur (MIMO) ist in (Gl. 3.41) zu finden. Für die Wahl der Anfangsschätzung des Parameters muss die Umformung in (Gl. 3.40) (MISO) bzw. (Gl. 3.42) durchgeführt werden. Wie im nächsten Unterabschnitt gezeigt ist, kann die Matrix  $P$  mit der Kovarianzmatrix des Parametervektors verglichen werden. Die Anfangsschätzung  $P(0)$  entspricht deshalb der Unsicherheit der Anfangsschätzung des Parametervektors.

Wenn die Parameter des Gebäudes langsam ändern (wegen Modellierungsfehlern oder Trocknung eines Neubaus) kann im Gütekriterium ein Vergissfaktor hinzugefügt werden, so dass die älteren Daten für die Parameteridentifikation vernachlässigt werden können. Das neue Gütekriterium lautet:

$$V_N(\theta) = \sum_{t=1}^N \lambda^{N-t} \cdot \varepsilon^T(t, \theta) \cdot \Lambda^{-1} \cdot \varepsilon(t, \theta).\tag{Gl. 3.56}$$

Der Parameter  $\lambda$  wird als Vergissfaktor definiert, der folgendermassen als exponentielle Zeitkonstante umgeformt werden kann:

$$T_{Vergiss} = \frac{1}{1 - \lambda}.\tag{Gl. 3.57}$$

Der rekursive Least-Squares Algorithmus mit Vergissfaktor lautet somit [22] :

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{LS}(t) &= \hat{\theta}_{LS}(t-1) + L_{\theta}(t)[y(t) - \Phi^T(t)\hat{\theta}_{LS}(t-1)] \\ L_{\theta}(t) &= P(t)\Phi(t) = P(t-1)\Phi(t)[\Lambda \cdot \lambda + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)]^{-1} \\ P(t) &= [P(t-1) - L_{\theta}(t)\Phi^T(t)P(t-1)]/\lambda.\end{aligned}\tag{Gl. 3.58}$$

### 3.4.1.1 Bayessche Interpretation

Wie oben schon erwähnt, kann das RLS-Problem auch als stochastisches Problem interpretiert werden. Somit wird die Bedeutung der Matrizen und Vektoren in (Gl. 3.54) und (Gl. 3.55) klarer. In diesem Fall wird der Extended Kalman-Filter verwendet, um die Parameter als Zufallsvariablen betrachten zu können. Mit einer ARX-Struktur kann das Modell in eine Zustandsraumdarstellung folgender Form gebracht werden [31]:

$$\begin{aligned}x(t+1) &= \hat{\theta}_{LS} \\ y(t) &= H(t) \cdot x(t) + r(t) \\ &= \Phi^T(t) \cdot \hat{\theta}_{LS} + e(t).\end{aligned}\tag{Gl. 3.59}$$

Mit den Gleichungen des Kalman-Filters (Gl. 3.17) kann der optimale Zustandsvektor rekonstruiert werden:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{LS}(t) &= \hat{\theta}_{LS}(t-1) + K(t) \cdot [y(t) - \Phi^T(t) \cdot \hat{\theta}_{LS}(t-1)] \\ \Sigma(t) &= \Sigma(t-1) - K(t) \cdot \Phi^T(t) \cdot \Sigma(t-1) \\ K(t) &= \Sigma(t-1) \cdot \Phi(t) \cdot [\Phi^T(t) \cdot \Sigma(t-1) \cdot \Phi(t) + \Lambda]^{-1}.\end{aligned}\tag{Gl. 3.60}$$

Ein Vergleich zeigt, dass dieser Algorithmus mit (Gl. 3.54) übereinstimmt. Die Matrix P in (Gl. 3.54) kann somit als Kovarianzmatrix des Parametervektors interpretiert werden.



### 3.4.2 Rekursive Maximum-Likelihood-Methode (RML)

In diesem Abschnitt wird ein rekursiver Algorithmus für die PEM-Familie hergestellt. Wie Abb. 3.13 zeigt, kann die Optimierung in zwei Schritten durchgeführt werden. Im ersten Schritt werden die Vorhersagen des Ausgangssignals bzw. der Residuen anhand eines optimalen Prädiktors bestimmt und im zweiten Schritt wird das gewählte Gütekriterium bezüglich des gesuchten Parametervektors minimiert. Wie in den Abschnitten 3.1.3 und 3.3.2 schon erwähnt, können viele Methoden für das Lösen des PEM-Problems gewählt werden. Dieser Abschnitt beschränkt sich nur auf das Gauss-Newton-Verfahren mit einem Kalman-Filter als Prädiktor. Die Gleichungen des Gauss-Newton-Verfahrens (Gl. 3.47) mit (Gl. 3.48) werden einerseits für die rekursive Version des Maximum-Likelihood-Problems angepasst und andererseits auf den speziellen Fall des Kalman-Filters als Prädiktor begrenzt.

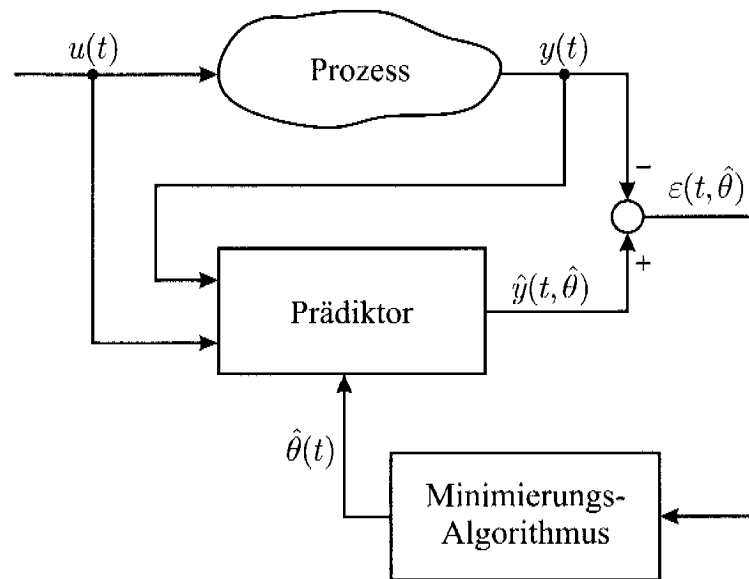


Abb. 3.13: Rekursive Variante der Prediction-Error-Methode.

Wie in (Gl. 3.26) gezeigt wurde, lautet die Verlustfunktion für die Maximum-Likelihood-Methode:

$$V_t(\theta) = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^t [\varepsilon^T(s, \theta) \Lambda^{-1}(\theta) \varepsilon(s, \theta) - \ln [\det(\Lambda(\theta))]]. \quad (\text{Gl. 3.61})$$

Im Vergleich zur quadratischen Verlustfunktion in (Gl. 3.23) kommt der Term  $\ln[\det(\Lambda(\theta))]$  hinzu. Die Kovarianzmatrix  $\Lambda(\theta)$  wird als bekannte Funktion des Parametervektors behandelt, welche vom Extended Kalman-Filter geschätzt wird. Um die Minimalstelle zu finden, wird die Gauss-Newton-Methode gewählt, d.h. die Suchrichtung entspricht derjenigen von (Gl. 3.47) mit der Annahme in (Gl. 3.48):

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) - [V_t''(\hat{\theta}(t-1))]^{-1} \cdot V_t'(\hat{\theta}(t-1)). \quad (\text{Gl. 3.62})$$

Die erste Ableitung der Verlustfunktion bezüglich des Parametervektors lautet [7, 28]:

$$V_t'(\theta) = -\sum_{s=1}^t [\psi(s) \cdot \Lambda^{-1}(\theta) \cdot \varepsilon(s, \theta)] + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^t [\eta^T(s) - \mu^T(s)] \quad (\text{Gl. 3.63})$$

mit:

$$\begin{aligned} \psi(t) &\cong \psi(t, \hat{\theta}(t-1)) = -\left[ \frac{d}{d\theta} \varepsilon(t, \theta) \right]^T \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t-1)} \\ \eta(t) &\cong \eta(t, \hat{\theta}(t-1)) = \left( \frac{\partial}{\partial \theta} [\ln(\det(\Lambda(t, \theta)))] \right)^T \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t-1)} \\ &= \left[ \text{spur} [\Lambda^{-1}(t, \theta) \varpi_1(t, \theta)] \quad \dots \quad \text{spur} [\Lambda^{-1}(t, \theta) \varpi_{n\theta}(t, \theta)] \right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t-1)} \\ \mu(t) &\cong \mu(t, \hat{\theta}(t-1)) = \left( \varepsilon^T(t, \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} \Lambda^{-1}(t, \theta)^T \varepsilon(t, \theta) \right) \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t-1)} \\ &= \varepsilon^T(t, \theta) \Lambda^{-1}(t, \theta) \left[ \varpi_1(t, \theta) \Lambda^{-1}(t, \theta) \varepsilon(t, \theta) \quad \dots \quad \varpi_{n\theta}(t, \theta) \Lambda^{-1}(t, \theta) \varepsilon(t, \theta) \right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t-1)} \end{aligned}$$

und mit  $\varpi_i(t, \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta_i} \Lambda(t, \theta)$ .

(Gl. 3.64)

Die Approximation der zweiten Ableitung der Verlustfunktion kann mit (Gl. 3.48) bestimmt werden und entspricht der Fisher-Informationsmatrix [7, 16, 24]:

$$E \{ V_t''(\theta) \} \cong R(t) = \sum_{s=1}^t [\psi(s) \cdot \Lambda^{-1}(\theta) \cdot \psi^T(s)] + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^t [\eta^T(s) \cdot \eta(s)]. \quad (\text{Gl. 3.65})$$

Um einen Online-Algorithmus herzuleiten, wird die rekursive Version der Ableitungen der Verlustfunktion benötigt. Dazu wird angenommen, dass der geschätzte Parameter nahe bei der optimalen Lösung liegt, so dass  $V'_{t-1}(\theta(t-1))$  vernachlässigt werden kann:

$$V'_t(\theta(t-1)) = -\psi(t) \cdot \Lambda^{-1}(\theta) \cdot \varepsilon(t, \theta) + \frac{1}{2} [\eta^T(t) - \mu^T(t)] \quad (\text{Gl. 3.66})$$

$$R(t) = R(t-1) + \psi(t) \cdot \Lambda^{-1}(\theta) \cdot \psi^T(t) + \frac{1}{2} [\eta^T(t) \cdot \eta(t)]. \quad (\text{Gl. 3.67})$$

Um die aufwendige Berechnung der Inversen der Fisher-Informationsmatrix zu vermeiden, wird das Matrix-Inversionslemma auf (Gl. 3.67) zweimal angewendet. Der resultierende rekursive Maximum-Likelihood- (RML) Algorithmus lautet [7, 28]:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + P(t) \left[ \psi(t) \Lambda^{-1}(t, \hat{\theta}) \varepsilon(t, \hat{\theta}) + \frac{1}{2} (\mu^T(t) - \eta^T(t)) \right] \\ S(t) &= \Lambda(t) + \psi^T(t) P(t-1) \psi(t) \\ N(t) &= P(t-1) \psi(t) S^{-1}(t) \\ P^*(t) &= P(t-1) - N(t) S(t) N^T(t) \\ P(t) &= P^*(t) - P^*(t) \eta^T(t) [2 + \eta(t) P^*(t) \eta^T(t)]^{-1} \eta(t) P^*(t). \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.68})$$

Die Matrix  $P(t)$  entspricht der Kovarianzmatrix der Parameter und ist gleich der Inversen der Fisher-Informationsmatrix  $R(t)^{-1}$ . Um den Algorithmus in (Gl. 3.68) fertigzustellen, werden die Auswertungen der Ableitungen  $\psi(t)$ ,  $\mu(t)$ ,  $\eta(t)$  und  $\varpi(t, \theta)$  in (Gl. 3.64) benötigt. Dazu wird der Prädiktor (das Kalman-Filter in (Gl. 3.17)) als Randbedingung verwendet:

$$\begin{aligned} \psi(t, \theta) &= \frac{d}{d\theta} [H(\theta) \hat{x}(t|t-1)]^T \\ &= W^T(t) H^T(\theta) + D^T(\theta, \hat{x}(t|t-1)) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.69})$$

mit:

$$\begin{aligned}
 D(\hat{\theta}, x) &= \frac{\partial}{\partial \theta} [H(\theta)x] \Big|_{\theta=\hat{\theta}} \\
 W(t+1) &= \frac{d}{d\theta} \hat{x}(t+1|t) \\
 &= \frac{d}{d\theta} [F(\theta)\hat{x}(t|t-1) + G(\theta)u(t) + K_\theta(t)\varepsilon(t, \theta)] \\
 &= [F(\theta) - K_\theta(t)H(\theta)]W(t) + M^*(\theta, \hat{x}(t|t-1), u(t)) \\
 &\quad - K_\theta(t)D(\theta, \hat{x}(t|t-1)) \\
 M^*(\hat{\theta}, x, u, \varepsilon) &= M(\hat{\theta}, x, u) + \kappa(\hat{\theta})\varepsilon \\
 M(\hat{\theta}, x, u) &= \frac{\partial}{\partial \theta} [F(\theta)x + G(\theta)u] \Big|_{\theta=\hat{\theta}} \\
 \kappa_t(\theta) &= \frac{d}{d\theta} K_\theta(t).
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.70}$$

Für die Berechnung des letzten Terms muss der Gradient der Kalman-Verstärkungsmatrix in (Gl. 3.17) ausgewertet werden. Die Formeln lauten [22, 28]:

$$\begin{aligned}
 \kappa_i(t, \hat{\theta}(t)) &= \left[ \frac{\partial F(\theta)}{\partial \theta_i} \Sigma_{1,\theta}(t|t-1)H^T(\theta) + F(\theta)\sigma_i(t, \theta)H^T(\theta) \right. \\
 &\quad \left. + F(\theta)\Sigma_{1,\theta}(t|t-1)\frac{\partial H^T(\theta)}{\partial \theta_i} + \frac{\partial G_v(\theta)}{\partial \theta_i} R_{rr}(\theta) + G_v(\theta)\frac{\partial R_{rr}(\theta)}{\partial \theta_i} \right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t)} \Lambda^{-1}(t, \hat{\theta}(t)) \\
 &\quad - K_{\hat{\theta}}(t)\varpi_i(t, \hat{\theta}(t))\Lambda^{-1}(t, \hat{\theta}(t))
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.71}$$

$$\begin{aligned}
 \varpi_i(t, \hat{\theta}(t)) &= \frac{d}{d\theta_i} \Lambda(t, \theta) \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t)} \cong \frac{d}{d\theta_i} Q_\theta(t) \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t)} \\
 &= \left[ \frac{\partial H(\theta)}{\partial \theta_i} \Sigma_{1,\theta}(t|t-1)H^T(\theta) + H(\theta)\sigma_i(t, \theta)H^T(\theta) \right. \\
 &\quad \left. + H(\theta)\Sigma_{1,\theta}(t|t-1)\frac{\partial H^T(\theta)}{\partial \theta_i} + \frac{\partial R_r(\theta)}{\partial \theta_i} \right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t)}
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.72}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_i(t+1, \hat{\theta}(t)) &= \frac{d}{d\theta_i} \Sigma_{1,\theta}(t+1|t) \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t)} \\
 &= \left[ \frac{\partial F(\theta)}{\partial \theta_i} \Sigma_{1,\theta}(t|t-1)F^T(\theta) + F(\theta)\sigma_i(t, \theta)F^T(\theta) + F(\theta)\Sigma_{1,\theta}(t|t-1)\frac{\partial F^T(\theta)}{\partial \theta_i} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial G_v(\theta)}{\partial \theta_i} R_v(\theta)G_v^T(\theta) + G_v(\theta)\frac{\partial R_v(\theta)}{\partial \theta_i} G_v^T(\theta) + G_v(\theta)R_v(\theta)\frac{\partial G_v^T(\theta)}{\partial \theta_i} \right. \\
 &\quad \left. - \kappa_i(t, \theta)\Lambda(t, \theta)K_\theta^T(t) - K_\theta(t)\varpi_i(t, \theta)K_\theta^T(t) - K_\theta(t)\Lambda(t, \theta)[\kappa_i(t, \theta)]^T \right] \Big|_{\theta=\hat{\theta}(t)}.
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.73}$$

In Hinsicht der Erweiterung des Algorithmus mit einem Extended Kalman-Filter wird schon die Matrix  $\Sigma_1$  eingeführt, welche der Kovarianzmatrix des nichterweiterten Zustandsraummodells entspricht und im konventionellen Kalman-Filter durch  $\Sigma$  ersetzt werden kann. Der Gradient der Kovarianzmatrix des Ausgangsfehlers  $\varpi$  bzw. des Schätzfehlers  $\sigma$  wird auch anhand der Kalman-Filter-Gleichungen bestimmt.

Der RML-Algorithmus mit dem Kalman-Filter als Prädiktor in (Gl. 3.17) ist mit (Gl. 3.68) und den Randbedingungen in (Gl. 3.69)-(Gl. 3.73) vollständig beschrieben.

### 3.4.3 Extended Kalman-Filter (EKF) als Parameterschätzer

In diesem Abschnitt wird das Kalman-Filter in der Ansicht des Bayesschen Ansatzes untersucht. Ein erstes Beispiel wurde in Abschnitt 3.4.1.1 gegeben. Es ist jedoch auf eine ARX-Modellstruktur beschränkt und der resultierende Algorithmus ist der RLS Methode äquivalent. Ein weiterer Ansatz ist die Erweiterung des Zustandsraummodells in (Gl. 3.7) und (Gl. 3.8) mit dem Parametervektor als weitere Zustandsgrösse. Somit bleiben die Eigenschaften der modellierten Störgrössen unverändert. Der erweiterte Zustandsvektor lautet:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.74})$$

und das erweiterte Modell kann mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} X(t+1) &= \begin{bmatrix} x(t+1) \\ \theta \end{bmatrix} = f(X(t), u(t)) + \begin{bmatrix} G_v(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} v(t) \\ y(t) &= h(X(t)) + r(t) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.75})$$

mit:

$$\begin{aligned} f(X(t), u(t)) &= \begin{bmatrix} F(\theta) \cdot x(t) + G_u(\theta) \cdot u(t) \\ \theta \end{bmatrix} \\ h(X(t)) &= H(\theta) \cdot x(t). \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.76})$$

Diese Gleichung ist nichtlinear und darf somit nicht mit dem konventionellen Kalman-Filter gelöst werden. Das Extended Kalman-Filter (EKF) ist ein ähnliches Konzept für das Lösen des nichtlinearen Problems, welches die Zustandsschätzung für nichtlineare Systeme bestimmt. Die Lösung wird mit dem Algorithmus des konventionellen Kalman-Filters berechnet; dazu muss aber das System in jedem Zeitschritt bezüglich eines Betriebspunktes durch ein lineares Modell angenähert werden, um die Systemmatrizen  $F$ ,  $G$  und  $H$  der linearen Zustandsraumdarstellung zu schätzen. Diese Annäherung gilt nur, falls die Parameter  $\theta$  bezüglich der Zeit nicht stark variieren. Die linearen erweiterten Systemmatrizen aus (Gl. 3.75)-(Gl. 3.76) um einen Betriebspunkt lauten:

$$\begin{aligned}
 F_{Erw}(\hat{X}(t), u(t)) &= \left. \frac{\partial}{\partial X} [f(X, u(t))] \right|_{X=\hat{X}(t)} \\
 &= \begin{bmatrix} F(\hat{\theta}(t)) & M(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t), u(t)) \\ 0 & I \end{bmatrix} \\
 G_{u, Erw} &= \begin{bmatrix} G_u \\ 0 \end{bmatrix} \\
 H_{Erw}(\hat{X}(t)) &= \left. \frac{\partial}{\partial X} [h(X)] \right|_{X=\hat{X}(t)} \\
 &= \begin{bmatrix} H(\hat{\theta}(t)) & D(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t)) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.77}$$

wo:

$$\begin{aligned}
 M(\hat{\theta}, \hat{x}(t), u(t)) &= \left. \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} [F(\theta)\hat{x}(t) + G_u(\theta)u(t)] \right] \right|_{\theta=\hat{\theta}(t)} \\
 D(\hat{\theta}, \hat{x}(t)) &= \left. \frac{\partial}{\partial \theta} [H(\theta) \cdot \hat{x}(t)] \right|_{\theta=\hat{\theta}(t)}.
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.78}$$

Die lineare Approximation der erweiterten Differentialgleichung in (Gl. 3.75)-(Gl. 3.76) bezüglich eines Betriebspunktes ist somit in folgenden Gleichungen zusammengefasst:

$$\begin{aligned}
 X(t+1) &= \begin{bmatrix} F(\hat{\theta}(t)) & M(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t), u(t)) \\ 0 & I \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} G_u \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} G_v \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v(t) \\
 y(t) &= \begin{bmatrix} H(\hat{\theta}(t)) & D(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t)) \end{bmatrix} \cdot X(t) + r(t).
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.79}$$

Diese Darstellung kann mit den konventionellen Kalman-Filter-Gleichungen in (Gl. 3.17) gelöst werden. Da aber das erweiterte Modell nichtlinear ist, müssen die Systemmatrizen in (Gl. 3.79) jeden Zeitschritt neu ausgewertet werden. Die Konvergenzeigenschaften und die Optimalitätsbedingungen in (Gl. 3.16) sind in diesem Fall nicht mehr gewährleistet [20].

Um die Berechnungen zu vereinfachen, kann der EKF-Algorithmus getrennt für die Parameteridentifikation und die Zustandsschätzung dargestellt werden. Dazu werden folgende Definitionen gebraucht:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & \Sigma_2 \\ \Sigma_2^T & \Sigma_3 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} L_x \\ L_\theta \end{bmatrix}, \quad (\text{Gl. 3.80})$$

wobei  $\Sigma$  der Fehler-Kovarianzmatrix des erweiterten Zustandsvektors in (Gl. 3.74) entspricht. Die Untermatrizen  $\Sigma_1$  bzw.  $\Sigma_3$  sind die Fehler-Kovarianzmatrizen von  $x(t)$  bzw. des Parametervektors  $\theta(t)$  und  $\Sigma_2$  ist die Fehler-Kreuzkovarianzmatrix zwischen  $x(t)$  und  $\theta(t)$ . Die Untermatrizen  $L_x$  und  $L_\theta$  sind die Verstärkungsmatrizen für den nichterweiterten Zustandsvektor  $x(t)$  bzw. den Parametervektor  $\theta(t)$ . Die Schätzungen der Innovation und des nichterweiterten Zustandsvektors im Extrapolationsschritt werden anhand der originalen nichtlinearen Modellgleichungen in (Gl. 3.76) bestimmt. Der erweiterte Algorithmus des erweiterten Kalman-Filters als Parameterschätzer kann anhand von [28, 31] hergeleitet werden und ist in der nächsten Seite gezeigt.

Update-Schritt:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(t|t) &= \hat{x}(t|t-1) + L_x(t) [y(t) - H(\hat{\theta})\hat{x}(t|t)] \\
 \hat{\theta}(t|t) &= \hat{\theta}(t|t-1) + L_\theta(t) [y(t) - H(\hat{\theta})\hat{x}(t|t)] \\
 Q(t) &= H(\hat{\theta})\Sigma_1(t|t-1)H^T(\hat{\theta}) + H(\hat{\theta})\Sigma_2(t|t-1)D^T(\hat{\theta}) + D(\hat{\theta})\Sigma_2^T(t|t-1)H^T(\hat{\theta}) \\
 &\quad + D(\hat{\theta})\Sigma_3(t|t-1)D^T(\hat{\theta}) + R_r(t) \\
 L_x(t) &= [\Sigma_1(t|t-1)H^T(\hat{\theta}) + \Sigma_2(t|t-1)D^T(\hat{\theta})]Q^{-1}(t) \\
 L_\theta(t) &= [\Sigma_2(t|t-1)H^T(\hat{\theta}) + \Sigma_3(t|t-1)D^T(\hat{\theta})]Q^{-1}(t) \\
 \Sigma_1(t|t) &= \left[ [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_1(t|t-1) - L_x(t)D(\hat{\theta})\Sigma_2^T(t|t-1) \right] [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]^T \\
 &\quad + [L_x(t)D(\hat{\theta})\Sigma_3(t|t-1) - [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_2(t|t-1)] D^T(\hat{\theta}) L_x^T(t) \\
 &\quad + L_x(t)R_r(t)L_x^T(t) \\
 \Sigma_2(t|t) &= - \left[ [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_1(t|t-1) - L_x(t)D(\hat{\theta})\Sigma_2^T(t|t-1) \right] H^T(\hat{\theta}) L_\theta^T(t) \\
 &\quad + \left[ [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_2(t|t-1) - L_x(t)D(\hat{\theta})\Sigma_3(t|t-1) \right] [I - L_\theta(t)D(\hat{\theta})]^T \\
 &\quad + L_x(t)R_r(t)L_\theta^T(t) \\
 \Sigma_3(t|t) &= [L_\theta(t)H(\hat{\theta})\Sigma_1(t|t-1) - [I - L_\theta(t)D(\hat{\theta})]\Sigma_2^T(t|t-1)] H^T(\hat{\theta}) L_\theta^T(t) + \\
 &\quad \left[ [I - L_\theta(t)D(\hat{\theta})]\Sigma_3(t|t-1) - L_\theta(t)H(\hat{\theta})\Sigma_2(t|t-1) \right] [I - L_\theta(t)D(\hat{\theta})]^T \\
 &\quad + L_\theta(t)R_r(t)L_\theta^T(t)
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.81}$$

Extrapolationsschritt:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(t+1|t) &= F(\hat{\theta})\hat{x}(t|t) + G_u(\hat{\theta})u(t) + G_v(\hat{\theta})R_{vr}(t)Q^{-1}(t) [y(t) - H(\hat{\theta})\hat{x}(t|t-1)] \\
 \hat{\theta}(t+1|t) &= \hat{\theta}(t|t) \\
 \Sigma_1(t+1|t) &= F(\hat{\theta})\Sigma_1(t|t)F^T(\hat{\theta}) + F(\hat{\theta})\Sigma_2(t|t)M^T(\hat{\theta}, \hat{x}(t|t), u(t)) \\
 &\quad + M(\hat{\theta}, \hat{x}(t|t), u(t)) [\Sigma_2^T(t|t)F^T(\hat{\theta}) + \Sigma_3(t|t)M^T(\hat{\theta}, \hat{x}(t|t), u(t))] \\
 &\quad + G_v(\hat{\theta})R_{vr}(t)Q^{-1}(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\hat{\theta}) \\
 &\quad + F(\hat{\theta})L_x(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\hat{\theta}) + M(\hat{\theta}, \hat{x}(t|t), u(t))L_\theta(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\hat{\theta}) \\
 &\quad + [F(\hat{\theta})L_x(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\hat{\theta}) + M(\hat{\theta}, \hat{x}(t|t), u(t))L_\theta(t)R_{vr}^T(t)G_v^T(\hat{\theta})]^T \\
 &\quad + G_v(\hat{\theta})R_v(t)G_v^T(\hat{\theta}) \\
 \Sigma_2(t+1|t) &= F(\hat{\theta})\Sigma_2(t|t) + M(\hat{\theta}, \hat{x}(t|t), u(t))\Sigma_3(t|t) + G_v(\hat{\theta})R_{vr}(t)L_\theta^T(t) \\
 \Sigma_3(t+1|t) &= \Sigma_3(t|t)
 \end{aligned} \tag{Gl. 3.82}$$

mit den Anfangsbedingungen für den Update-Schritt:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(-1|0) \\ \hat{\theta}(-1|0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_0 \\ \hat{\theta}_0 \end{bmatrix} \quad E \left\{ \begin{bmatrix} \hat{x}(-1|0) \\ \hat{\theta}(-1|0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}(-1|0) \\ \hat{\theta}(-1|0) \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} \Pi_0 & 0 \\ 0 & \tilde{\Sigma}_{3,0} \end{bmatrix}. \tag{Gl. 3.83}$$



Ein enger Vergleich zwischen dem EKF als Parameterschätzer und einem rekursiven Gauss-Newton Algorithmus [22] zeigt, dass der Term  $\kappa_t \cdot \varepsilon(t)$  für die Berechnung der Matrix  $M(\theta, x, u)$  in (Gl. 3.78) im EKF vernachlässigt wird (vgl. mit  $M^*(\theta, x, u, \varepsilon)$  in (Gl. 3.69)). Das heisst, die Kopplung der Kalman-Verstärkungsmatrix mit dem Parametervektor  $\theta$  wird im EKF nicht betrachtet. Die Strafe für die Vernachlässigung dieses Terms ist der Verlust einiger Konvergenzeigenschaften. Es kann jedoch gezeigt werden, dass die Matrix  $M(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t|t), u(t))$  eine gute Annäherung von  $M^*(\theta, x, u, \varepsilon)$  ist:

$$M(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t|t), u(t)) - M(\hat{\theta}(t), \hat{x}(t|t-1), u(t)) \approx \kappa(\hat{\theta}(t), t) \varepsilon(t). \quad (\text{Gl. 3.84})$$

So kann die aufwendige Berechnung der Ableitung der Kalman-Verstärkungsmatrix für die Auswertung des Extended Kalman-Filters weggelassen werden.

### 3.4.3.1 Anwendung des EKF auf das Hausmodell zweiter Ordnung

Die Untersuchungen in Abschnitt 3.2 haben gezeigt, dass das Hausmodell zweiter Ordnung am besten für Aufgabe der Parameteridentifikation geeignet ist. Das EKF wird nun für das Beispiel des Gebäudemodells zweiter Ordnung vervollständigt. Vor der Erweiterung des Zustandsvektors werden die Parameter zusammengefasst, um die Berechnungen zu erleichtern. Ausgehend vom Zustandsraummodell in (Gl. 2.17) und (Gl. 2.18) wird der Parametervektor folgendermassen definiert:

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T = \left[ \frac{\kappa_{WR}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} \quad \frac{1}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_H} \quad \frac{\kappa_{WR}}{\kappa_G \cdot \tau_G} \quad \frac{1}{\tau_G} \right]^T. \quad (\text{Gl. 3.85})$$

Die Systemmatrizen lauten dann (angenommen, dass sowohl die Heizwasser-rücklauftemperatur als auch die Raumtemperatur gemessen werden):

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 - t_S \cdot \theta_1 & t_S \cdot \theta_1 \\ t_S \cdot \theta_3 & 1 - t_S \cdot (\theta_3 + \theta_4) \end{bmatrix} & G_u(\theta) = G_v(\theta) &= \begin{bmatrix} 0 & t_S \cdot \theta_2 \\ t_S \cdot \theta_4 & 0 \end{bmatrix} \\ H(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & & \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3.86})$$

und aus (Gl. 3.78):

$$M = \begin{bmatrix} t_S(T_R - T_{RL}) & t_S\dot{Q}_{WP} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_S(T_{RL} - T_R) & t_S(\tilde{T}_A - T_R) \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 3.87})$$

Weiter müssen die Anfangsbedingungen und die Grössen der Störungen gewählt werden. Als Anfangsschätzung des nichterweiterten Zustandsvektors werden einfach die ersten Messungen gewählt. Die Wahl der Anfangsparameter ist schwieriger, da diese die Konvergenzeigenschaften des Algorithmus beeinflussen. Eine Möglichkeit besteht darin, repräsentative Gebäudetypen zu definieren (z.B. Minergiehaus, altes Haus, Gebäude mit träger Fussbodenheizung usw.) und jedem Gebäudetyp einen Parametersatz zuzuordnen. Eine Hauptrolle für die Konvergenz des Algorithmus spielt auch die Anfangskovarianzmatrix des erweiterten Zustandsvektors. Von besonderem Interesse sind die Diagonalelemente der Kovarianzmatrix, welche einerseits die Unsicherheit des Fehlers der geschätzten Rücklauftemperatur  $T_{RL}$  bzw. Raumtemperatur  $T_R$  ( $\Pi_0$  in (Gl. 3.83)) und andererseits die Unsicherheit des Parametervektors in ( $\tilde{\Sigma}_{3,0}$  in (Gl. 3.83)) darstellen. Damit die Anfangsschätzungen des Parametervektors  $\theta$  und der Kovarianzmatrix  $\tilde{\Sigma}_{3,0}$  bestimmt werden können, müssen die Parameter  $V_H$ ,  $\kappa_{WR}$ ,  $\kappa_G$ ,  $\tau_G$  auf  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  abgebildet werden. Am besten kann  $\tilde{\Sigma}_{3,0}$  anhand einer numerischen Approximation bestimmt werden. Die gewählten Kovarianzmatrizen des Prozess- bzw. Messrauschens entsprechen den Sensorgenauigkeiten.

### 3.4.4 EKF mit RML als Parameterschätzer (MRML)

Ein Nachteil des RML-Algorithmus mit KF als Prädiktor ist, dass oft bei ungenauen Anfangsschätzungen des Parametervektors die Konvergenzeigenschaften schlecht sind. Der Grund dafür ist, dass die Parameter im Kalman-Filter als bekannte Grössen behandelt werden und somit bei ungenauen Anfangsbedingungen schlechte Vorhersagen geliefert werden. Es ist deshalb sinnvoll, im Kalman-Filter auch den Parametervektor als stochastische Variable zu modellieren, so dass die Unsicherheit der Parameterschätzung vom Prädiktor berücksichtigt wird. Dieses Ziel wird beim Einsetzen eines Extended Kalman-Filters (vgl. Abschnitt 3.4.3) als Prädiktor erreicht.

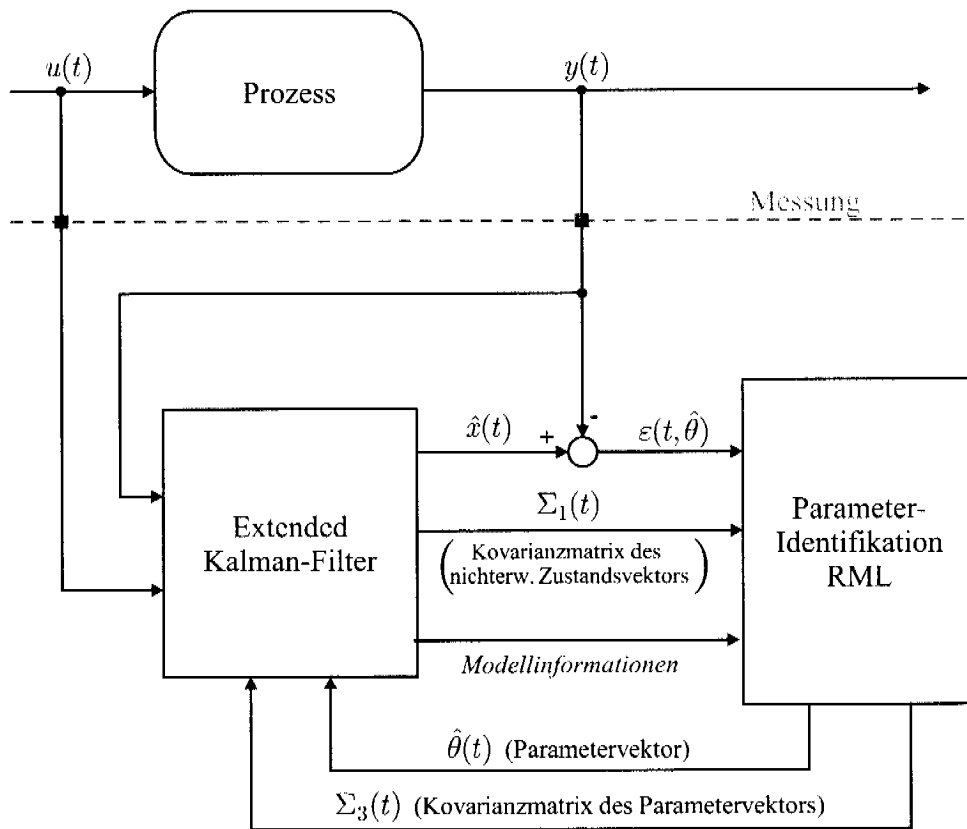


Abb. 3.14: Modifizierter rekursiver Maximum-Likelihood-Algorithmus für die Parameteridentifikation

Das Konzept der modifizierten Version des Rekursiven Maximum-Likelihood-Algorithmus ist, den Extended Kalman-Filter als Prädiktor zu verwenden, um genauere Schätzungen des nichterweiterten Zustandsvektors zu erhalten. Im Gegensatz zum EKF werden jedoch die Schätzungen des Parametervektors und dessen Kovarianzmatrix vom rekursiven Maximum Likelihood Algorithmus berechnet, wie bei der konventionellen RML Methode. Abb. 3.14 zeigt das Konzept der MRML-Methode. Für die Herleitung des vollständigen Algorithmus wurde hier angenommen, dass die Matrizen  $R_{\eta\eta}(t)$  und  $D(\theta)$  Null sind. Aus [7, 17, 22, 28, 31] kann der MRML-Algorithmus mit den Gleichungen (Gl. 3.88)-(Gl. 3.92) beschrieben werden.

Das Kalman-Filter liefert neben der Ein-Schritt-Prädiktion des Zustandssignals auch die Ausgangsfehler-Kovarianzmatrix. Diese wird für die Maximierung der Likelihood-Funktion verwendet. Zudem ist die Auswertung von  $\Sigma_3(t+1|t)$  nicht mehr nötig, da diese vom ML-Algorithmus geschätzt wird (Fisher-Informationsmatrix). Die Kopplung der Kalman-Verstärkungsmatrix mit dem Parametervektor wird durch den Term  $\kappa(\hat{\theta})\varepsilon(t)$  in der Matrix  $M^*(t)$  betrachtet.

$ \begin{aligned} \hat{x}(t t) &= \hat{x}(t t-1) + L_x(t)[y(t) - H(\hat{\theta})\hat{x}(t t)] \\ Q(t) &= \Lambda(t) = H(\hat{\theta})\Sigma_1(t t-1)H^T(\hat{\theta}) + R_r(t) \\ L_x(t) &= [\Sigma_1(t t-1)H^T(\hat{\theta})]Q^{-1}(t) \\ L_\theta(t) &= [\Sigma_2(t t-1)H^T(\hat{\theta})]Q^{-1}(t) \\ \Sigma_1(t t) &= [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_1(t t-1)[I - L_x(t)H(\hat{\theta})]^T + L_x(t)R_r(t)L_x^T(t) \\ \Sigma_2(t t) &= -[I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_1(t t-1)H^T(\hat{\theta})L_\theta^T(t) \\ &\quad + [I - L_x(t)H(\hat{\theta})]\Sigma_2(t t-1) + L_x(t)R_r(t)L_\theta^T(t) \end{aligned} $	$\left. \vphantom{\begin{aligned} & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \end{aligned}} \right\}$	EKF Update
(Gl. 3.88)		
$ \begin{aligned} K(t) &= F(\hat{\theta})L_x(t) \\ \varepsilon(t) &= y(t) - H(\hat{\theta})\hat{x}(t t) \end{aligned} $		Kalman Gain Schätzfehler (Gl. 3.89)
$ \begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + P(t)\left[\psi(t)Q^{-1}(t)\varepsilon(t, \hat{\theta}) + \frac{1}{2}(\mu^T(t) - \eta^T(t))\right] \\ P(t) &= \Sigma_3(t t-1) = \Sigma_3(t t) \\ &= P^*(t) - P^*(t)\eta^T(t)[2 + \eta(t)P^*(t)\eta^T(t)]^{-1}\eta(t)P^*(t) \\ P^*(t) &= P(t-1) - N(t)S(t)N^T(t) \\ S(t) &= Q(t) + \psi^T(t)P(t-1)\psi(t) \\ N(t) &= P(t-1)\psi(t)S^{-1}(t) \end{aligned} $	$\left. \vphantom{\begin{aligned} & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \end{aligned}} \right\}$	RML      
(Gl. 3.90)		
$ \begin{aligned} \psi(t) &= W^T(t)H^T(\hat{\theta}) \\ W(t+1) &= [F(\hat{\theta}) - K(t)H(\hat{\theta})]W(t) + M^*(t) \\ M^*(t) &= M(t) + \kappa(\hat{\theta})\varepsilon(t) \\ M(t) &= \frac{\partial}{\partial \theta}[F(\theta)\hat{x}(t t-1) + G(\theta)u(t)]\Big _{\theta=\hat{\theta}(t)} \\ \eta(t) &= [\text{spur}[Q^{-1}(t)\varpi_1(t)] \quad \cdots \quad \text{spur}[Q^{-1}(t)\varpi_{n\theta}(t)]] \\ \mu(t) &= \varepsilon^T(t)Q^{-1}(t)[\varpi_1(t)Q^{-1}(t)\varepsilon(t) \quad \cdots \quad \varpi_{n\theta}(t)Q^{-1}(t)\varepsilon(t)] \end{aligned} $	$\left. \vphantom{\begin{aligned} & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \end{aligned}} \right\}$	KF als Randbed. für RML
(Gl. 3.91)		
$\kappa(\hat{\theta}), \varpi(t) \text{ aus (Gl. 3.71)-(Gl. 3.73)}$		
$ \begin{aligned} \hat{x}(t+1 t) &= F(\hat{\theta})\hat{x}(t t) + G_u(\hat{\theta})u(t) \\ \Sigma_1(t+1 t) &= F(\hat{\theta})\Sigma_1(t t)F^T(\hat{\theta}) + F(\hat{\theta})\Sigma_2(t t)M^T(\hat{\theta}, \hat{x}(t t), u(t)) \\ &\quad + M(\hat{\theta}, \hat{x}(t t), u(t))[\Sigma_2^T(t t)F^T(\hat{\theta}) + P(t)M^T(\hat{\theta}, \hat{x}(t t), u(t))] \\ &\quad + G_v(\hat{\theta})R_v(t)G_v^T(\hat{\theta}) \\ \Sigma_2(t+1 t) &= F(\hat{\theta})\Sigma_2(t t) + M(\hat{\theta}, \hat{x}(t t), u(t))P(t) \end{aligned} $	$\left. \vphantom{\begin{aligned} & \\ & \\ & \\ & \\ & \end{aligned}} \right\}$	EKF Extrapolation
(Gl. 3.92)		

### 3.4.5 Vergleich und Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die vier rekursiven Methoden verglichen und die Robustheit bezüglich Rauschen und Modellierungsfehler, d.h. nichtmodellierten Störeffekten (Sonnenstrahlung) und Strukturvereinfachung ( Vernachlässigung der Fussbodenträgheit), untersucht. Für diesen Zweck werden Montecarlo-Simulationen mit verschiedenen Bedingungen (wie Aussentemperaturverläufe, Rauschen und Anfangs-Parameterschätzungen) durchgeführt.

#### ***Randbedingungen für die Montecarlo-Simulationen***

Für jede Montecarlo-Simulation werden unterschiedliche Rausch- und Aussentemperaturverläufe verwendet. Bei Simulationen mit Sonnenstrahlung wird der Sonnenstrahlungsverlauf immer gleich gewählt, damit bei jedem Versuch die mittleren Energiegewinne immer unverändert bleiben. Damit ein fairer Vergleich der rekursiven Identifikationsmethoden durchgeführt werden kann, werden bei jedem Versuch folgende Randbedingungen für die Montecarlo-Simulationen gewählt

- Anzahl Montecarlo-Simulationen: 200
- Rauschen an den Ausgangs- und Eingangssignalen:

	<i>Rauschenvarianz</i>	<i>Quantisierung</i>
<i>Temperaturmessung</i>	0.01 [°C <sup>2</sup> ]	0.1 [°C]
<i>Wärmestrommessung</i>	0.25 [kW <sup>2</sup> ]	0.2 [kW]

- Simulationsdauer: 21 Tage
- Abtastzeit: 300 Sekunden

#### ***Rand- und Anfangsbedingungen für die Parameteridentifikation***

Insgesamt werden vier rekursive Parameteridentifikationsmethoden mit den Montecarlo-Simulationen untersucht:

- *Least-Squares-Methode (RLS)*: (Gl. 3.58) mit (Gl. 3.41)-(Gl. 3.42)
- *Extended Kalman-Filter als Parameterschätzer (EKF)*: (Gl. 3.81)-(Gl. 3.83) mit (Gl. 3.79) und (Gl. 3.85) -(Gl. 3.87)

- *Rekursive Maximum-Likelihood-Methode (RML)*: (Gl. 3.88)-(Gl. 3.92) aber ohne Erweiterung des Zustandsraummodells, mit (Gl. 2.17) und (Gl. 3.85)-(Gl. 3.86)
- *Modifizierte rekursive Maximum-Likelihood-Methode (MRML)*: (Gl. 3.88)-(Gl. 3.92) mit (Gl. 3.79) und mit (Gl. 3.85)-(Gl. 3.87)

Es wird angenommen, dass die Parameter völlig unbekannt sind. Bei jeder Montecarlo-Simulation wird der Anfangsparametersatz zufällig generiert, das gewählte Intervall ist in der Tabelle 3.1 links dargestellt. Die entsprechende Abbildung nach dem Parametervektor  $\theta$  ist rechts dargestellt, vgl. (Gl. 3.85). Die Anfangskovarianzmatrix der Parameter wird so gewählt, dass sich die entsprechende Anfangswahrscheinlichkeitsfunktion in den Größenordnungen des Anfangsparameterintervalls von Tabelle 3.1 befinden.

Tabelle 3.1: Intervall für die Generierung der Anfangsparameter für die Montecarlo-Simulationen und entsprechende Abbildung  $[V_H, \kappa_{WR}, \kappa_G, \tau_G] \rightarrow [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]$

<i>Intervall der Anfangsparameter</i>	<i>Abbildung</i>
$V_H$ : [0.5...10.5] m <sup>3</sup>	$\theta_1$ : [1.1 · 10 <sup>-5</sup> ... 3.1 · 10 <sup>-3</sup> ]
$\kappa_{WR}$ : [500...6500] W/K	→ $\theta_2$ : [2.3 · 10 <sup>-8</sup> ... 4.7 · 10 <sup>-7</sup> ]
$\kappa_G$ : [50...2050] W/K	$\theta_3$ : [1 · 10 <sup>-7</sup> ... 7.2 · 10 <sup>-4</sup> ]
$\tau_G$ : [50...650] h	$\theta_4$ : [4.3 · 10 <sup>-7</sup> ... 5.6 · 10 <sup>-6</sup> ]

Es wird also folgende Anfangskovarianzmatrix der Parameter für alle Montecarlo-Simulationen verwendet:

$$\Sigma_3(-1|0) = P(0) = \begin{bmatrix} 1 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cdot 10^{-15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \cdot 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot 10^{-12} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3.93})$$

Weiter ist das Profil der Anfangswahrscheinlichkeitsfunktion von  $\theta$  und der Anfangsparameterintervall in Abb. 3.15 dargestellt.

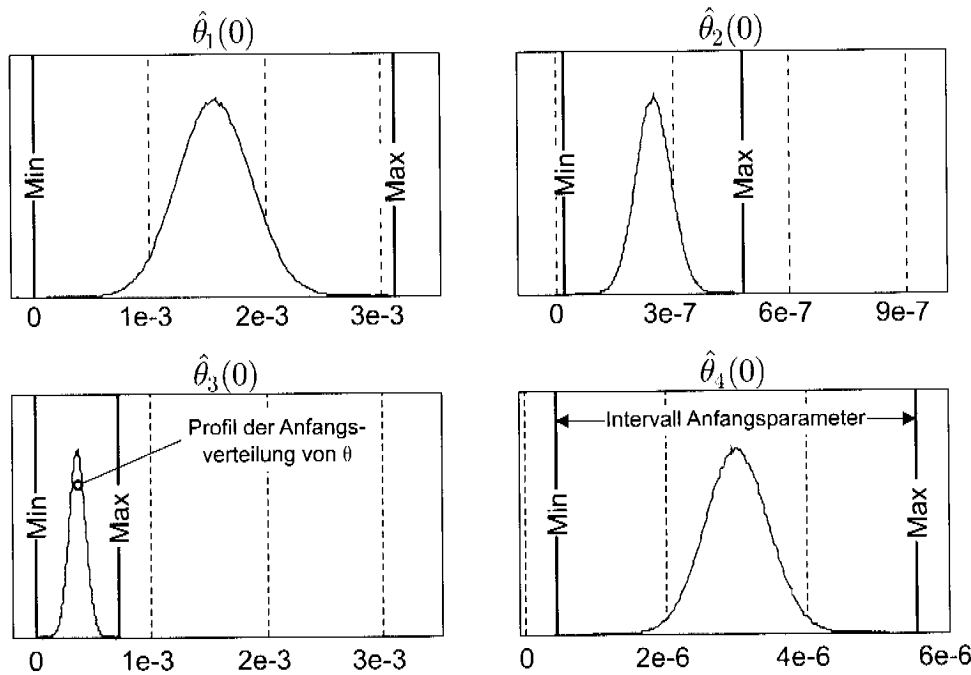


Abb. 3.15: Intervalle für die Wahl der Anfangsparameter

Für die Optimierung mit dem Kalman-Filter (bei der RML-, EKF- und MRML-Methode) werden zusätzlich die Kovarianzmatrizen des Mess- und Prozessrauschens (vgl. (Gl. 3.7)-(Gl. 3.8)) benötigt. Um das Messrauschen und die Quantisierung der digitalen Sensoren zu berücksichtigen, werden folgende Parameter verwendet:

$$R_v = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 2.5 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \quad R_r = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix} \quad R_{vr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 3.94})$$

Bei der RLS-Methode kann hingegen die Unsicherheit der Messung nur über  $\Lambda$  definiert werden. Unter Berücksichtigung, dass die Ausgangssignale der linearen Regression in (Gl. 3.41)-(Gl. 3.42) nicht mehr direkt die Rücklauf- und Raumtemperatur sind, sondern deren Ableitung entsprechen, wird eine grössere Fehlerkovarianzmatrix des Ausgangsvektors gewählt:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 3.95})$$

### Referenzanlage Winterthur-Seen ohne Sonnenstrahlung

Um die Konsistenz der Parameteridentifikation besser zu untersuchen, wird für die Montecarlo-Simulation das Verhalten der Referenzanlage Winterthur-Seen durch das Hausmodell dritter Ordnung simuliert. Dafür werden die Parameter aus Tabelle 2.1 verwendet. Die Resultate des RLS-Algorithmus sind in Abb. 3.16 dargestellt.

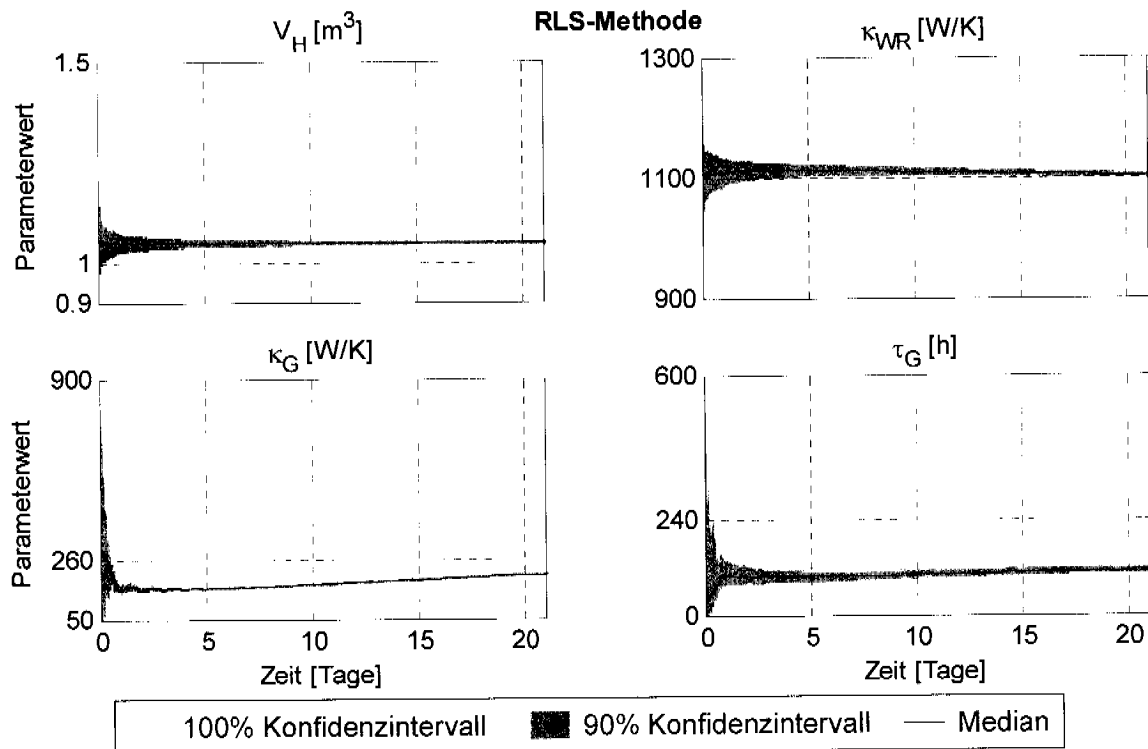


Abb. 3.16: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der RLS-Methode. Das Modell für den Vergleich entspricht der Referenzanlage Winterthur-Seen, ohne Sonnenstrahlung.

Die Parameter für die Beschreibung des Verhaltens des Heizwassers konvergieren sehr schnell und bleiben ungefähr konsistent. Hingegen werden die Parameter für den Raumspeicher schlecht geschätzt, d.h. die Gebäudezeitkonstante  $\tau_G$  und die Gebäudekennlinie  $\kappa_G$  sind zu tief.



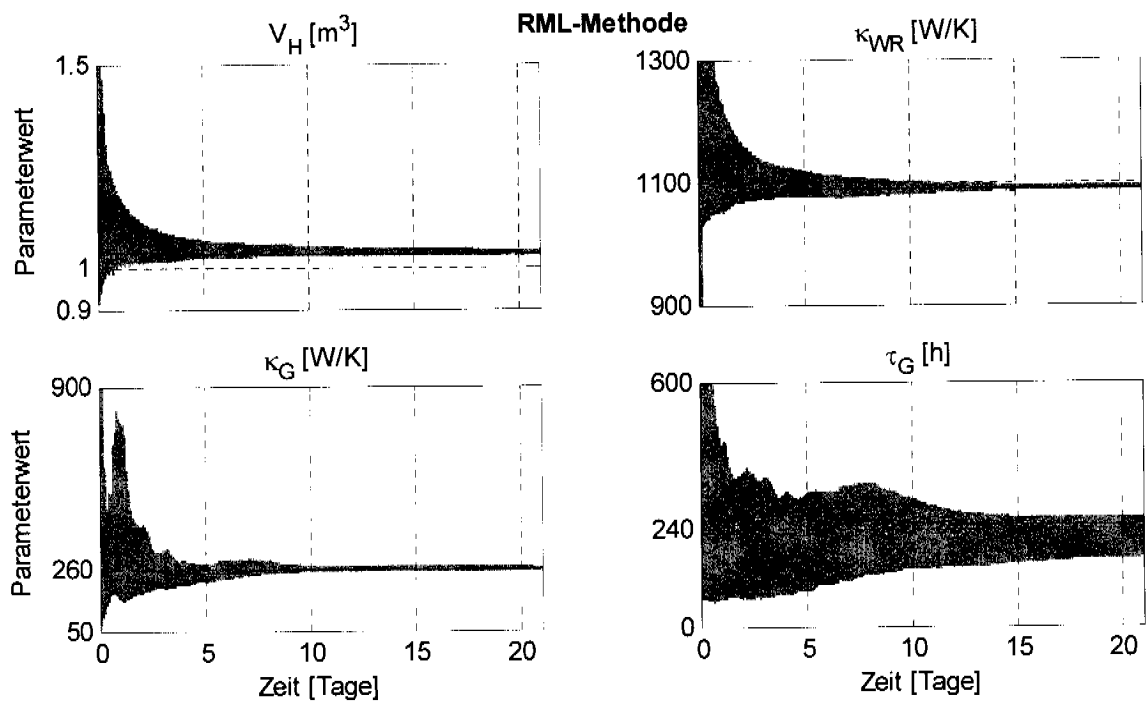


Abb. 3.17: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der RML-Methode. Das Modell für den Vergleich entspricht der Referenzanlage Winterthur-Seen, ohne Sonnenstrahlung.

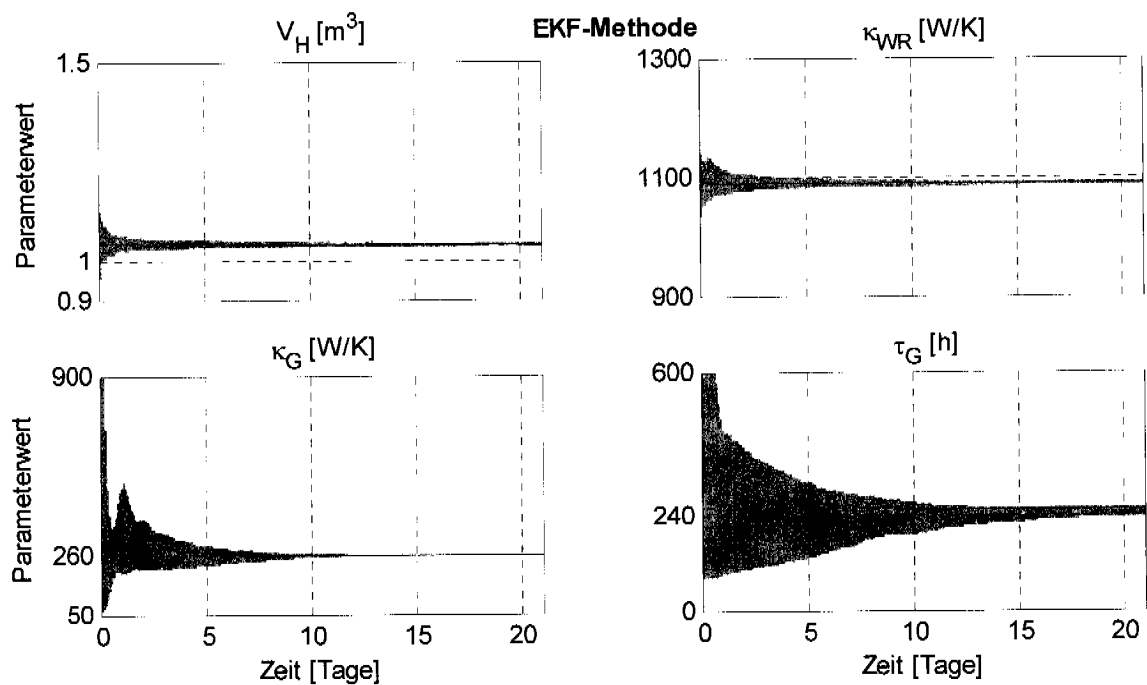


Abb. 3.18: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der EKF-Methode. Das Modell für den Vergleich entspricht der Referenzanlage Winterthur-Seen, ohne Sonnenstrahlung.

Mit der RML-Methode (Abb. 3.17) werden im Mittel die korrekten Parameter geschätzt. Die Streuung der Montecarlo-Simulationen bleibt jedoch ziemlich gross. Mit der EKF-Methode hingegen können deutlich bessere Resultate erzielt werden (Abb. 3.18). Am Ende der dritten Woche bleiben einige Ausreisser, vor allem bei der Schätzung von  $V_H$  und  $\tau_G$ . Die MRML-Methode (Abb. 3.19) hat eine langsamere Konvergenz, aber die Streuung der Parameterschätzung am Ende der dritten Woche ist im allgemeinen kleiner.

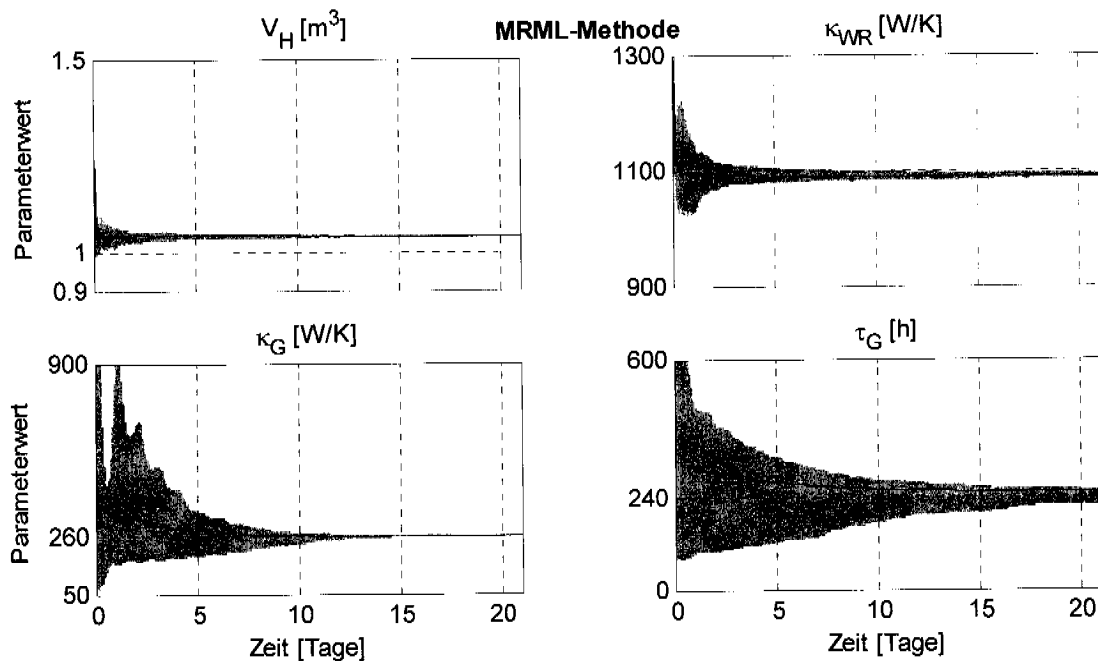


Abb. 3.19: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der MRML-Methode. Das Modell für den Vergleich entspricht der Referenzanlage Winterthur-Seen, ohne Sonnenstrahlung.

Die Box-Plots [37] der Parameterschätzungen der Montecarlo-Simulationen am Ende der dritten Woche sind in Abb. 3.20 dargestellt. Um eine Auswertung der Resultate zu ermöglichen, ist zusätzlich das Intervall der Parameterwerte dargestellt, welches als konsistent beurteilt wird. Die ersten zwei Parameter  $V_H$  und  $\kappa_{WR}$  werden gut von allen vier rekursiven Methoden identifiziert. Bei der Identifikation der Parameter  $\kappa_G$  und  $\tau_G$  versagt hingegen die RLS-Methode. Mit der RML-Methode können gute Resultate erzielt werden, die Parameterstreuung bleibt jedoch ziemlich gross. Die EKF-Methode ist mit der MRML-Methode vergleichbar, die Streuung der Parameterschätzung bleibt mit der EKF-Methode kleiner als mit der MRML-Methode, aber die Streuung der Ausreisser ist mit der EKF-Methode etwas grösser. Weiter zeigt die Abb. 3.21 den Verlauf des Anteils der schlechten Parameterwerte (welche ausserhalb des Intervalls in Abb. 3.20 sind) in Funktion der Zeit. Im allgemei-

nen konvergieren die Parameter mit der EKF-Methode schneller. Mit der RML-Methode bleibt ein grosser Anteil Ausreisser. Obwohl die Parameter mit der MRML-Methode langsamer konvergieren, ist der Anteil Ausreisser nach zwei Wochen im allgemeinen kleiner.

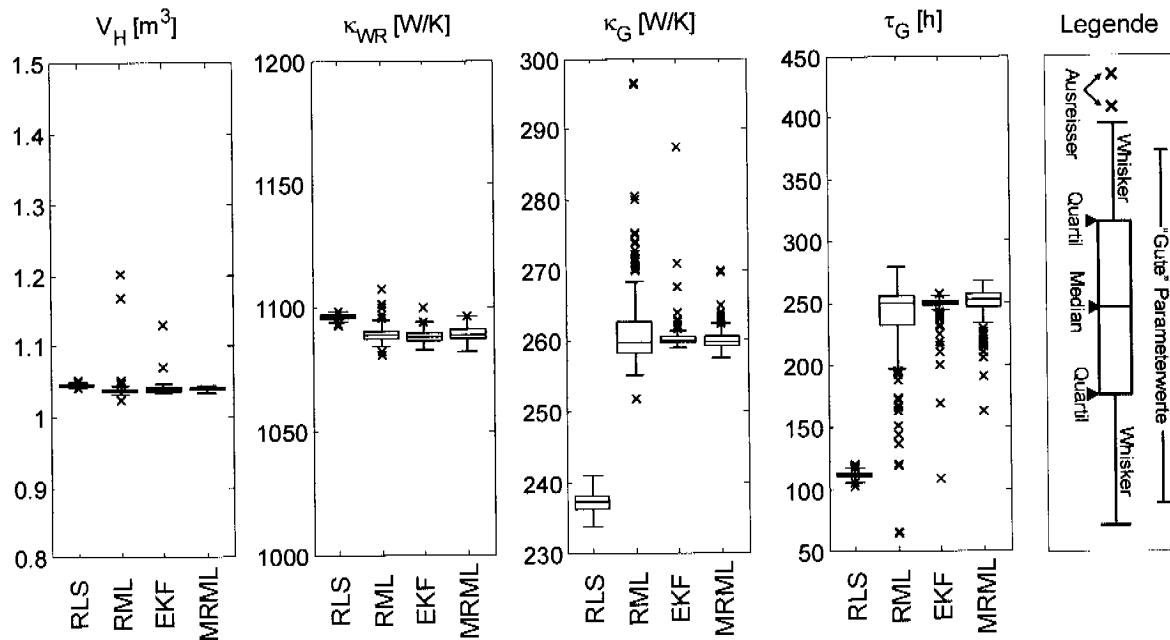


Abb. 3.20: Boxplot der Resultate der Parameteridentifikation nach drei Wochen mit der RLS-, RML-, EKF- und MRML-Methode und Darstellung des Intervalls der akzeptablen Parameter.

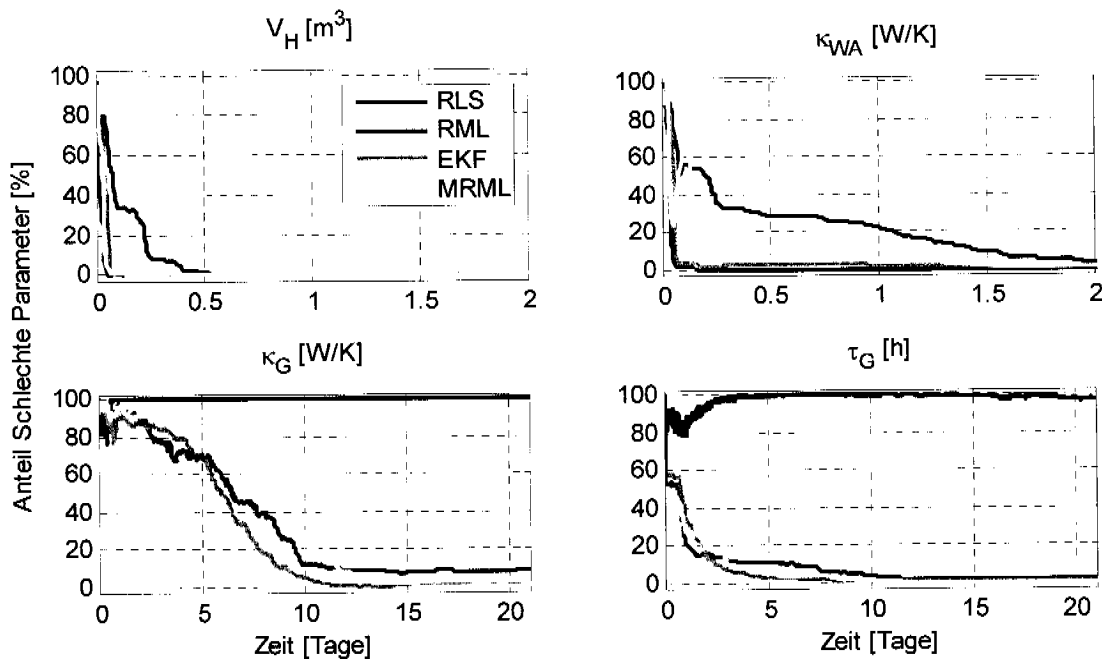


Abb. 3.21: Konvergenz der Parameter nach einer guten Lösung in Funktion der Zeit. Das Intervall der „guten“ Parameterwerte ist in Abb. 3.20 klar ersichtlich.

### ***Simulationsmodell der Fachhochschule Beider Basel***

Weiter wird die Parameteridentifikation des Simulationsmodells der Fachhochschule Beider Basel (CARNOT-Blockset) untersucht. Die Parameteridentifikation wird wegen der grossen Modellierungsfehler (träge Fussbodendynamik) und der starken Sonnenstrahlungs-Störung erschwert. Die Verläufe der Parameteridentifikation (100% bzw. 90% Konfidenzintervall und Median) mit den vier Verfahren (RLS, RML, EKF und MRML) sind in den Abb. 3.22 bis Abb. 3.25 dargestellt. Die Resultate entsprechen ungefähr jenen des vorherigen Abschnitts. Die RLS-Methode liefert inkonsistente Parameter, hingegen können die Identifikationsmethoden mit dem Kalman-Filter als Prädiktor bessere Resultate erreichen. Die EKF- und die MRML-Methode haben bessere Konvergenzeigenschaften als die RML-Methode, die MRML-Methode konvergiert jedoch im Schnitt langsamer.

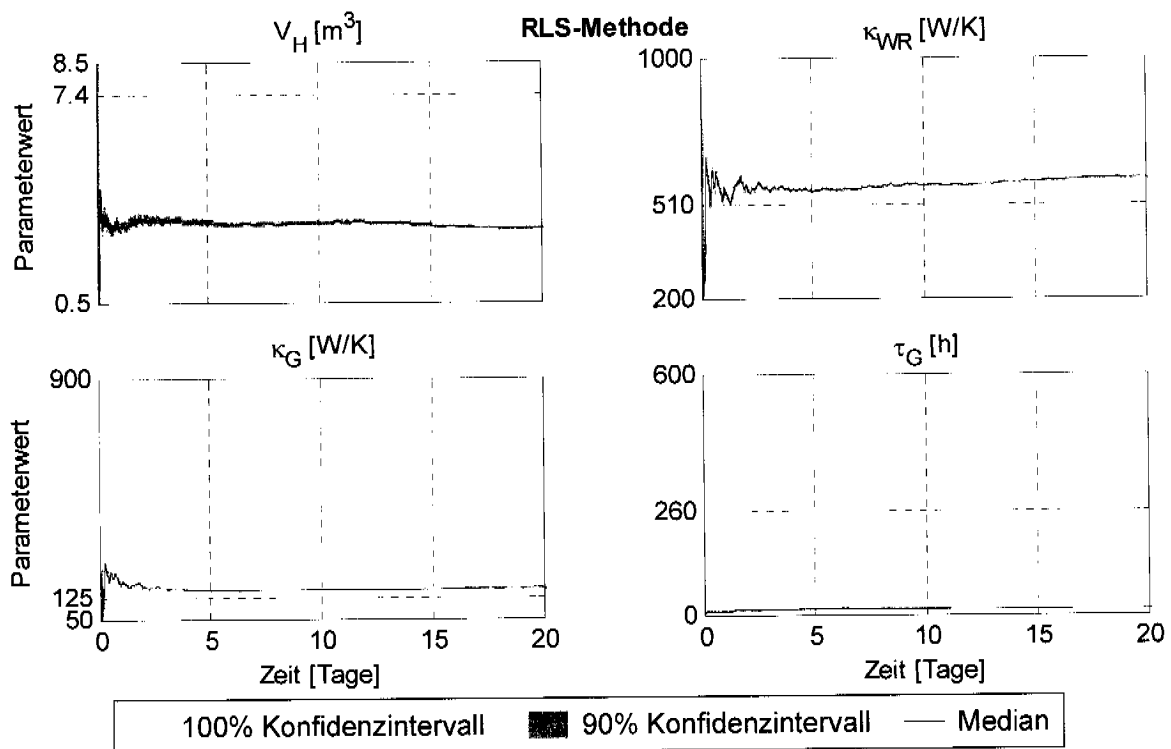


Abb. 3.22: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der RLS-Methode.  
Referenzmodell FHBB mit Sonnenstrahlung.

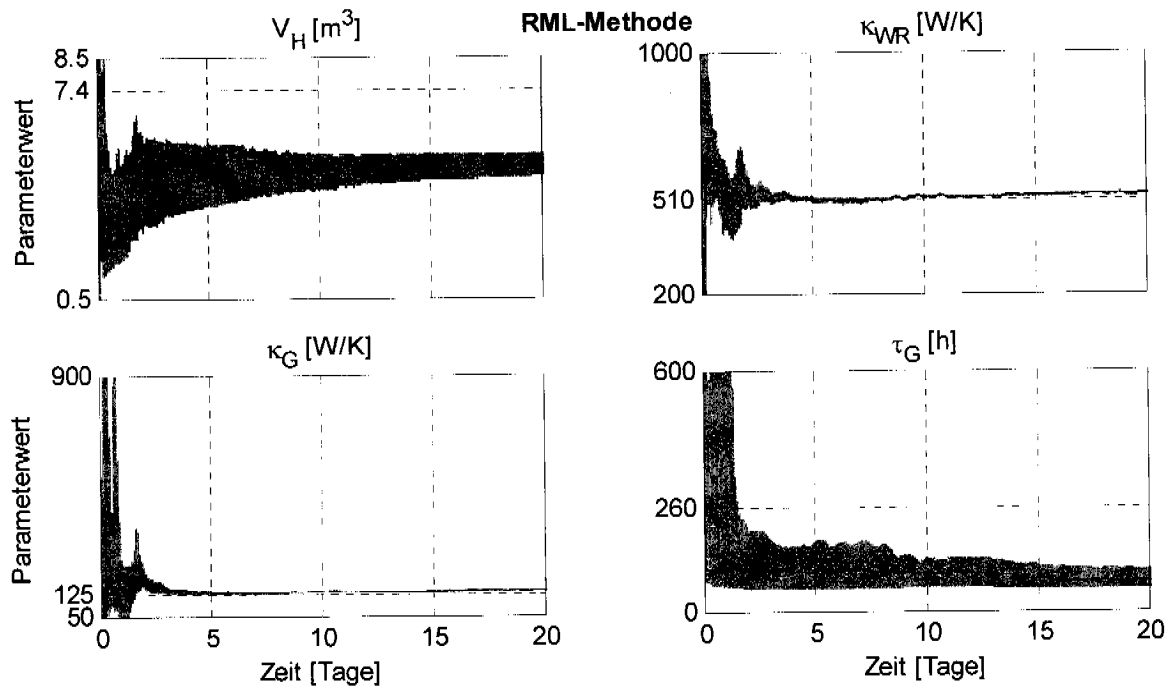


Abb. 3.23: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der RML-Methode.  
Referenzmodell FHBB mit Sonnenstrahlung.

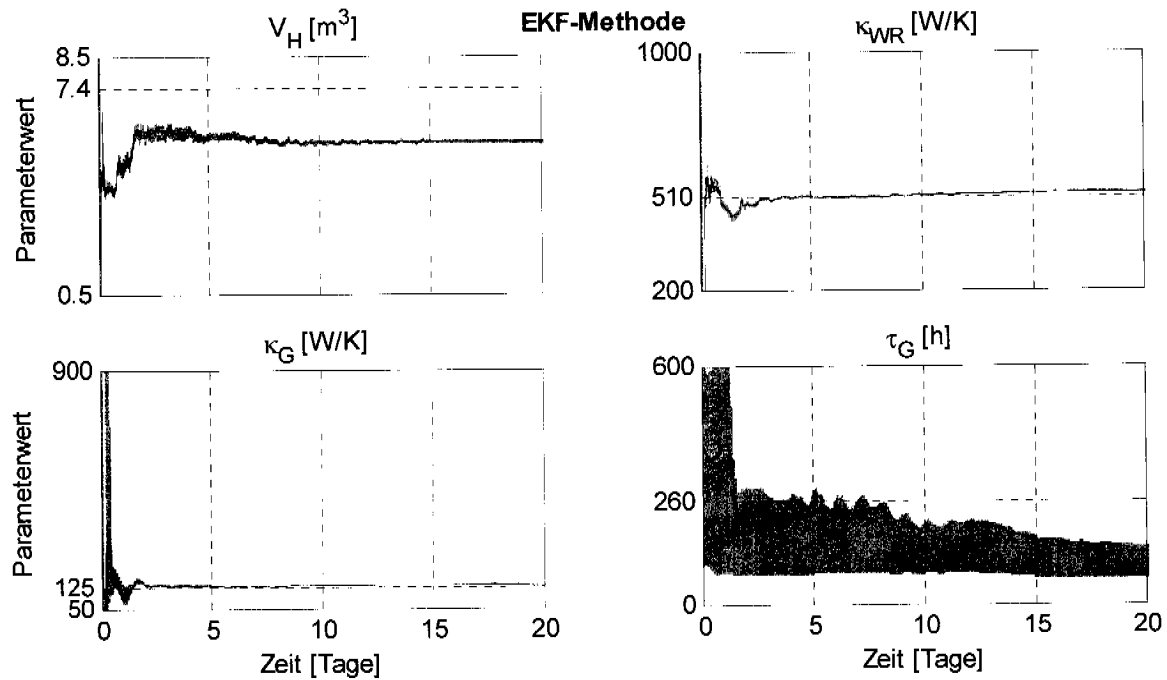


Abb. 3.24: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der EKF-Methode.  
Referenzmodell FHBB mit Sonnenstrahlung.

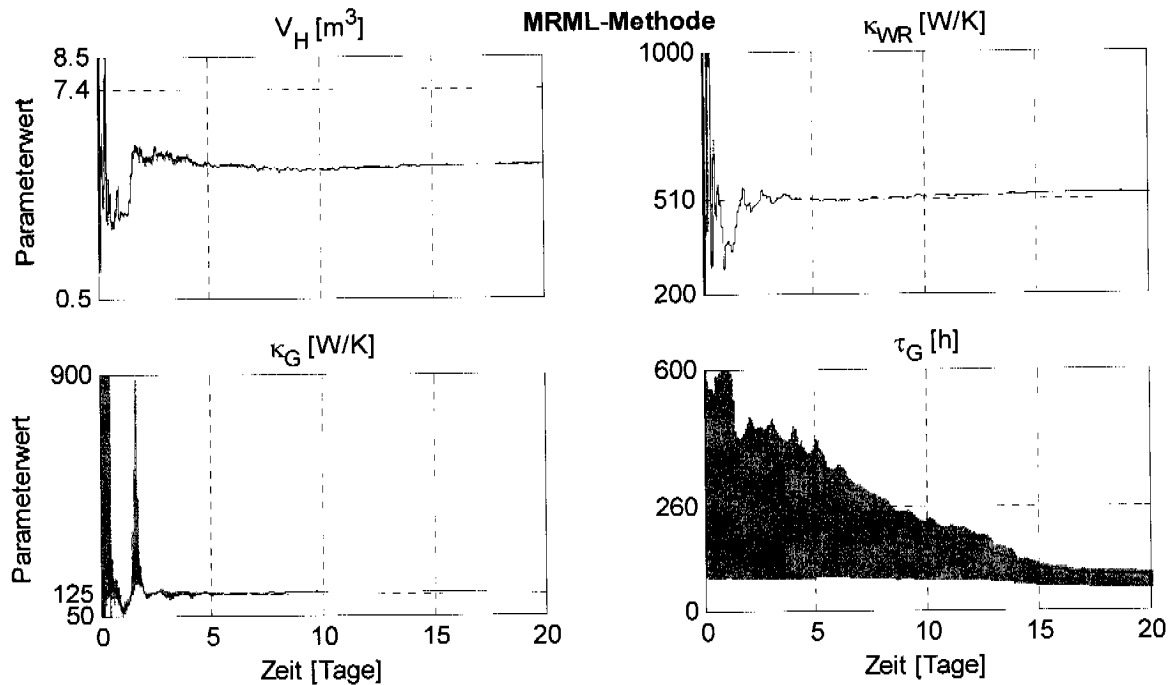


Abb. 3.25: Resultate der Montecarlo-Simulationen mit der MRML-Methode.  
Referenzmodell FHBB mit Sonnenstrahlung.

Die identifizierten Werte von  $V_H$  und  $\tau_G$  entsprechen nicht genau den Resultaten von Tabelle 2.2, wegen dem grossen Modellierungsfehler ist es jedoch schwierig, die Parameterkonsistenz zu untersuchen. Die Resultate in Abb. 3.26 zeigen, dass am Ende der dritten Woche die drei Identifikationsmethoden mit Kalman-Filter als Prädiktor (RML, EKF, MRML) ungefähr die gleichen Parametersätze schätzen. Die Akzeptanz-Intervalle werden in Abb. 3.26 nicht dargestellt, da der Parametersatz vom Betriebspunkt des FHBB-Modells abhängt (wegen der Modellierungsfehler).

Die Simulationen (reine Simulation ohne Kalman-Filter) in Abb. 3.27 mit den Parameterschätzungen am Ende der dritten Woche (Median der Montecarlo-Simulation) zeigen, dass die RLS-Methode schlechtere Resultate liefert. Mit den Parametern der RML-, EKF-, und MRML-Methode können hingegen die „gemessenen“ Raum- und Rücklauftemperaturen gut reproduziert werden.

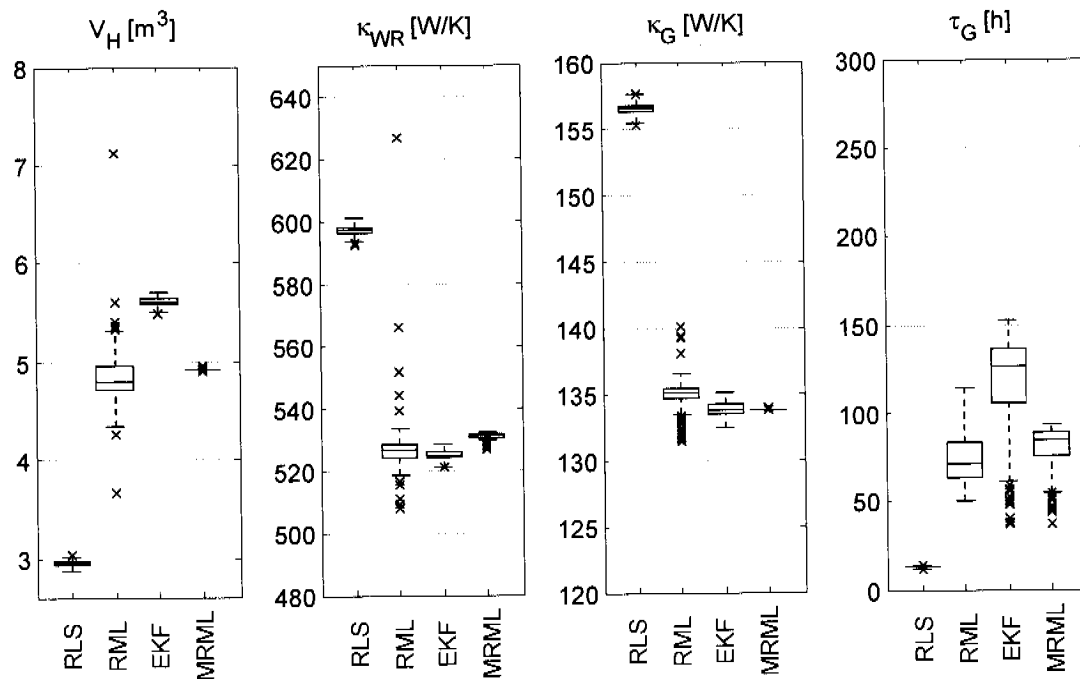


Abb. 3.26: Boxplot der Resultate der Parameteridentifikation nach drei Wochen mit der RLS-, RML-, EKF- und MRML-Methode. Referenzmodell FHBB mit Sonnenstrahlung.

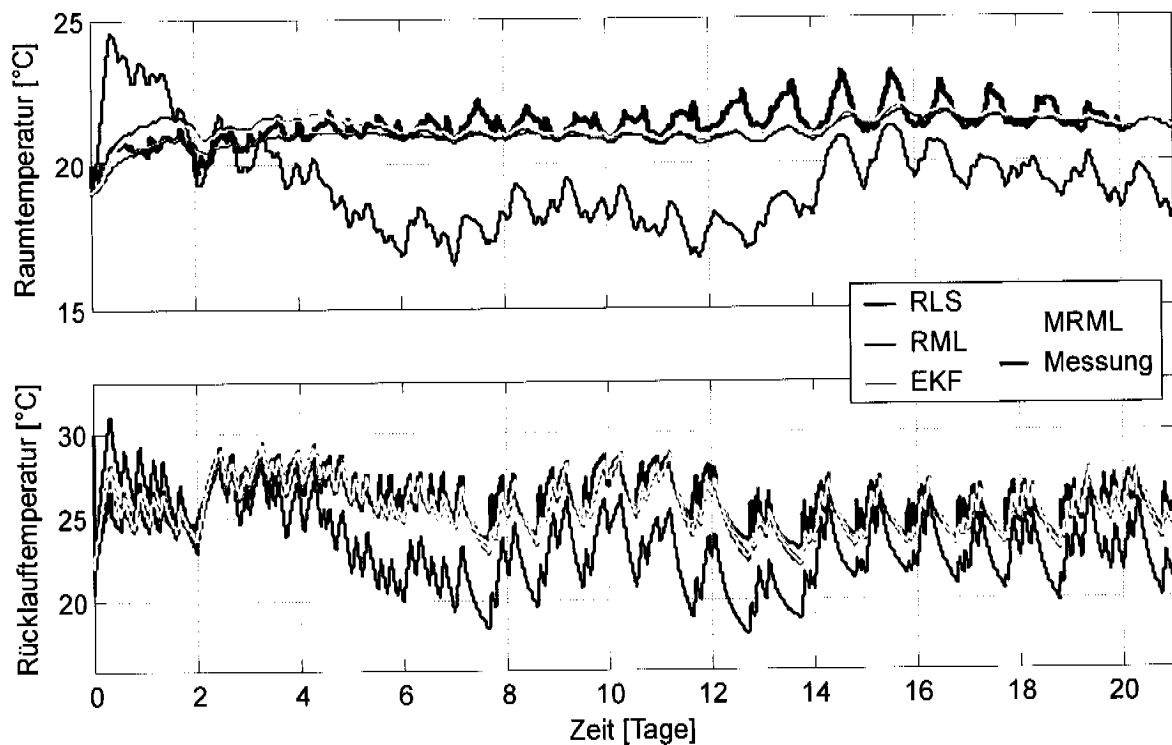


Abb. 3.27: Simulation mit den Parametern am Ende der Parameteridentifikation mit der RLS-, RML-, EKF- und MRML-Methode und Vergleich mit den Simulationen des Referenzmodells FHBB.

---

## 4      **Adaptiver Modellbasierter Prädiktiver Regler mit Pulsbreitenmodulation**

Kleinwärmepumpenanlagen werden normalerweise mit witterungsgeführten Zwei-Punkt-Reglern betrieben, welche das Ein-/Aus-Schaltsignal in Abhängigkeit der Heizwassertemperatur und Aussenlufttemperatur bestimmen. Es handelt sich hier um Wärmepumpen mit einem Kompressor ohne Drehzahlregelung (d.h. die einzigen Wärmepumpenzustände sind Ein oder Aus), welche in der Praxis in Einfamilienhäusern installiert werden. Die Nachteile dieser Regelungsstrategie sind, dass die Optimierung der Wärmepumpenlaufzeit und -arbeitszahl gar nicht oder nur zweitrangig berücksichtigt wird und die Niedertarifzeiten nicht gut ausgenützt werden. Als Konsequenz kann nur der Heizkomfort und können nicht die Energiekosten optimiert werden. Im Laufe eines Forschungsprojekts des Bundesamtes für Energie wurde ein neues Regelkonzept für die Hausheizung entwickelt [13, 39], welches auf der Pulsbreitenmodulation (PBM) basiert. Die Steuerung der Wärmepumpe mit der PBM ermöglicht eine geschickte Positionierung der Heizpakete im Laufe des Tages und erhöht den Heizkomfort bei Aussentemperaturen in der Nähe der Heizgrenze. Insbesondere wurde am Institut für Mess- und Regeltechnik der modellbasierte prädiktive Regler (MPC) mit Pulsbreitenmodulation (PBM) entwickelt [39]. Die Wärmepumpenregelung erfolgt dabei in zwei Schritten. Zuerst wird mittels des modellbasierten prädiktiven Reglers der Wärmebedarfsverlauf in Abhängigkeit der Wetterprognosen, der Heizkosten und der Arbeitszahl der Wärmepumpe bestimmt. Als zweiter Schritt wird der benötigte Wärmeleistungsverlauf in Wärmepakete quantifiziert und anhand der Pulsbreitenmodulation verteilt.

Der MPC-Regler benötigt ein Hausmodell, welches das Verhalten des Wohnobjekts gut nachvollziehen und vorhersagen kann. Für diesen Zweck wird das Hausmodell zweiter Ordnung gewählt, welches in Kapitel 2 beschrieben ist. Die Gebäudeparameter werden mit einem rekursiven Identifikations-Algorithmus anhand der Gebäudemessungen geschätzt (vgl. Kapitel 3). Diese werden schliesslich dem modellbasierten prädiktiven Regler übergeben, um die neue Wärmebedarfswerte zu berechnen. Der Hauptvorteil des adaptiven



MPC-Reglers gegenüber den konventionellen Regelungsstrategien ist, dass die Parameter nicht mehr von Hand angepasst, sondern automatisch identifiziert werden.

Der adaptive MPC-Regler mit PBM wird zudem für die Regelung einer Kombianlage erweitert, d.h. parallel zur Gebäudeheizung wird auch die Warmwasseraufbereitung betrieben. Für die Warmwasseraufbereitung wird angenommen, dass das Wasser im Speicher nicht gemischt wird, sondern dass eine horizontale Temperatschichtung beim Entladen im Speicher entsteht. Auf diese Weise bleibt die Warmwassertemperatur am Ausgang des Speichers konstant auf ungefähr 50°C, bis der ganze Speicher entladen ist. Die Ladung des Speichers wird normalerweise ein- oder zweimal pro Tag durchgeführt; als Einschaltkriterium bzw. Ausschaltkriterium der Wärmepumpe für die Speicherheizung wird die Warmwassertemperatur auf 2/3 der Speicherhöhe bzw. die Vorlauftemperatur des Heizwassers verwendet.

Ziel ist, einerseits die Warmwassertemperatur auf eine möglichst hohe Temperatur zu bringen, ohne dass die Wärmepumpe wegen einer Hochdruckstörung ausschaltet. Andererseits sollen mittels variablen Soll-Einschalttemperaturen die Speicherladungen während der Niedertarifzeiten plaziert werden.

Die Algorithmen für die Parameteridentifikation des Gebäudes, für die modellbasierte prädiktive Regelung des Gebäudes und für die Warmwasseraufbereitung müssen miteinander kooperieren für eine korrekte Kombianlagenregelung (vgl. Abb. 4.1). Es gilt die Regel, dass die Warmwasseraufbereitung Priorität hat. Folglich werden die Speicherladungszeiten in der Optimierung der Gebäudeheizung mit MPC berücksichtigt.

In diesem Kapitel werden einerseits die Eigenschaften des konventionellen MPC-Reglers mit PBM untersucht und andererseits die durchgeführten Erweiterungen am MPC-Regler beschrieben. In Abschnitt 4.1 werden die Gleichungen des Reglers vorgestellt und das Verhalten des MPC-Reglers beschrieben. Zudem werden die Anpassungen für Sole/Wasser-Wärmepumpen und für die Wetterprognose mit MeteoSchweiz beschrieben. In Abschnitt 4.2 werden die gewählte hydraulische Schaltung für die Warmwasseraufbereitung und das Regelkonzept für die Speicherladung beschrieben. In Abschnitt 4.3 wird der vollständige adaptive MPC-Regler mit PBM für die Kombianlage präsentiert.

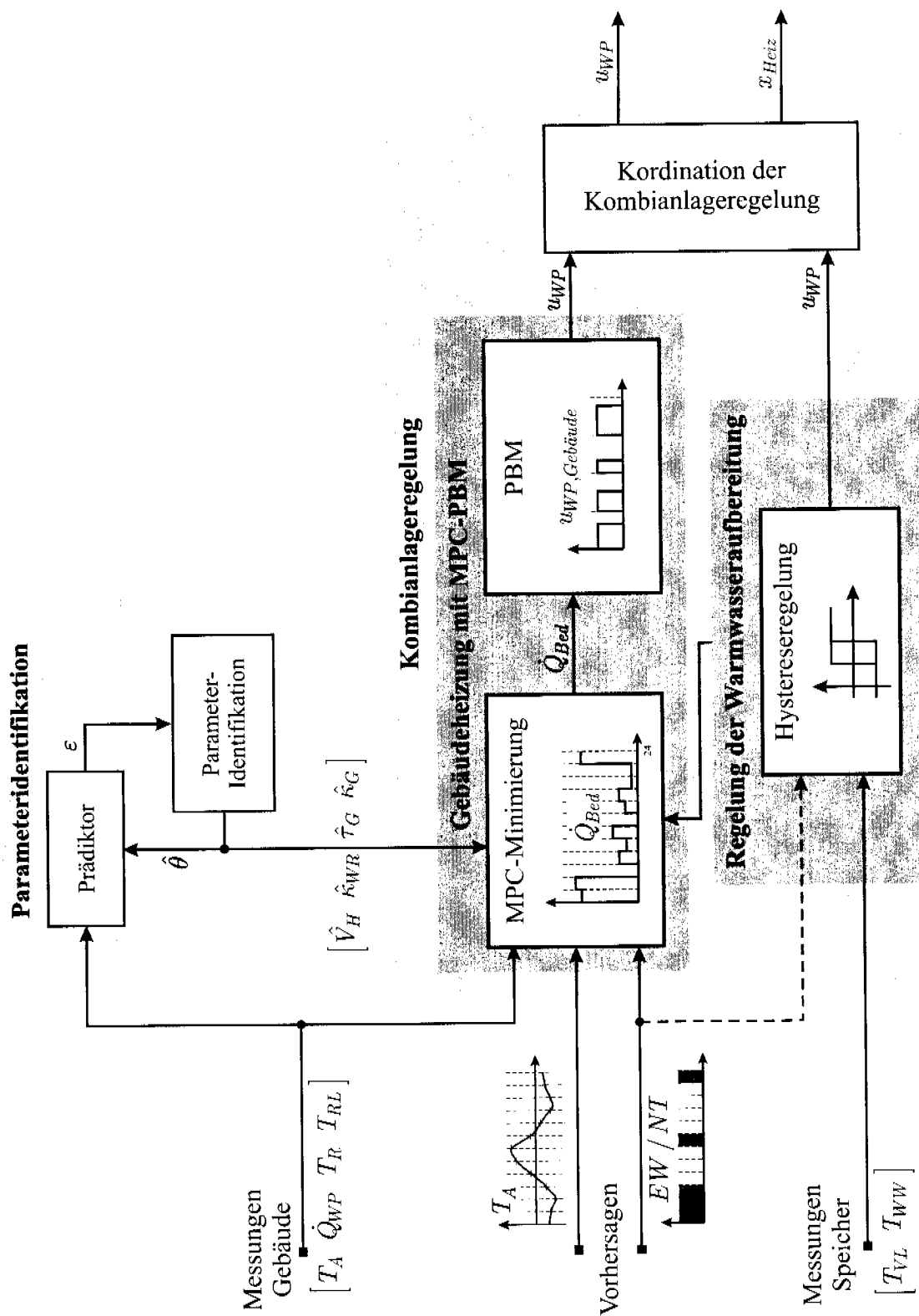


Abb. 4.1: Konzept der Kombianlagenregelung. Die Gebäudeheizung wird mittels der adaptiven modellbasierten Regelung mit Pulsbreitenmodulation (MPC-PBM) betrieben. Die Heizung des Warmwassers wird mittels Hystereseregulation gewährleistet.

## 4.1 Herleitung und Analyse des konventionellen MPC mit PBM für die Hausheizung

### 4.1.1 Modellbasierte prädiktive Regelung

Die Aufgabe des modellbasierten prädiktiven Reglers, welcher in [34, 39, 40] beschrieben ist, ist es den Temperaturkomfort zu maximieren und den Energieverbrauch oder die Energiekosten zu minimieren. Für diesen Zweck wird, neben den aktuellen Messwerten, ein Prädiktionshorizont von typischerweise 24 Stunden betrachtet. Der momentane Wärmebedarf für das Gebäude wird anhand von Wettervorhersagen, Leistungszahl-Vorhersagen der Wärmepumpe und Energiekosten bestimmt. Um das MPC-Problem zu lösen, muss ein zu minimierendes Gütekriterium formuliert werden. Die Verlustfunktion wird quadratisch gewählt und bestraft den Fehler zwischen Soll- und Ist-Raumtemperatur und den Energieverbrauch bzw. Energiekosten über den Zeithorizont:

$$J(\dot{Q}_{Bed}) = \frac{t_{S,MPC}}{2} \sum_{k=0}^N \left\{ \tilde{R}_k \cdot \left( \frac{Tarif_k}{COP_k} \cdot \dot{Q}_{Bed,k} \right)^2 + (T_{R,k} - T_{Rsol,k})^2 \right\} \quad (Gl. 4.1)$$

Im Unterschied zum klassischen LQ-Regelungsproblem betrachtet das Gütekriterium auch die zukünftigen Werte des Raumtemperatursollverlaufs und der Energiekosten. Die Summe entspricht der Integration über den Zeithorizont,  $N$  ist die Anzahl Prädiktionsschritte und  $t_{S,MPC}$  die gewählte Abtastzeit (typischerweise eine Stunde). Der erste Term des Gütekriteriums stellt die Energiekosten dar. Dazu werden die momentanen elektrischen Verbrauchsangaben benötigt, die anhand der Leistungszahl (COP, coefficient of performance) der Wärmepumpe und des gesuchten Wärmebedarfs bestimmt werden:

$$COP(t) = \frac{\dot{Q}_{WP}(t)}{P_{WP}(t)}, \quad (Gl. 4.2)$$

wobei  $\dot{Q}_{WP}$  die Wärmepumpenleistung und  $P_{WP}$  die elektrische Leistung der Wärmepumpe ist. Schliesslich werden die Gesamtheizkosten anhand der momentanen Kosten der elektrischen Energie  $Tarif_k$  bestimmt. Falls keine variable Tarifstruktur vorhanden ist (Hoch- / Niedertarif) oder die Minimierung des elektrischen Verbrauchs erwünscht ist, kann  $Tarif_k$  gleich Eins gewählt

werden, so dass die Minimierung des Gütekriteriums in (Gl. 4.1) der Minimierung des elektrischen Verbrauchs entspricht. Der zweite Term des Gütekriteriums in (Gl. 4.1) bestraft den Raumtemperaturfehler bezüglich eines Sollwertverlaufs. Der Parameter  $\tilde{R}_k$  ist ein Gewichtungsfaktor, welcher die zwei Terme im Gütekriterium gegeneinander abwägt. Falls bekannt, können die Sperrzeiten der Gebäudeheizung (z.B. wegen der Warmwasseraufbereitung oder der Sperrzeiten des Elektrizitätswerks) im Gütekriterium berücksichtigt werden, indem während dieser Zeiten ein grosser Gewichtungsfaktor gewählt wird. Dafür wird der folgende variable Gewichtungsfaktor  $R_k$  definiert:

$$R_k = \tilde{R}_k \left( \frac{\text{Tarif}_k}{\text{COP}_k} \right)^2 = \begin{cases} R_0 \left( \frac{\text{Tarif}_k}{\text{COP}_k} \right)^2 & \text{für Gebäudeheizung} \\ \infty & \text{falls Heizungssperre (wegen Warmwasseraufbereitung} \\ & \text{oder Sperrzeiten des Elektrizitätswerks)} \end{cases} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

$R_0$  ist ein konstanter Gewichtungsfaktor; wenn  $R_0$  gross gewählt wird, wird der elektrische Energie-Verbrauch gegenüber dem Raumtemperaturkomfort bevorzugt. Die Bestimmung der Raumtemperatur für die Auswertung von (Gl. 4.1) wird anhand des in Kapitel 2 vorgestellten Gebäudemodells zweiter Ordnung (Gl. 2.17)-(Gl. 2.18) durchgeführt. Diese Gleichungen gelten als Randbedingung für die Minimierung des Gütekriteriums. Für die Lösung des Problems werden die steuerbaren Grössen (Heizleistung der Wärmepumpe) und die nicht steuerbaren Signale (gemessene Störgrössen, Aussenlufttemperatur) getrennt betrachtet. Das Gebäudemodell in (Gl. 2.17) wird somit folgendermassen umgeformt:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_{RL,(k+1)} \\ T_{R,(k+1)} \end{bmatrix} &= F(\theta) \cdot \begin{bmatrix} T_{RL,k} \\ T_{R,k} \end{bmatrix} + G_u(\theta) \cdot \dot{Q}_{WP,k} + G_v(\theta) \cdot \tilde{T}_{A,k} \\ y_k &= H(\theta) \cdot \begin{bmatrix} T_{RL,k} \\ T_{R,k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

mit:

$$F = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\kappa_{WR} \cdot t_{S,MPC}}{\rho_W c_W V_H} & \frac{\kappa_{WR} \cdot t_{S,MPC}}{\rho_W c_W V_H} \\ t_{S,MPC} \frac{\kappa_{WR}}{\kappa_G \tau_G} & 1 - t_{S,MPC} \frac{\kappa_{WR} + \kappa_G}{\kappa_G \tau_G} \end{bmatrix}$$

$$G_v(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{t_{S,MPC}}{\tau_G} \end{bmatrix} \quad G_u(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{t_{S,MPC}}{\rho_W c_W V_H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad H(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Da nur die Raumtemperatur im Gütekriterium von Interesse ist, wird sie als Ausgangssignal gewählt. Das Modell muss die gleiche Abtastzeit  $t_{S,MPC}$  wie das MPC-Problem in (Gl. 4.1) besitzen; für die Regelung der Gebäudeheizung wird  $t_{S,MPC}$  gleich eine Stunde gewählt. Wie im Abschnitt 2.4 erwähnt, müssen zuerst die Messungen gemittelt werden, um die Aliasing-Effekte zu vermeiden.

Um die Verlustfunktion in (Gl. 4.1) mit der Randbedingung in (Gl. 4.4) und (Gl. 4.5) zu minimieren, wird die Vorhersage des COP, der Energiekosten und der Aussenlufttemperatur für den gesamten Prädiktionshorizont benötigt. Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe lautet [14, 25, 34, 39]:

$$\dot{Q}_{Bed,k} = -R_k^{-1} G_u^T (F^T)^{-1} \left\{ (H^T T_{Rsol,k} - w_k) + (U_k - H^T H) \begin{bmatrix} T_{RL,k} \\ T_{R,k} \end{bmatrix} \right\}. \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Der Vektor  $w_k$  in (Gl. 4.6) ist als Führungsgrösse zu interpretieren und wird rekursiv anhand der Rückwärtsintegration bestimmt.

$$w_k = -F^T U_{k+1} \left( I - G_u [R_k + G_u^T U_{k+1} G_u]^{-1} G_u^T U_{k+1} \right) [G_u R_k^{-1} G_u^T w_{k+1} + G_v \tilde{T}_{A,k}] \\ + F^T w_{k+1} + H^T T_{Rsol,k}$$

$$w_N = H^T T_{Rsol,N}. \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Die Matrix  $U_k$  in den Gleichungen (Gl. 4.6) und (Gl. 4.7) ist die Lösung der folgenden Matrix-Riccati-Differentialgleichung:

$$U_k = H^T H + F^T U_{k+1} F - F^T U_{k+1} G_u [R_k + G_u^T U_{k+1} G_u]^{-1} G_u^T U_{k+1} F \\ U_N = H^T H. \quad (\text{Gl. 4.8})$$

Die Abb. 4.2 zeigt das Konzept der Regelung der Gebäudeheizung mit MPC. Für die Berechnung des optimalen Wärmeleistungsbedarfes  $\dot{Q}_{Bed}$  werden die Aussentemperaturvorhersagen, COP-Vorhersagen und Niedertarif- / Sperrzeiten innerhalb des Optimierungshorizontes berücksichtigt. Letztere werden mittels des Gewichtungsfaktors  $R_k$  in (Gl. 4.3) betrachtet. Die Methode, um die Vorhersage der Wärmepumpenleistungszahl zu bestimmen, hängt vom Wärmepumpentyp ab. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen kann die Vorhersage direkt anhand der Wetterprognosen und der Wärmepumpenkennlinie bestimmt werden, da der COP hauptsächlich von der Aussenlufttemperatur abhängt. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die COP-Vorhersage schwieriger, da diese vom Wärmepumpenzustand abhängt (vgl. Abschnitt 4.1.3.2 und Abb. 4.8). Als Wettervorhersage kann am einfachsten der Verlauf des vorherigen Tages korrigiert auf die aktuelle Temperatur verwendet werden.

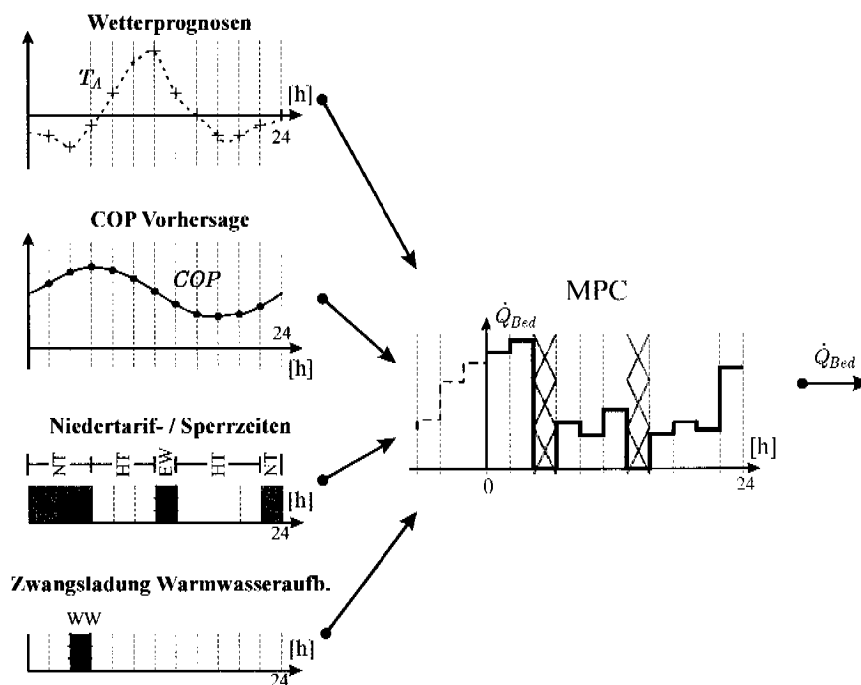


Abb. 4.2: Optimierung der Gebäudeheizung mit MPC.

Das Minimieren des Gütekriteriums (Gl. 4.1) unter Einhaltung der Randbedingungen (Gl. 4.4)-(Gl. 4.5) entspricht einer Optimierung mit einem endlichen Zeithorizont ((Gl. 4.6)-(Gl. 4.8)), d.h. der Regler nimmt an, dass nach 24 Stunden die Regelungsaufgabe beendet ist und die Raumtemperatur nicht mehr geregelt werden muss. Als Folge werden ungenaue Vorhersagen des effektiven Wärmeleistungsbedarfes am Ende des Vorhersagehorizonts ge-

schätzt. Um das Problem zu beseitigen, sollen die Endwerte der Führungsgrösse  $w_N$  und der Matrix  $U_N$  so modifiziert werden, dass die Raumtemperaturregelung nach dem Zeithorizont auch berücksichtigt wird. Wenn folgendes MPC-Problem mit unendlichem Zeithorizont betrachtet wird:

$$J(\dot{Q}_{Bed}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \{ R_k \cdot \dot{Q}_{Bed,k}^2 + (T_{R,k} - T_{Rsoll,k})^2 \} + \frac{1}{2} \sum_{i=N+1}^{\infty} \{ R_i \cdot \dot{Q}_{Bed,i}^2 + (T_{R,i} - T_{Rsoll,i})^2 \}, \quad (\text{Gl. 4.9})$$

kann die Modifikation der Endwerte  $w_N$  und  $U_N$  als Berücksichtigung des zweiten Terms in (Gl. 4.9) interpretiert werden. Eine Möglichkeit, um diese Endwerte anzunähern, besteht darin, die Lösung  $w_{\infty}$  und  $U_{\infty}$  im statischen Fall als Endwert von  $w_N$  und  $U_N$  zu wählen. In diesem Fall muss jedoch die Lösung der stationären Matrix-Riccati Gleichung berechnet werden. Andernfalls können  $w_N$  und  $U_N$  gleich  $w_1$  und  $U_1$  des vorherigen Tages gewählt werden, wenn angenommen wird, dass die Bedingungen nach dem Zeithorizont gleich wie im vorherigen Tag bleiben. Somit werden auch die Tageschwankungen (Aussenlufttemperatur, Niedertarifzeit) in  $w_N$  und  $U_N$  berücksichtigt.

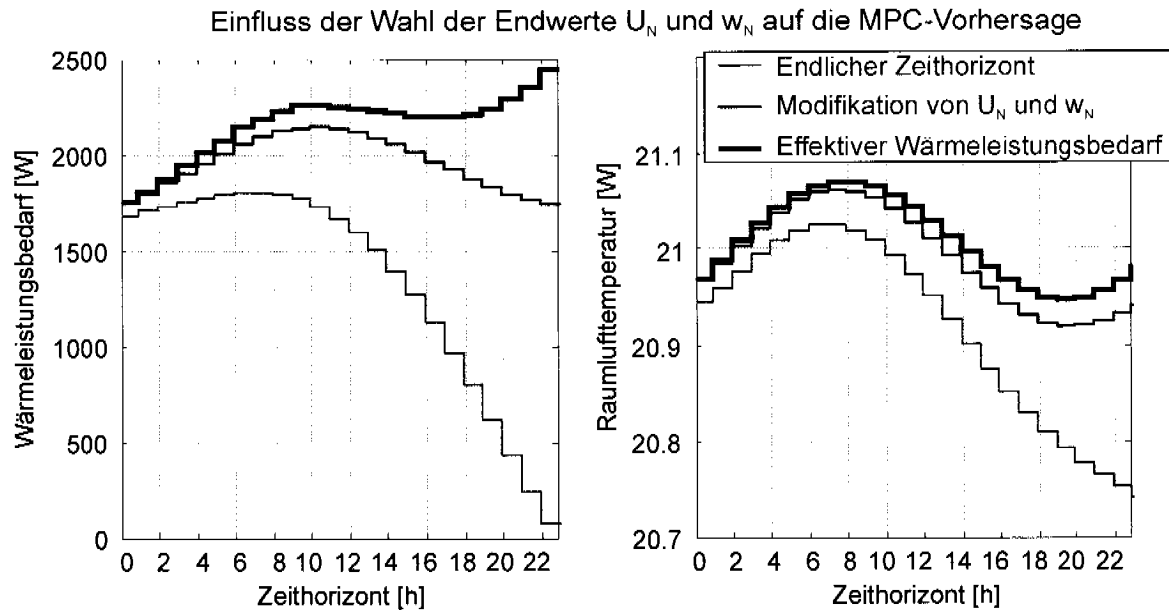


Abb. 4.3: Verbesserung der Vorhersage des Verlaufs Wärmeleistungsbedarf (links) und Raumtemperaturverlauf (rechts) innerhalb des Zeithorizonts mit einer geeigneten Wahl der Endwerte der Matrix  $U_N$  und der Führungsgrösse  $w_N$ .

Die Abb. 4.3 zeigt die Resultate der Vorhersage des Wärmebedarfsverlaufs und der Raumtemperaturverlaufs des MPC-Problems mit endlichem Zeithorizont aus (Gl. 4.6)-(Gl. 4.8) (graue Kurve) und mit der Modifikation von  $w_N$  und  $U_N$  (schwarze dünne Kurve). Als Vergleich sind die effektiven Verläufe der abgegebenen Wärmeleistung und Raumtemperatur gezeigt. Die Vorhersagen der modifizierten Version des MPC-Reglers stimmen mit den effektiven Verläufen besser überein, da die Heizung des Gebäudes auch nach dem Zeithorizont betrachtet wird. Hingegen kümmert sich der konventionelle MPC-Regler mit endlichem Zeithorizont nicht über die Raumtemperatur nach dem Zeithorizont und liefert ungenauere Vorhersagen. Dieses Problem kann zu falschen Approximationen des momentanen Wärmebedarfs und im allgemeinen zu tieferen Raumtemperaturverläufen führen.

Eine weitere interessante Untersuchung über den MPC-Regler ist die Analyse des statischen Nachlauffehlers im stationären Fall. Dafür wird die statische Raumtemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur und der Wärmepumpenleistung aus (Gl. 4.4) und (Gl. 4.5) berechnet:

$$T_{R,\infty} = \frac{1}{\kappa_G} \cdot \dot{Q}_{WP,\infty} + T_{A,\infty}. \quad (\text{Gl. 4.10})$$

Die statische Übertragung des Gebäudemodells wird im MPC-Problem durch Einsetzen von (Gl. 4.10) in die zu minimierende Verlustfunktion in (Gl. 4.9) betrachtet. Die optimale Lösung wird gefunden, indem die Ableitung von  $J(\dot{Q}_{Bed})$  gleich Null gesetzt und bezüglich dem gesuchten Wärmeleistungsbedarf gelöst wird:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{d(\dot{Q}_{Bed})} \stackrel{!}{=} 0 &= 2 \cdot R_k \cdot \dot{Q}_{Bed,\infty} - \frac{2}{\kappa_G} \left( T_{Rsol,\infty} - \left( \frac{1}{\kappa_G} \cdot \dot{Q}_{Bed,\infty} + T_{A,\infty} \right) \right) \\ \dot{Q}_{WP,\infty} &= \frac{\kappa_G}{R_\infty \cdot \kappa_G^2 + 1} (T_{Rsol,\infty} - T_{A,\infty}). \end{aligned} \quad (\text{Gl. 4.11})$$

Einsetzen von (Gl. 4.11) in (Gl. 4.10) liefert die effektive Raumtemperatur mit MPC im statischen Fall als Funktion der konstanten Gewichtung  $R_\infty$  und der Aussenlufttemperatur:

$$T_{R,\infty} = \frac{1}{R_\infty \cdot \kappa_G^2 + 1} \cdot T_{Rsol,\infty} + \left( 1 - \frac{1}{R_\infty \cdot \kappa_G^2 + 1} \right) \cdot T_{A,\infty}. \quad (\text{Gl. 4.12})$$



Um den statischen Nachlauffehler in der Raumtemperaturregelung klein und konstant zu halten, sollte die Gewichtung  $R_\infty$  genügend klein und in Abhängigkeit der mittleren Aussenlufttemperatur gewählt werden. Hier wird jedoch die Abhängigkeit des statischen Raumtemperaturfehlers mit der Aussenlufttemperatur vernachlässigt.

### 4.1.2 Wettervorhersage

Die Optimierung mit der modellbasierten prädiktiven Regelung benötigt die Vorhersage der Aussenlufttemperatur, um eine genaue Schätzung des Wärmebedarfs liefern zu können. Am einfachsten werden die Prognosen intern im Wärmepumpenregler hergestellt. Eine mögliche Variante ist es, das Profil des Aussentemperaturverlaufs des vorherigen Tages zu übernehmen und um die gemessene momentane Temperatur zu korrigieren [34, 39]. Die Aussentemperaturvorhersage kann bei dieser Methode mit folgender Gleichung geschätzt werden:

$$T_{A,k} = T_{A,(k-24h)} + T_{A,0} - T_{A,-24h} \quad \text{für } k = 0 \dots 24h \quad (\text{Gl. 4.13})$$

Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine Kenntnis des Wettermodells nötig ist und keine zusätzlichen Messungen notwendig sind. Allerdings kann mit der einfachen Prognosemethode in (Gl. 4.13) ein Wetterumschlag nicht vorhergesagt werden und im allgemeinen kann bei grossen Veränderungen des Tagesprofils der Aussenlufttemperatur die Vorhersage auch sehr schlecht werden.

#### 4.1.2.1 Wetterprognose mit MeteoSchweiz

Genauere Wettervorhersagen können von einer externen Wetterstation abgerufen werden. Das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz ist für die Herstellung der Wetterprognosen in der Schweiz verantwortlich. Die Vorhersagen der Aussenlufttemperatur werden bei MeteoSchweiz anhand des Alpine-Modells (aLMo) berechnet [8]. Dieses Modell liefert zweimal täglich alle meteorologischen Parameter bis 72 Stunden im voraus mit einer Maschenweite von 7x7 km auf einem Gebiet, das ganz West- und Mitteleuropa abdeckt. Um die Daten herunterzuladen, braucht der Wärmepumpenregler eine TCP/IP-Schnittstelle, die den Zugriff auf die Daten im Netz ermöglicht.

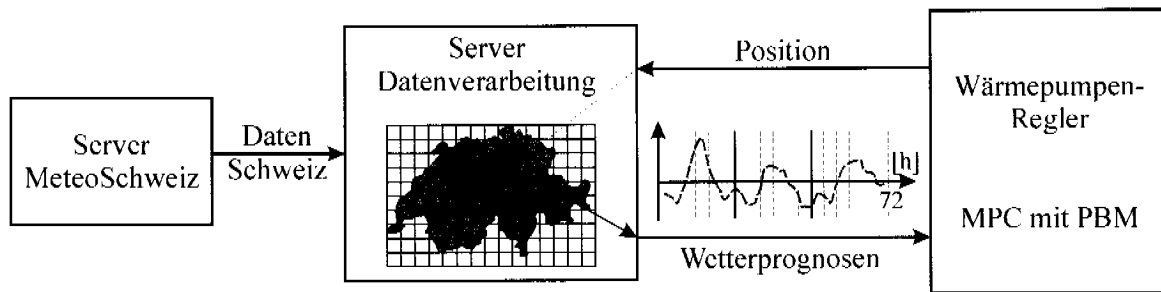


Abb. 4.4: Konzept der Schnittstelle für das Herunterladen der Wetterprognose von MeteoSchweiz.

Wie Abb. 4.4 zeigt, stellt der MeteoSchweiz-Server den Datensatz für die ganze Schweiz einem externen Server zur Verfügung, sobald die neuen Prognosen vorhanden sind. Auf diesem Rechner werden die lokalen Daten für jeden Gitterpunkt vorbereitet. Der Wärmepumpenregler kann durch einen Zugriff auf diesen Server die lokalen Prognosedaten herunterladen. Die direkte Kommunikation zwischen einem Wärmepumpenregler und dem MeteoSchweiz-Server ist noch nicht möglich, da die Protokolle für die interaktive Abfrage der lokalen Prognosedaten auf dem MeteoSchweiz-Server noch nicht existieren.

Der MPC-Regler überprüft mehrmals am Tag, ob neue Prognosedaten auf dem Server vorhanden sind. Die Aussentemperaturvorhersagen werden um die gemessene Aussentemperatur korrigiert, um die lokalen Effekte innerhalb des 7x7 km-Intervalls zu korrigieren. Ein fehlender Datensatz von MeteoSchweiz oder ein Netzunterbruch wird vom Regler erkannt und robust behandelt, indem innerhalb der nächsten 72 Stunden die alte MeteoSchweiz-Prognose verwendet wird und danach der MPC-Regler auf die herkömmliche Vorhersagemethode in (Gl. 4.13) umschaltet. Sobald die Störung behoben ist und die MeteoSchweiz-Prognosen wieder vorhanden sind, werden sie vom MPC-Regler wieder verwendet.

Die Gebühren für die Vorhersagedaten sollen von den einzelnen Kunden oder vom Wärmepumpenregler-Hersteller übernommen werden. Die aktuellen Kosten betragen ungefähr 650 CHF pro Jahr für die lokalen Aussentemperaturprognosen und ungefähr 12'000 CHF pro Jahr für alle Gitterpunkte über die Schweiz. Leider sind diese Kosten zu hoch, um anhand des MPC-Reglers in einer Kleinwärmepumpenanlage Geld sparen zu können. Für einen kommerziellen Einsatz des MPC-Reglers sollten deshalb andere Lösungsvarianten gefunden werden.

### 4.1.3 COP-Vorhersage

Die Vorhersage der Wärmepumpenleistungszahl (COP) ist erforderlich, wenn die Minimierung des elektrischen Energieverbrauchs neben der Raumtemperaturregelung erwünscht ist (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Minimierung des Wärmeleistungsbedarfs anstatt der elektrischen Energie (ohne Berücksichtigung des COP im Gütekriterium von Gl. 4.1) ist nicht sinnvoll, da dieses proportional zum Raumtemperatursollwert ist (Gl. 4.10). Die Nicht-Berücksichtigung des COP im Gütekriterium würde somit nur einen statischen Nachlauffehler der Raumtemperatur verursachen. Die Vorhersage kann anhand der Wärmepumpenkennlinie durchgeführt werden, welche von der Temperatur der Wärmequelle und des Heizwassers abhängt.

#### 4.1.3.1 Luft/Wasser-Wärmepumpe

Bei diesem Wärmepumpentyp ist der COP hauptsächlich von der Lufttemperatur abhängig (vgl. Anhang B.1). Dessen Vorhersage kann somit anhand der Aussenlufttemperaturprognosen bestimmt werden [39]. Die Schätzung der Wärmeleistung bzw. der elektrischen Leistung für die Berechnung des COP wird anhand der Wärmepumpenkennlinie des Herstellers bestimmt (Abb. 4.5). Der Nachteil bei diesem Wärmepumpentyp ist, dass der COP höher ist, wenn das Gebäude weniger Wärme braucht (da Aussen wärmer ist). Bei den trägen Wärmeabgabesystemen (z.B. Gebäude mit Fussbodenheizung oder Zwischenspeicher im Heizkreislauf) kann jedoch der höhere COP bei hohen Aussenlufttemperaturen besser ausgenutzt werden, so dass der Raumtemperaturkomfort wenig oder kaum bestraft wird.

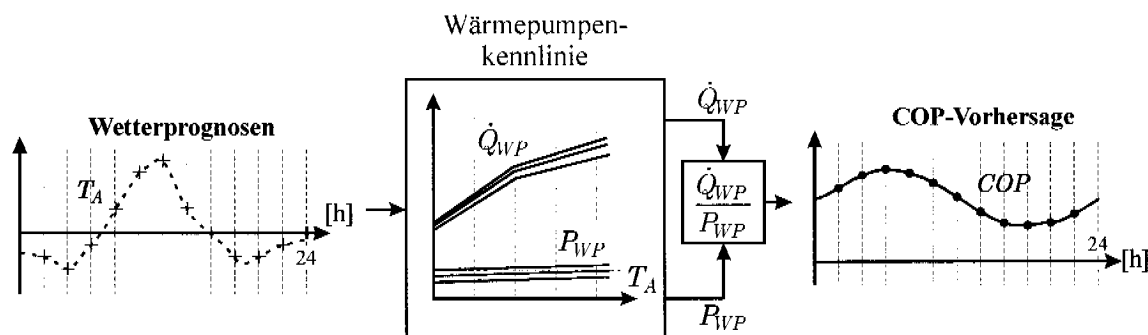


Abb. 4.5: Vorhersage des COP-Verlaufs für Luft/Wasser-Wärmepumpen.

#### 4.1.3.2 Sole/Wasser-Wärmepumpe

Die Vorhersage des COP-Verlaufs bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist schwieriger, da der COP wiederum vom Verlauf des Wärmebedarfs abhängig ist, welcher vom MPC-Algorithmus geschätzt wird. Wie mit der Luft/Wasser-Wärmepumpe (vgl. Abb. 4.5) wird der COP anhand der Wärmepumpenkennlinie bestimmt (als Funktion der Soletemperatur anstatt der Aussenlufttemperatur). Um den Verlauf der Soletemperatur einfach vorherzusagen, wird (wie bei der Aussentemperaturvorhersage) das Soletemperaturprofil der vorhergehenden 24 Stunden übernommen und um den Temperaturfehler verschoben. So können die Effekte der Niedertarifzeiten auf den Soletemperaturverlauf besser betrachtet werden.

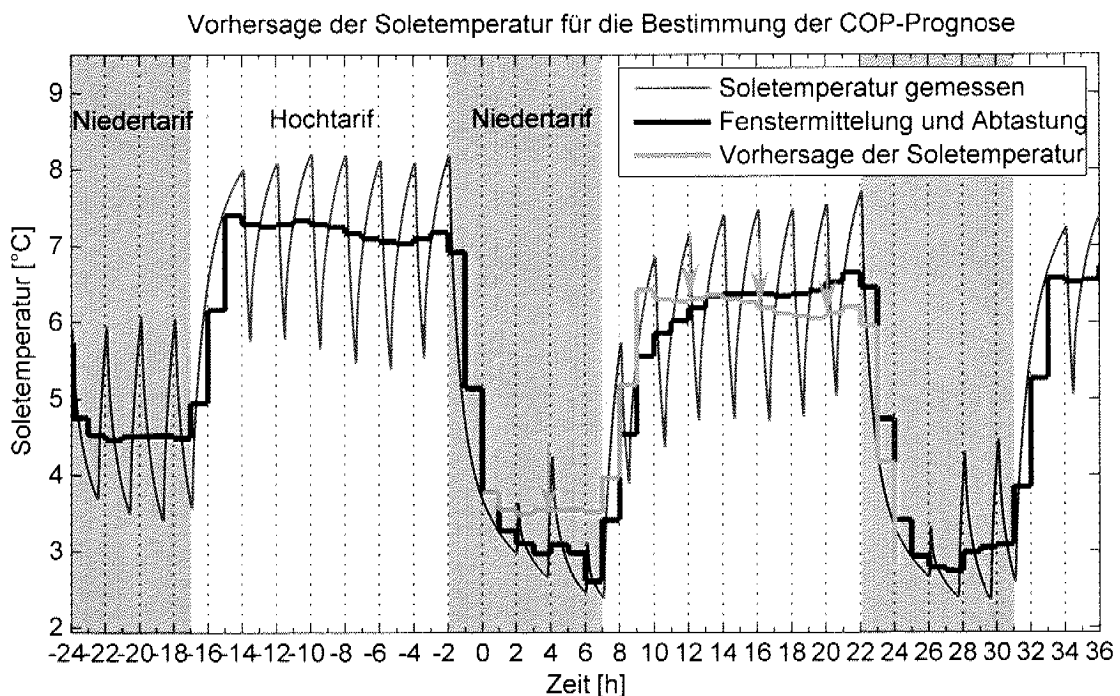


Abb. 4.6: Vorhersage der Soletemperatur bei Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Berücksichtigung der Niedertarifzeiten.

Die Abb. 4.6 zeigt die Vorhersagemethode der Soletemperatur. Die gemessene Soletemperatur wird mittels einer Zwei-Stunden-Fenstermittlung (entspricht der Pulsbreite  $t_{PB}$ ) gemittelt und mit der Reglerabtastzeit  $t_{S,MPC}$  (1 Stunde) abgetastet. Das Profil der Prognose passt gut zum effektiven Temperaturverlauf, insbesondere werden die höheren Soletemperaturen in der Hochtarifzeit berücksichtigt.

#### 4.1.4 Pulsbreitenmodulation

Für die Ansteuerung der Wärmepumpe muss der momentane Wärmeleistungsbedarf in ein Ein/Ausschaltsignal für die Wärmepumpe umgeformt werden. Das Ziel ist, die Dauer der Heizpulse der Wärmepumpe so zu bestimmen, dass die Arbeitszahl der Wärmepumpe optimal wird. Für diesen Zweck wird das Konzept der Pulsbreitenmodulation verwendet [34, 39]. Für die Regelung der Gebäudeheizung wird die zeitinvariante Pulsbreitenmodulation gewählt (Abb. 4.7), d.h. die Pulsbreite  $t_{PB}$  bleibt konstant. Am Anfang jedes Pulses wird der Wärmebedarf  $Q_{Bed,PB}$  für die Periodendauer  $t_{PB}$  mit MPC bestimmt. Da die Pulsbreite 2- bis 4-mal grösser als die Abtastzeit des MPC-Reglers ist, muss die Vorhersage des Wärmebedarfs  $Q_{Bed,MPC}$  bis am Ende des Pulses bestimmt werden. Dafür wird (Gl. 4.6) vorwärts integriert, die Vorhersage des Zustandsvektors  $x$  wird anhand des Simulationsmodells in (Gl. 4.4) mit (Gl. 4.5) bestimmt. Der Heizpuls wird dann solange gefahren, bis die notwendige Wärme  $Q_{Bed,PB}$  geliefert wird. Bis zum nächsten Puls bleibt dann die Wärmepumpe ausgeschaltet. Die Schätzung der gelieferten Wärme  $Q_{Isl,PB}$  erfolgt durch Integration der Wärmepumpenleistung.

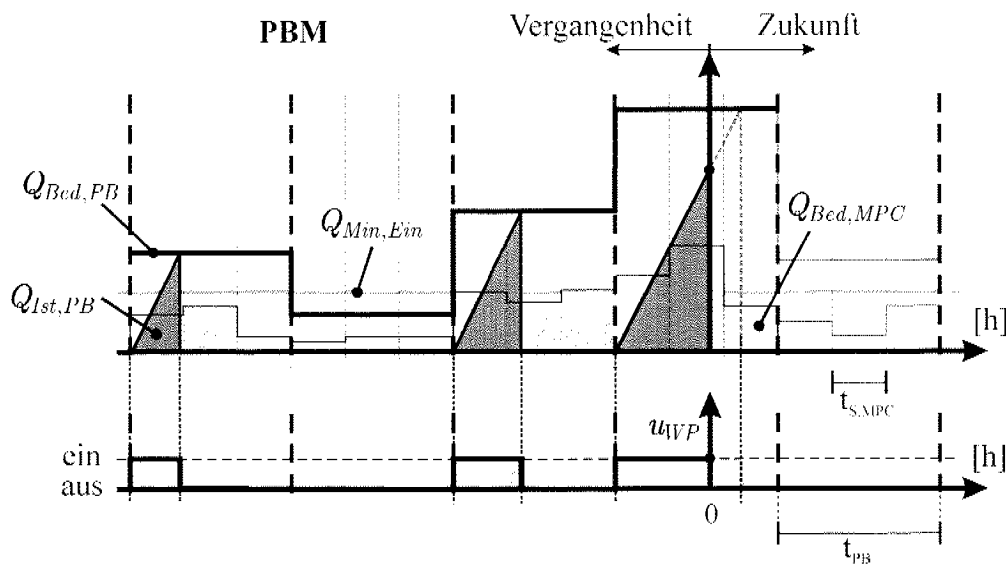


Abb. 4.7: Konzept der Pulsbreitenmodulation für die Gebäudeheizung. Der vom MPC bestimmte Wärmebedarf wird anhand der Pulsbreitenmodulation in Wärmepaketen an das Hausinnere abgegeben.

Die Untersuchungen in [39] zeigen, dass die Arbeitszahl bei Luft/Wasser-Wärmepumpen nach 30-60 Minuten maximal ist und dann ungefähr konstant bleibt (sinkt ein wenig wegen der Erhöhung der Heizwassertemperatur). Die Luft/Wasser-Wärmepumpe sollte deshalb bei jedem Heizpuls mehr als 30 Minuten eingeschaltet bleiben, um eine gute Arbeitszahl zu gewährleisten.

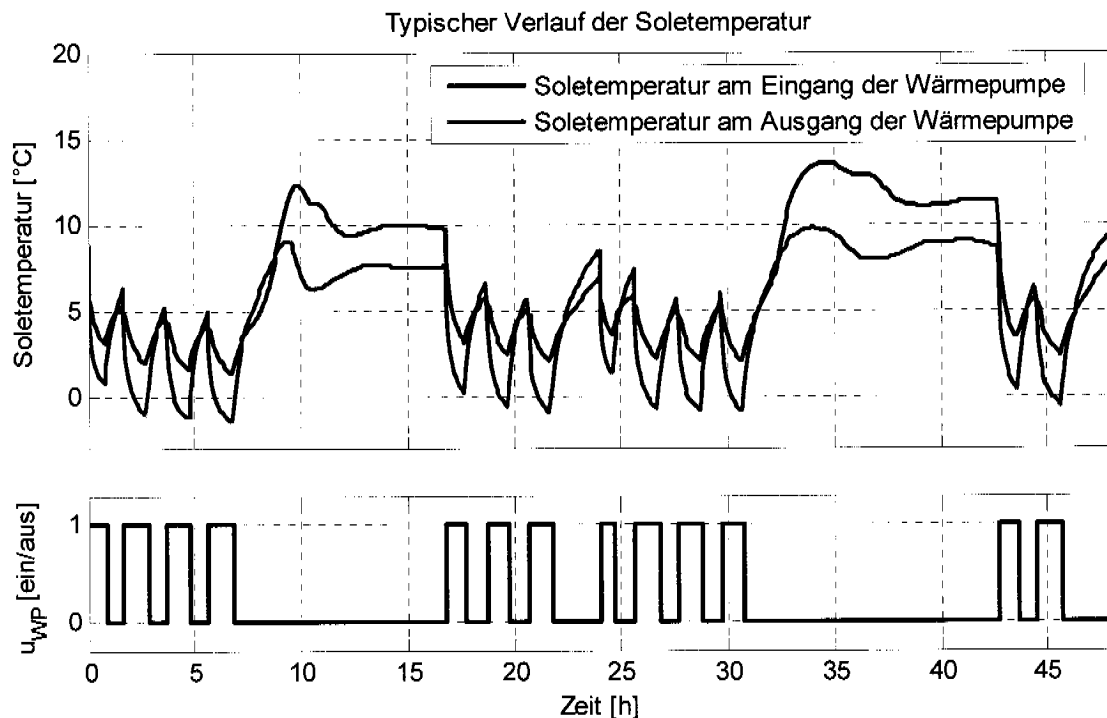


Abb. 4.8: Messung eines realen Soletemperaturverlaufs und Abhängigkeit bezüglich des Wärmepumpenzustands.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen (vgl. Kennlinie in Anhang B.2) ist die Arbeitszahl hauptsächlich von der Soletemperatur abhängig. Die Soletemperatur sinkt beim Einschalten der Wärmepumpe relativ schnell (vgl. Abb. 4.8 und Abschnitt 6.4.3), da die Trägheit der Erdsonde grösser als diejenige der Wärmepumpe ist. Es muss deshalb abgeklärt werden, welchen Einfluss (neben der Einschaltdynamik) die Belastung der Erdwärmesonde auf die Optimierung der Arbeitszahl hat. Der Vergleich der effektiven Arbeitszahl der Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Pulsbreiten wurde am Prüfstand mit einer Emulation des Erdwärmesonden-Verhaltens (vgl. Kapitel 6 und Simulationsmodell der Erdwärmesonde in Abschnitt 6.4.3) durchgeführt. Die Resultate sind in Abb. 4.9 dargestellt. Dabei wurden nur die Messungen nach der Einschwingperiode der Erdwärmesonde berücksichtigt und es wurde sicher-

gestellt, dass für jeden Versuch die gleiche mittlere Wärmemenge geliefert wurde. Die Resultate zeigen, dass die gesamte Arbeitszahl der Sole/Wasser-Wärmepumpe nicht von der Pulsbreite abhängig ist. Die Begründung dafür ist, dass bei grösseren Pulsbreiten zwar die Soletemperatur tiefer sinkt, sich aber die Erdsonde dann auch länger erholen kann. Die Abb. 4.9 zeigt, dass mit einer grösseren Pulsbreite die Arbeitszahl nach dem Einschalten der Wärmepumpe tatsächlich höhere Werte erreicht, sich jedoch am Ende des Heizpulses der Arbeitszahl der Versuche mit kleinerer Pulsbreite nähert. Ähnlich der Luft/Wasser-Wärmepumpen wird bei Sole/Wasser-Wärmepumpen eine längere Periodendauer  $t_{PB}$  für die Pulsbreitenmodulation bevorzugt, so dass im Mittel längere Heizpulse gefahren werden.

Um bei Luft/Wasser- bzw. Sole/Wasser-Wärmepumpen schlechte Arbeitszahlen wegen der Einschaltdynamik zu vermeiden, wird eine minimale Grenze  $Q_{Min, Ein}$  für den Wärmesollwert  $Q_{Bed, PB}$  definiert (vgl. Abb. 4.7). Wenn der geschätzte Wärmebedarf  $Q_{Bed, PB}$  kleiner als die minimale Wärmemenge  $Q_{Min, Ein}$  ist, wird die Wärmepumpe nicht eingeschaltet.

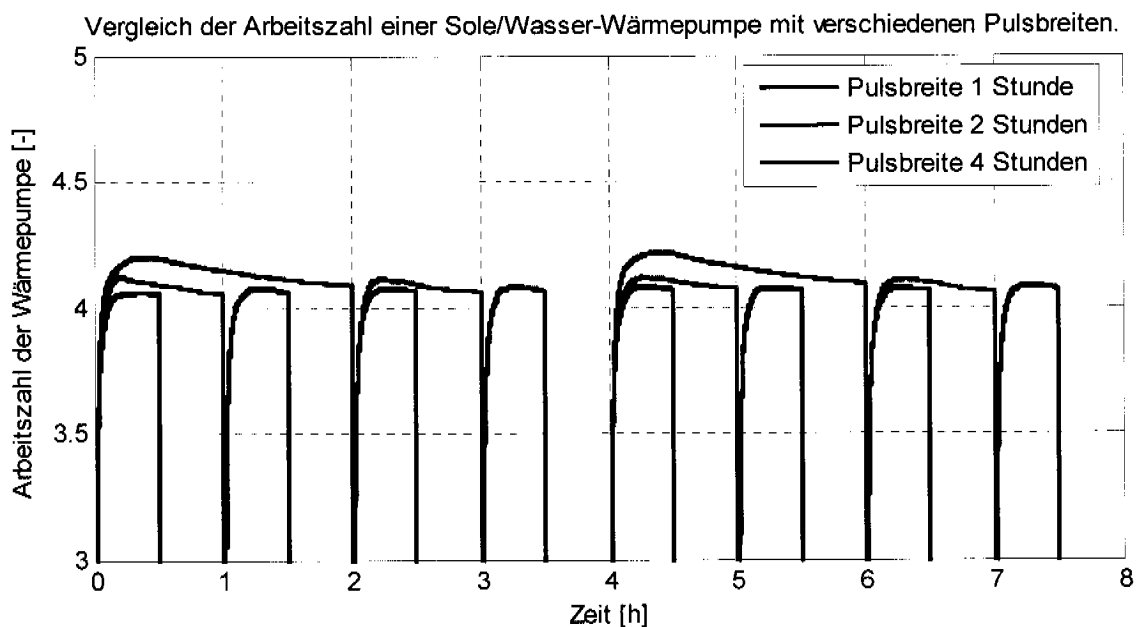


Abb. 4.9: Messung der Wärmepumpenarbeitszahl (Sole/Wasser) anhand einer Emulation am Prüfstand. Das Verhalten der Erdwärmesonde wurde mit dem Modell in Abschnitt 6.4.3 emuliert.

## 4.2 Warmwasseraufbereitung

Oft wird in Einfamilienhäusern die Wärmepumpe auch für die Trinkwassererwärmung eingesetzt. Auf dem Markt werden verschiedene hydraulische Schaltungen für die Warmwasseraufbereitung angeboten. Mögliche Kriterien für die Wahl des Schaltungstyps sind der Grad des Trinkwasserschutzes, die Wärmeverluste bzw. die Optimalität der Wärmeabgabe, die Art des Heizungssystems der Kombianlage, der benötigte Platz für die Installation und die Kosten. Offensichtlich muss das Regelungskonzept für die Warmwasseraufbereitung bzw. Kombianlageheizung entsprechend dem gewählten Konstruktionstyp angepasst werden. Um das Warmwasser und eine optimale Heizung des Speichers zu gewährleisten, ist die horizontale Schichtung des Warmwassers im Speicher wichtig. Dafür wird die hydraulische Schaltung so gewählt, dass das Warmwasser im Speicher möglichst wenig gemischt wird. Als Hauptziel für die Warmwasseraufbereitung soll das Warmwasser jederzeit gewährleistet werden. Eine weitere Forderung ist die Vermeidung von Problemen mit Legionellen. Ferner soll die Warmwasseraufbereitung mit einer möglichst guten Wärmepumpenarbeitszahl erfolgen und eine möglichst hohe Warmwassertemperatur mit der Wärmepumpe erreicht werden.

In diesem Abschnitt wird die Heizungsregelung eines Speichers mit externem Wärmetauscher untersucht, welcher mit gewöhnlichen Wärmepumpen mit einem einzelnen Verflüssiger betrieben werden kann. Diese Schaltung und andere Vorschläge werden in Abschnitt 4.2.1 vorgestellt. Die Sensoren sollen so positioniert werden, dass einerseits immer Warmwasser gewährleistet wird und andererseits nach der Heizung eine möglichst hohe Warmwassertemperatur erreicht werden kann. Im Abschnitt 4.2.2 wird deren Positionierung diskutiert. Das Regelkonzept für die Warmwasseraufbereitung wird hingegen im Abschnitt 4.2.3 untersucht. Das gewählte Konzept entspricht einem einfachen Zwei-Punkt-Regler, wobei durch Variieren der Soll-Einschalttemperatur und durch Einführen einer Zwangsladung pro Tag die Speicherladungen (wenn möglich) in die Niedertarifzeit verschoben werden.

### 4.2.1 Hydraulische Schaltung für die Warmwasseraufbereitung

Grundsätzlich existieren zwei Möglichkeiten für die Heizungsregelung einer Kombianlage [4, 44]. Die erste Lösungsvariante ermöglicht die parallele Regelung der Warmwasseraufbereitung und der Gebäudeheizung. Dafür wird



aber eine Wärmepumpe mit zwei oder mehreren Verflüssigern benötigt, da die Temperatur des Heizwassers für den Kreislauf der Gebäudeheizung deutlich tiefer ist. Die zweite Möglichkeit, auf welche sich dieser Abschnitt beschränkt und auf der die Standardschaltung (STASCH) [11] basiert, ist die alternative Regelung der Trinkwassererwärmung und der Gebäudeheizung. In diesem Fall genügt eine Wärmepumpe mit einem einzigen Verflüssiger. Aus hygienischen Gründen darf jedoch das Heizwasser mit dem Warmwasser nicht gemischt werden. So ist bei einer solchen Lösungsvariante ein Wärmetauscher für die Wärmeübertragung von der Wärmepumpe in den Speicher erforderlich. Zwei übliche Schaltungen sind in Abb. 4.10 dargestellt. Mit einem externen Wärmetauscher (linke Abbildung) wird das Warmwasser normalerweise am unteren Teil des Speichers (wo die Temperatur tiefer ist) abgezapft, die Wärme wird anhand eines Plattenwärmetauschers ins Warmwasser übertragen und in den oberen Teil des Speichers eingespritzt. Mit einem internen Wärmetauscher findet hingegen die Wärmeübertragung anhand eines Glattrohres direkt im Speicher statt.

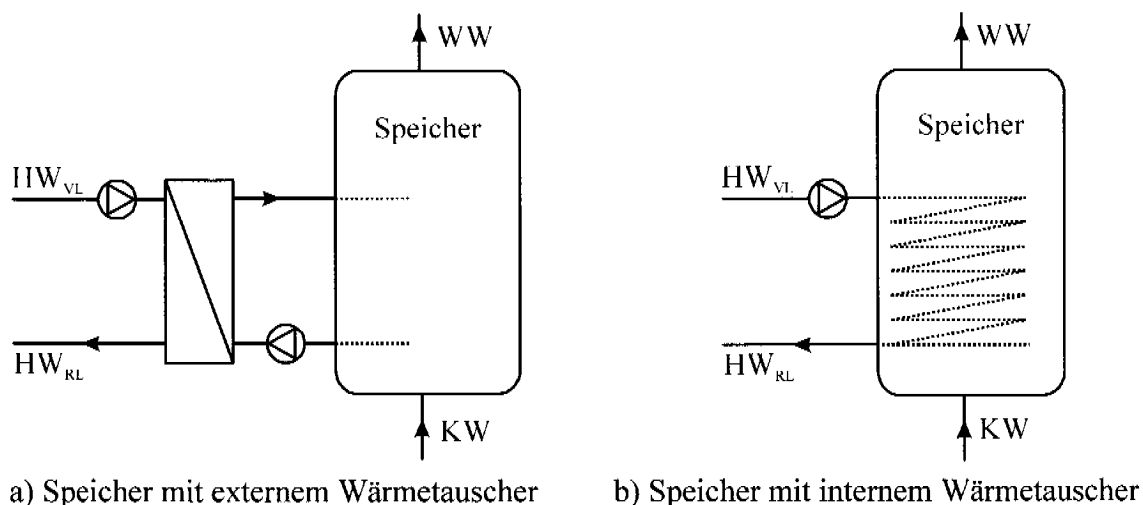


Abb. 4.10: Mögliche hydraulische Schaltungen für die Speicherheizung mit Wärmepumpen mit einem einzigen Verflüssiger.

Die Wahl eines Speichers mit externem Wärmetauscher bietet den Vorteil, dass die Wärmeleitfähigkeit grösser sein kann, da die Wärmetauscherfläche beliebig gross gewählt werden kann. Hingegen ist beim innenliegenden Wärmetauscher die Tauscherfläche durch das Speichervolumen begrenzt. Mit einem internen Wärmetauscher ist jedoch eine bessere Schichtladung möglich, da bei der Warmwasserladung das Warmwasser nicht gemischt wird.

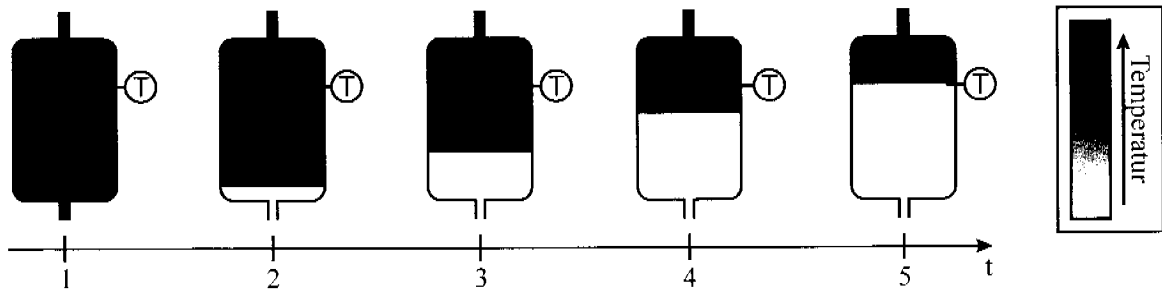


Abb. 4.11: Schichtentladung des Speichers.

Um eine maximale konstante Temperatur des Warmwassers am Austritt des Speichers zu gewährleisten, ist eine Temperatschichtung im Speicher notwendig. Bei einer Entladung soll deshalb das Kaltwasser vom Warmwasser durch eine horizontale Schicht getrennt bleiben. Dieses Ziel wird erreicht, wenn das Warmwasser im Speicher nicht stark gemischt wird. Das Prinzip der Schichtentladung ist in Abb. 4.11 veranschaulicht. Das Einschaltsignal für die Wärmepumpe wird normalerweise von einem Temperatursensor auf einer bestimmten Höhe des Speichers bestimmt. Wenn das kalte Wasser dieses Niveau überschreitet, wird der Speicher geheizt (Zeitpunkt 5 in Abb. 4.11). In Abb. 4.12 ist die Schichtentladung in einem realen Speicher bei einem realen Warmwasserverbrauch gezeigt.

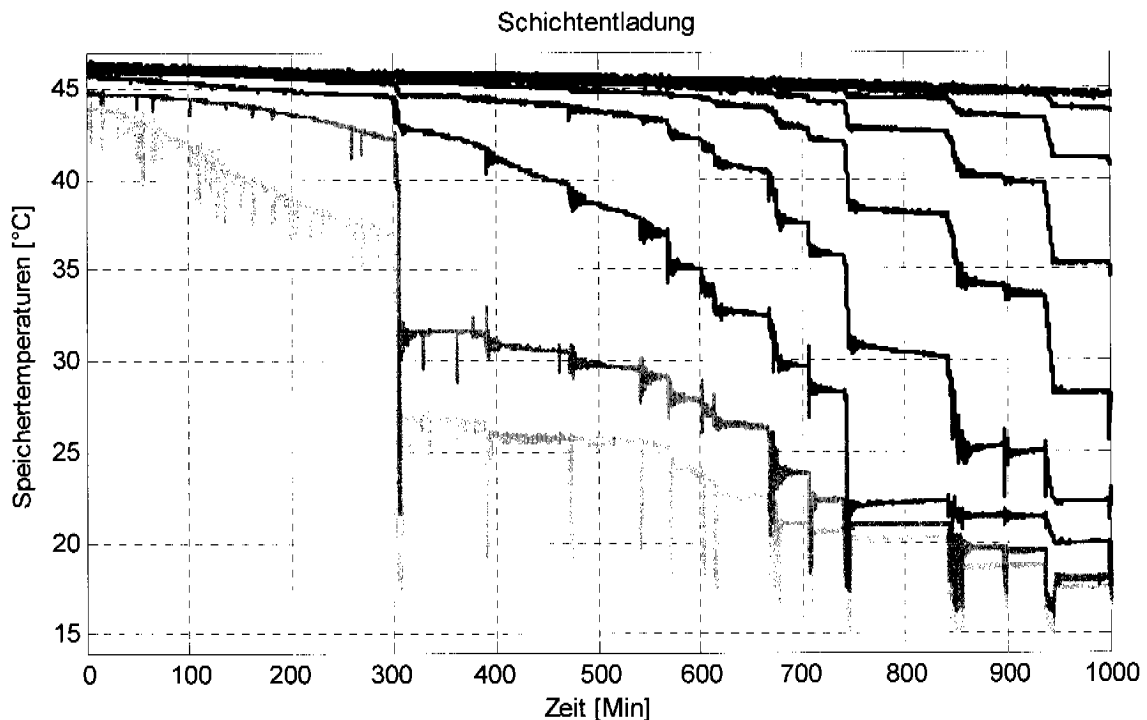


Abb. 4.12: Schichtentladung in einem realen Speicher. Die Temperaturen wurden auf 10 Speicherhöhen erfasst.

Wie bereits erwähnt, ist beim innenliegenden Wärmetauscher eine gute Schichtladung möglich, da das Warmwasser nicht gemischt wird. Das Prinzip ist in Abb. 4.13 dargestellt. Zum Zeitpunkt 1 wird die Wärmepumpe eingeschaltet, und zum Zeitpunkt 5 ist die Warmwasseraufbereitung abgeschlossen. Die Warmwasseraufbereitung mit dieser Hydraulikschaltung erfolgt mit einer guten Arbeitszahl, da die Heizwassertemperatur vor dem Wärmepumpen-Verflüssiger tief gehalten wird.

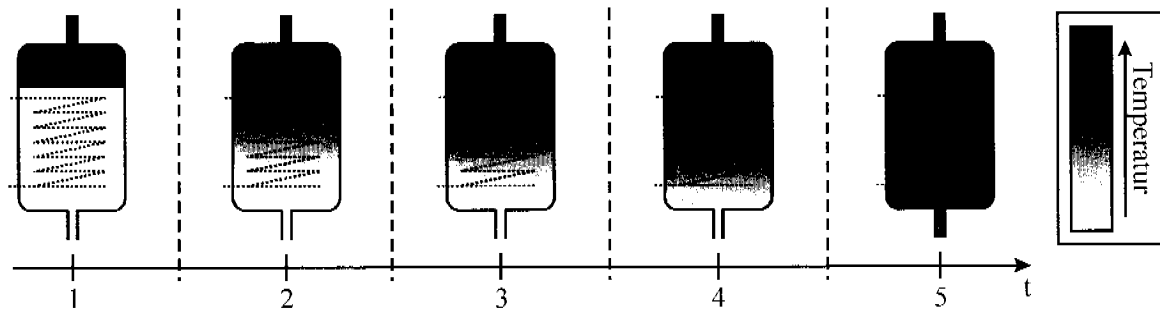


Abb. 4.13: Schichtladung beim Speicher mit innenliegendem Wärmetauscher (Glattrohr).

Die Schichtung in einem Speicher mit externem Wärmetauscher ist schwieriger, da während der Erwärmung das Warmwasser im Speicher zirkuliert. Wichtig ist es, dass während der Warmwasserladung die Schichtung nicht gestört wird, welche bei der Entladung geschaffen wurde. Eine mögliche Lösungsvariante ist die Stufenladung, deren Konzept in Abb. 4.14 dargestellt ist. Das geheizte Wasser wird normalerweise in der Speichermitte nach unten eingespritzt, somit wird die untere Hälfte des Speichers stufenweise geheizt, ohne dass die obere Speicherhälfte gestört wird. Dafür wird ein Sprührohr eingesetzt, so dass die Eintrittsgeschwindigkeit des Warmwassers in den Speicher genügend gebremst wird.

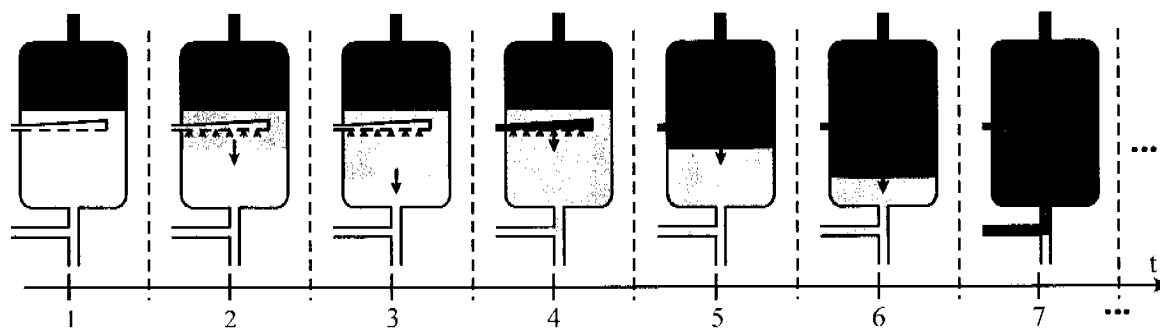


Abb. 4.14: Stufenladung eines Speichers mit externem Plattenwärmetauscher.

Wie Abb. 4.14 veranschaulicht, wird zum Zeitpunkt 1 die Wärmepumpe eingeschaltet; am Ende der ersten Stufenladung (Zeitpunkt 4) erhöhen sich die Heizwassertemperaturen sprunghaft und die zweite Stufenladung beginnt. Dieses Vorgehen wiederholt sich bis der Speicher warm ist. Die sprunghafte Änderung der Temperaturen wird jedoch mit der Zeit wegen der Trägheit der Hydraulikschaltung abgeschwächt, so dass am Ende der Stufenladung die Temperaturstufen kaum erkennbar sind. In Abb. 4.15 sind die gemessenen Speichertemperaturen bei der Stufenladung eines realen Speichers dargestellt. Die ersten zwei Stufen sind klar erkennbar.

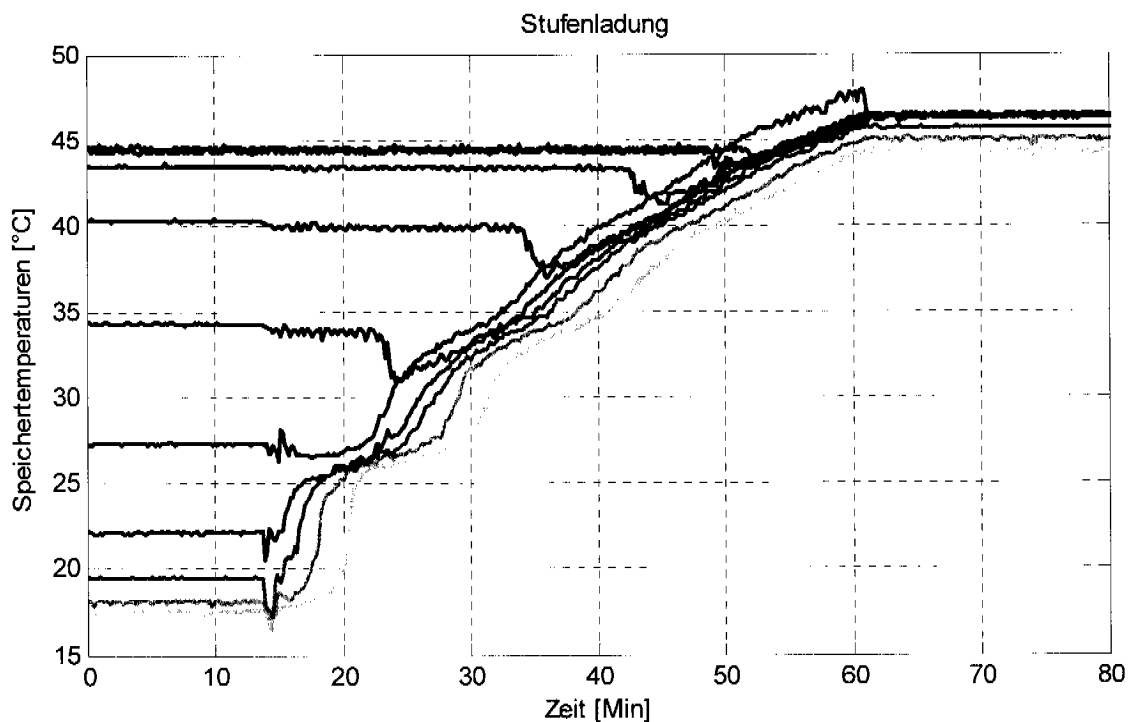


Abb. 4.15: Stufenladung in einem realen Speicher. Erfassung der Temperaturen auf 10 Speicherhöhen. Am Ende des Ladedurchgangs ist die Stufenladung abgeschwächt.

Ferner wird für die Dimensionierung und Regelung nur die Variante des Speichers mit externem Wärmetauscher in Abb. 4.10 links und in Abb. 4.14 berücksichtigt. Für die Variante mit innenliegendem Wärmetauscher können jedoch ähnliche Betrachtungen angestellt werden.

#### 4.2.1.1 *Dimensionierung des Speichers mit externem Wärmetauscher*

Im folgenden wird der Speicher mit externem Wärmetauscher für ein Einfamilienhaus dimensioniert (siehe auch [4, 43]). Das Volumen des Speichers wird so berechnet, dass im Mittel genügend Warmwasser für einen Tagesverbrauch zur Verfügung steht, so dass der Speicher ungefähr einmal pro Tag geladen werden muss. Bei einem täglichen Verbrauch von 50 l pro Person deckt eine Kapazität von 300 l den Tagesbedarf von einem Einfamilienhaus mit 6 Personen ab. Dazu sollen noch Speicherverluste von ungefähr 25% berechnet werden. Die gewählte Speicherkapazität beträgt somit 400 l [1, 4].

Weiter muss im Speicher die Bildung von Legionellen vermieden werden. In [30] wird empfohlen, die Speichertemperatur mindestens einmal pro Tag auf 60° C zu bringen und die Wassertemperaturen in den Verteilleitungen auf 50°C zu halten. Diese Vorschrift kann jedoch mit normalen Wärmepumpen nicht eingehalten werden, da die maximale Verflüssigertemperatur normalerweise 55°C beträgt. Mit einer Hochtemperatur-Wärmepumpe oder einen zusätzlichen Elektroheizeinsatz kann diese Forderung erfüllt werden [4].

Für die Auslegung des Wärmeabgabesystems muss beachtet werden, dass einerseits die Temperaturdifferenzen auf der Heizwasserseite (Primärseite) möglichst klein bleiben, damit eine gute Arbeitszahl erreicht wird und andererseits die Eintrittsgeschwindigkeit des Warmwassers in den Speicher unter 0.1 m/s ist, um die Störung der Schichtung zu vermeiden. In [11] wird eine Temperaturdifferenz auf der Primärseite und auf der Sekundärseite des Wärmetauschers von 6 °C und eine Wärmetauscherfläche von 0.15 [m<sup>2</sup>/(kW Heizleistung)] empfohlen. Für das Einfamilienhaus wird ein Gegenstrom-Plattenwärmetauscher mit einer Tauscherfläche von 1.4 m<sup>2</sup> gewählt. Diese Überlegung basiert auf einer idealen Stufenladung, d.h., um zu tiefe Warmwassertemperaturen im letzten Ladedurchgang zu vermeiden, wird eine kleine Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite (Warmwasserseite des Wärmetauschers) gewählt. Die Abb. 4.16 zeigt das Problem des letzten Ladedurchgangs. Wegen der sprunghaften Erhöhung der Temperaturen kann im schlimmsten Fall die Warmwassertemperatur nach dem letzten Ladedurchgang um die Temperaturdifferenz der Sekundärseite tiefer sein. Deswegen wird eine kleine Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite bevorzugt. In der Praxis kommt jedoch mit kleinen Speichern das Problem der letzten Stufenladung nicht vor, da nach den ersten Ladedurchgängen die Temperaturen wegen der Trägheit des Speichers und Mischeffekten konstant wachsen. Die

Temperaturdifferenz auf der Sekundärseite könnte somit auch grösser gehalten werden, mit den Vorteilen, dass eine kleinere Durchflussgeschwindigkeit auf der Sekundärseite gewählt werden kann und eine bessere Übertragungsleistung im Wärmetauscher erreicht wird.

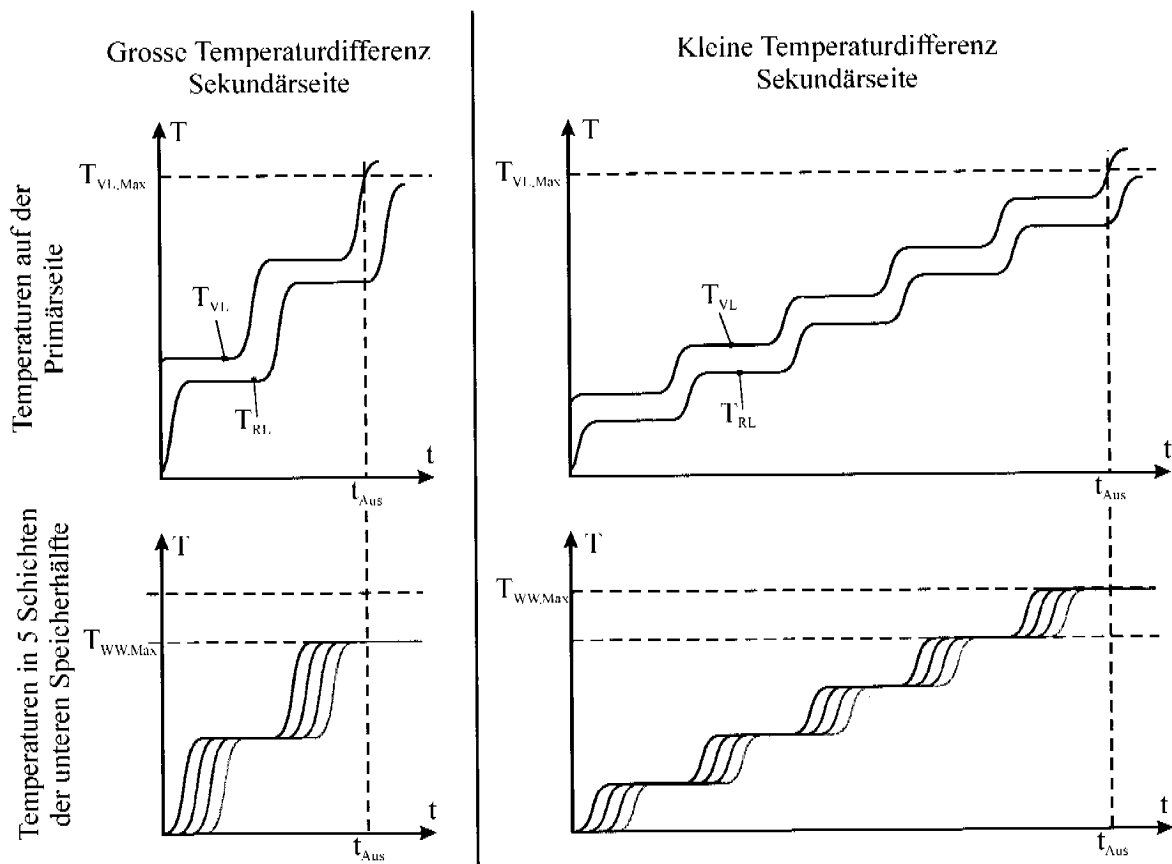


Abb. 4.16: Problem der tieferen Warmwassertemperatur beim letzten Stufenladungsdurchgang (ideale Stufenladung), wenn eine zu grosse Temperaturdifferenz in der Sekundärseite des Wärmetauschers gewählt wird. Mit kleinerer Temperaturdifferenz wird im allgemeinen eine höhere Speichertemperatur erreicht (Bilder rechts).

Das Sprührohr sollte nicht zu hoch im Speicher plaziert werden, damit die Schichtladung im oberen Teil des Speichers nicht gestört wird. Eine vernünftige Höhe ist die Mitte des Speichers.

#### 4.2.2 Wahl und Positionierung der Sensoren für die Regelung

Als Regelkonzept für die Warmwasseraufbereitung wird eine einfache Zweipunkt-Regelung gewählt. Die Sensoren für diese Regelung sollen so plaziert werden, dass einerseits immer Warmwasser gewährleistet wird und anderer-

seits nach der Speicherheizung eine maximale Warmwassertemperatur erreicht wird. Im folgenden wird die optimale Positionierung der Sensoren diskutiert.

Da die Entladung des Speichers schichtweise erfolgt (vgl. Abb. 4.11) ist es sinnvoll, als Einschaltsignal die Temperatur auf einer bestimmten Speicherhöhe zu wählen, damit immer Warmwasser für eine Spitzenleistung im Speicher zur Verfügung steht. Der Einschaltfühler wird auf  $2/3$  der Speicherhöhe platziert (Abb. 4.17), so dass immer eine Reserve von  $1/3$  der Speicherkapazität bleibt. Der Nachteil der Platzierung eines einzigen Einschaltfühlers ist jedoch, dass keine Information über den Verlauf des Warmwasserverbrauchs zur Verfügung steht, bevor  $2/3$  des Warmwassers verbraucht ist. Für eine bessere Optimierung der Einschaltzeit (z.B. Berücksichtigung der Niedertarifzeiten) wäre somit ein zusätzlicher Temperaturfühler auf z.B.  $1/5$  der Speicherhöhe von Vorteil.

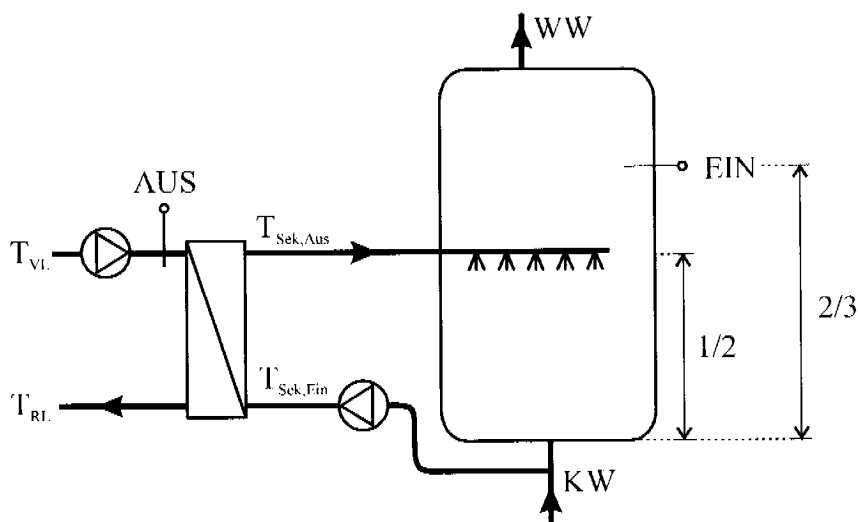


Abb. 4.17: Positionierung der Ein-/Ausschaltfühler für die Heizungsregelung eines Speichers mit externem Plattenwärmetauscher.

Der Ausschaltfühler soll so platziert werden, dass eine möglichst hohe Warmwassertemperatur im Speicher erreicht wird, ohne dass die Wärmepumpe wegen Hochdruckstörung ausschaltet. Da in der Praxis der Druck des Kältemittels nach dem Verflüssiger nicht gemessen wird, wird als Ausschaltkriterium jenes Signal gewählt, welches mit dem Druck am stärksten gekoppelt ist. Die Heizwassertemperatur am Ausgang des Verflüssigers ist mit dem Druck des Wärmepumpenkältemittels am stärksten gekoppelt und ist deshalb das sinnvollste Ausschaltsignal. Da jedoch die Temperatur nach dem Verflüssiger

gemessen wird, kann es bei einer idealen Stufenladung vorkommen, dass der Sensor eine sprunghafte Änderung der Temperatur (wegen der Fühlerträgheit) zu spät bemerkt.

Die Platzierung des Fühlers vor dem Verflüssiger ist nicht sinnvoll, da wegen der veränderlichen Wärmepumpenleistung die maximale Heizwassertemperatur entsprechend schwankt. Eine weitere Möglichkeit für die Wahl des Ausschaltfühlers ist auf z.B. 1/5 der Speicherhöhe. Da jedoch diese Temperatur ziemlich weit von der Wärmepumpe gemessen wird, ist die Kopplung mit dem effektiven Wärmepumpendruck schwächer.

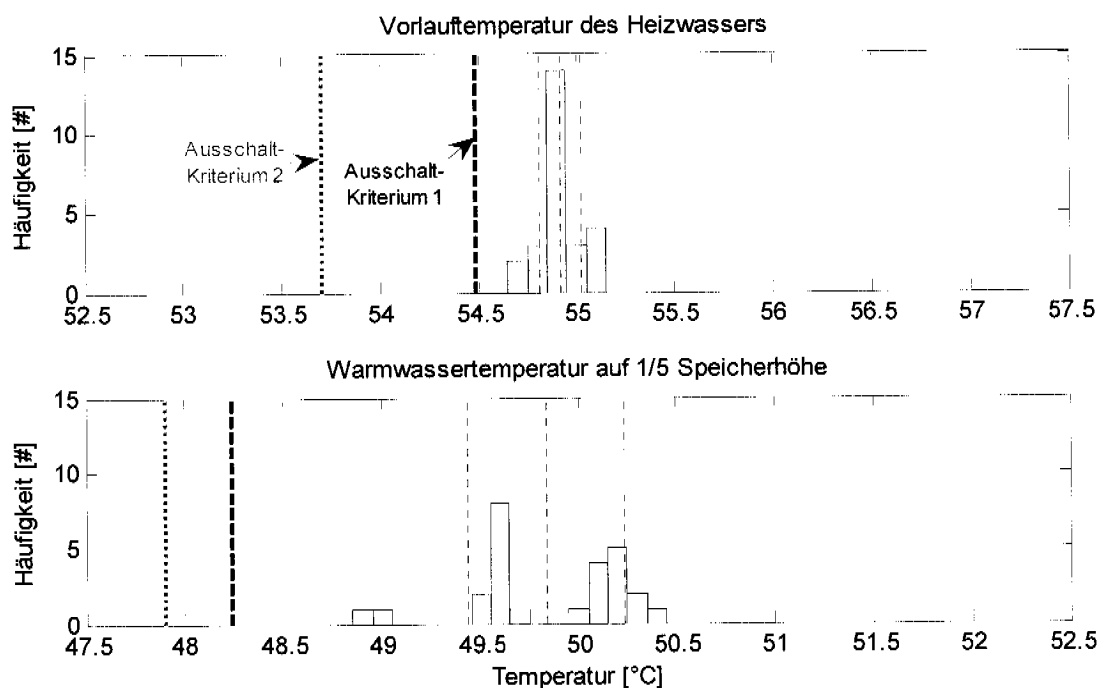


Abb. 4.18: Verteilung der Temperatur des Heizwassers am Ausgang des Verflüssigers (oben) und des Warmwassers auf 1/5 der Speicherhöhe.

Um das optimale Ausschaltkriterium auszuwählen, wurde die Emulation der Speicherladung am Prüfstand (Kapitel 6) mit verschiedenen Randbedingungen (Verbrauchsverläufe und Speichertemperaturen) mehrmals wiederholt und die Streuung der Temperaturen des Heizwassers am Verflüssigeraustritt bzw. des Warmwassers auf 1/5 der Speicherhöhe beim Regelhochdruck untersucht. Die Resultate sind in Abb. 4.18 dargestellt. Die Streuung des Warmwassers auf 1/5 der Speicherhöhe beim Wärmepumpenhochdruck (Bild unten) ist deutlich grösser als diejenige des Heizwassers, was auf eine schwächere Kopplung mit dem effektiven Wärmepumpendruck hindeutet. Um den



Regelhochdruck mit Sicherheit zu vermeiden, soll die Ausschalttemperatur tiefer als diejenige in Abb. 4.18 gewählt werden. Basierend auf den Verteilungen in Abb. 4.18 werden die Ausschalttemperaturen anhand von zwei möglichen Kriterien bestimmt:

$$\text{Ausschaltkriterium 1: } T_{Min} - 1^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Ausschaltkriterium 2: } T_{Mitt} - 4 \cdot \text{std}(T)$$

Dabei wird mit  $T_{Min}$  die minimale gemessene Temperatur, mit  $T_{Mitt}$  die Mitteltemperatur und mit  $\text{std}(T)$  die geschätzte Standardabweichung der Häufigkeitsverteilungen in Abb. 4.18 gemeint. Mit der Wahl des Ausschaltfühlers nach dem Wärmepumpen-Verflüssiger können hohe Warmwassertemperaturen erreicht werden. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 4.1: Resultate mit der Positionierung des Ausschaltfühlers für die Warmwasseraufbereitung am Ausgang des Verflüssigers

	Ausschaltkrit 1	Ausschaltkrit 2
<b>Ausschalttemperatur des Heizwasserfühlers</b>	54.5 °C	53.7 °C
<b>Maximale Speichertemperatur (Mittelung der Versuche)</b>	50.9 °C	50.4 °C
<b>Mittlere Speichertemperatur (Mittelung der Versuche)</b>	50.4 °C	49.7 °C

Wie Tabelle 4.2 zeigt, können nicht so hohe Temperaturen erreicht werden, wenn der Ausschaltsensor auf 1/5 der Speicherhöhe platziert wird.

Tabelle 4.2: Resultate mit der Positionierung des Ausschaltfühlers für die Warmwasseraufbereitung auf 1/5 der Speicherhöhe

	Ausschaltkrit. 1	Ausschaltkrit. 2
<b>Ausschalttemperatur des Warmwasserfühlers</b>	48.3 °C	47.9 °C
<b>Maximale Speichertemperatur (Mittelung der Versuche)</b>	50.4 °C	50.2 °C
<b>Mittlere Speichertemperatur (Mittelung der Versuche)</b>	49.4 °C	49.2 °C

Im Mittel wird mit dem Ausschaltfühler auf 1/5 der Speicherhöhe die Wärmepumpe 100 bis 200 s früher ausgeschaltet. Deshalb wird als Ausschaltkriterium die Temperatur am Austritt des Verflüssigers gewählt (vgl. Abb. 4.17).

### 4.2.3 Regelkonzept für die Warmwasseraufbereitung

Die Hydraulikschaltung in Abb. 4.17 wird so dimensioniert, dass der Speicher 1 bis 2 Mal am Tag geheizt werden muss. Die Ladung erfolgt in einem Schritt (Stufenladung) und dauert ungefähr 1 Stunde. Wegen dem stark variierenden Tagesverbrauch vom Warmwasser [1] sind eine Vorhersage des Verbrauchs und eine Optimierung der Pulsverteilung für den kommenden Tag schwierig. Die Plazierung des Heizpulses kann beeinflusst werden, indem die Soll-Einschaltemperatur während des Tages variiert wird. So kann die Speicherladung in die Niedertarifzeiten verschoben werden. Für diese Regelungsstrategie werden vier verschiedene Betriebsmodi definiert. Ein Vorschlag für die Wahl der Ausschalttemperaturen ist in folgender Tabelle angegeben:

Tabelle 4.3: Mögliche Betriebsmodi für die Warmwasseraufbereitung

Modus		Soll-Einschaltemperatur (Warmwasserfühler)
0	Sperrzeit	-
1	Keine Speicherladung gewünscht	30 °C
2	Speicherladung falls nötig	40 °C
3	„Erzwungene“ Ladung	48 °C

Ein Beispiel für die Wahl des Tagesverlaufs der Einschalttemperatur ist in Abb. 4.19 gezeigt. Mit dieser Strategie wird die Speicherladung zwischen 22:00 und 5:00 möglichst lange verzögert, damit der Speicher möglichst am Ende der Niedertarifzeit, am besten zwischen 5:00 und 7:00 geheizt wird. Um den Unterbruch der Warmwasseraufbereitung wegen der EW-Sperre zu vermeiden, wird die Warmwasserheizung schon eine Stunde vor der Sperrzeit gesperrt. Anhand der Überlegungen in Abschnitt 4.2.2 wird eine Ausschalttemperatur von 53.5-54 °C gewählt.

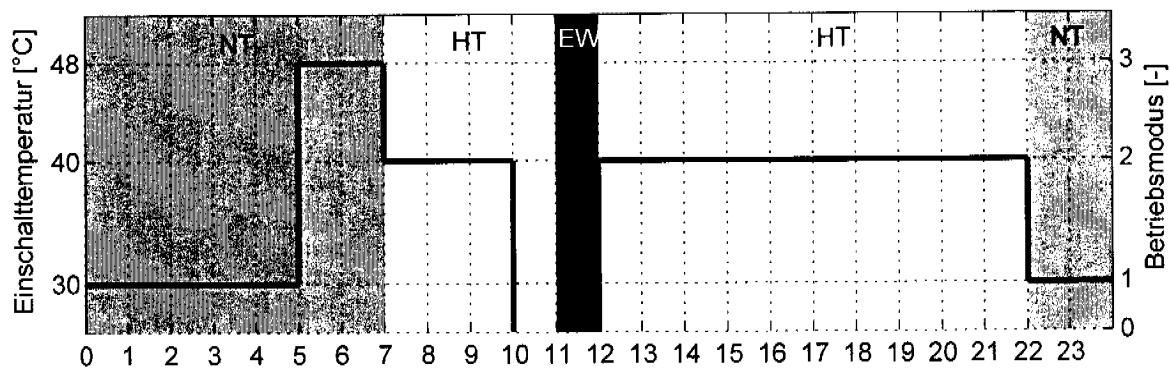


Abb. 4.19: Beispiel eines möglichen Verlaufs der Soll-Einschalttemperatur für die Warmwasseraufbereitung mit dem Einschaltfühler auf 2/3 der Speicherhöhe

### 4.3 Adaptiver modellbasierter prädiktiver Regler für Kombianlagen

In Abschnitt 4.1 wurde der modellbasierte prädiktive Regler für die Gebäudeheizung und in Abschnitt 4.2 das Reglerkonzept für die Warmwasseraufbereitung vorgestellt. Zudem wurde in Kapitel 3 bzw. Abschnitt 3.4.4 ein Parameteridentifikationsalgorithmus präsentiert, welcher die Echtzeit-Parameteridentifikation der Gebäudeparameter wie statische Kennlinie und Zeitkonstante ermöglicht. Für eine korrekte Heizungsregelung der Kombianlage sollen nun diese drei Reglerbausteine nach dem Prinzip von Abb. 4.1 miteinander kooperieren.

Die gewählte Hydraulikschaltung für die Heizung der Kombianlage ist in Abb. 4.20 dargestellt und entspricht der Standardschaltung STASCH2 in [11]. Der Regler verfügt über die Stellsignale der Wärmepumpe und die drei Umwälzpumpen für die Regelung der Anlageheizung. Da der gewählte Wärmepumpentyp für die Kombianlageregelung über einen einzigen Verflüssiger verfügt, dürfen die Gebäudeheizung und die Speicherheizung nicht gleichzeitig betrieben werden. Während der Gebäudeheizung wird die Pumpe  $P_1$  eingeschaltet, damit das Heizwasser im Fussboden und in den Heizkörpern zirkuliert. Bei der Warmwasseraufbereitung werden hingegen die Pumpen  $P_2$  und  $P_3$  eingeschaltet, um den Wärmetransport von der Wärmepumpe in den Speicher zu ermöglichen.

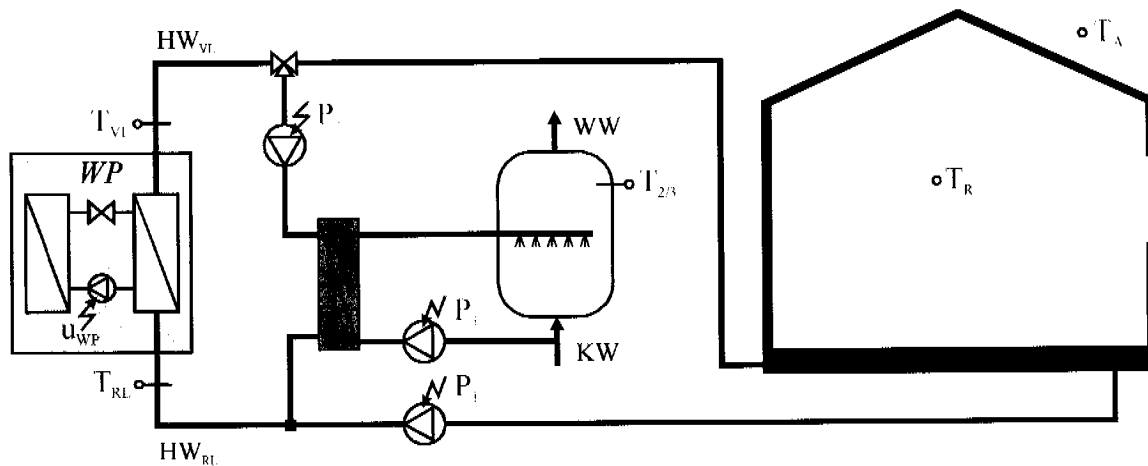


Abb. 4.20: Hydraulische Schaltung der Kombianlageheizung

### 4.3.1 Koordination zwischen Gebäude- und Speicherheizung

Für die Regelung einer Kombianlage muss die Priorität zwischen Gebäudeheizung und Speicherheizung definiert werden. Im Vergleich zur Hausheizung, bei welcher die Verteilung der Heizpulse wegen der Trägheit des Gebäudes den Verlauf der Raumtemperatur nicht stark beeinflusst, muss der Speicher bei grossem Warmwasserverbrauch sofort geheizt werden, so dass immer warmes Wasser zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wird als Regelungsstrategie der Kombianlage die Warmwasseraufbereitung auf höchste Priorität gestellt. Die Zeiten der Speicherladung können wegen dem stark unterschiedlichen Tages-Warmwasserverbrauch im voraus nicht oder nur schwer bestimmt werden, so dass diese im allgemeinen im Vorhersagehorizont des MPC-Algorithmus nicht berücksichtigt werden können. Mit der Einführung einer geschickten variablen Einschalttemperatur für die Warmwasseraufbereitung kann jedoch die Plazierung des Heizpulses beeinflusst werden, so dass die Voraussage von mindestens einer Speicherladung pro Tag geschätzt werden kann. Als Regel werden somit die Zeiten des Betriebsmodus 3 (Zwangsladung des Speichers, vgl. Tabelle 4.3) im MPC-Regler als Sperrzeiten mit der Erhöhung der Gewichtung  $R_k$  (vgl. (Gl. 4.3)) im Gütekriterium (Gl. 4.1) berücksichtigt. Eine unvorhergesehene Speicherladung wird ebenfalls vom MPC-Regler berücksichtigt und die Schätzung des Wärmebedarfs für das Gebäude wird im kommenden Heizpuls entsprechend angepasst.

### 4.3.2 Koordination zwischen Parameteridentifikation und Kombianlageregelung

Für die Bestimmung der Gebäudeparameter des Hausmodells zweiter Ordnung in (Gl. 4.4) und (Gl. 4.5) wird der MRML-Parameterschätzer eingesetzt, welcher in Abschnitt 3.4.4 beschrieben ist. Der adaptive MPC-Regler für Kombianlagen ist in der Lage, einerseits schlechte Parametersätze zu erkennen und falls nötig die alten Parameterwerte zu verwenden und andererseits während der Warmwasseraufbereitung die Parameteradaption ohne Messung der Heizwassertemperatur immer noch weiterzuführen. Im allgemeinen sollte der Online-Parameteridentifikationsalgorithmus während des Betriebs nicht unterbrochen werden, da sonst eine neue Initialisierung des Algorithmus notwendig wäre. Nach einer neuen Initialisierung wird viel Zeit benötigt, bis die Schätzungen der Parameter wieder konvergieren. Nach einem Unterbruch ist die Weiterführung der Parameteridentifikation ohne eine neue Initialisierung ebenfalls nicht sinnvoll, da alle Kovarianzmatrizen und der Zustandsvektor im Prädiktor bzw. die Gradienteninformationen im RML-Algorithmus nicht mehr aktuell sind.

Die Parameteradaption einer Kombianlageheizung ist schwieriger als für eine einfache Gebäudeheizung, da während der Warmwasseraufbereitung die Heizwassertemperatur für die Parameteridentifikation nicht zur Verfügung steht. Um dieses Problem ohne eine Unterbrechung der Parameteridentifikation während der Speicherladung zu umgehen, wird die Kovarianz der Heizwasser-Rücklaufemperatur so hoch gewählt, dass ihre Messung für die Parameteradaption nicht mehr berücksichtigt wird. Die Kovarianzmatrix des Ausgangssignals des Hausmodells zweiter Ordnung in (Gl. 2.17) und (Gl. 2.18) in der Form von (Gl. 3.7)-(Gl. 3.8) wird folgendermassen modifiziert:

$$R_r = \begin{cases} \begin{bmatrix} \infty & 0 \\ 0 & \sigma_{T_R}^2 \end{bmatrix} & \text{während der Warmwasseraufbereitung} \\ \begin{bmatrix} \sigma_{T_{RL}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{T_n}^2 \end{bmatrix} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (\text{Gl. 4.14})$$

Die Konstanten  $\sigma_{T_{RL}}$  bzw.  $\sigma_{T_R}$  entsprechen den Standardabweichungen der Heizwassertemperatur bzw. der Raumtemperatur. Die Kovarianzmatrix  $R_r$  wird für die Lösung des MRML-Algorithmus in (Gl. 3.88)-(Gl. 3.92) benötigt. Das Prinzip der Kooperation zwischen adaptiver MPC-Regelung der Gebäudeheizung und Warmwasseraufbereitung ist in Abb. 4.21 dargestellt.

Für die Schätzung des Wärmebedarfs mit dem MPC-Algorithmus in (Gl. 4.6)-(Gl. 4.8) wird die Messung der Heizwassertemperatur ebenfalls benötigt. Da der MPC-Regler deterministisch ist, kann während der Speicherladung das Problem nicht wie beim MRML-Algorithmus umgangen werden. Deswegen werden dem MPC-Algorithmus anstatt der Messungen die Zustandsschätzungen des EKF-Filters übergeben (vgl. Abb. 4.21).

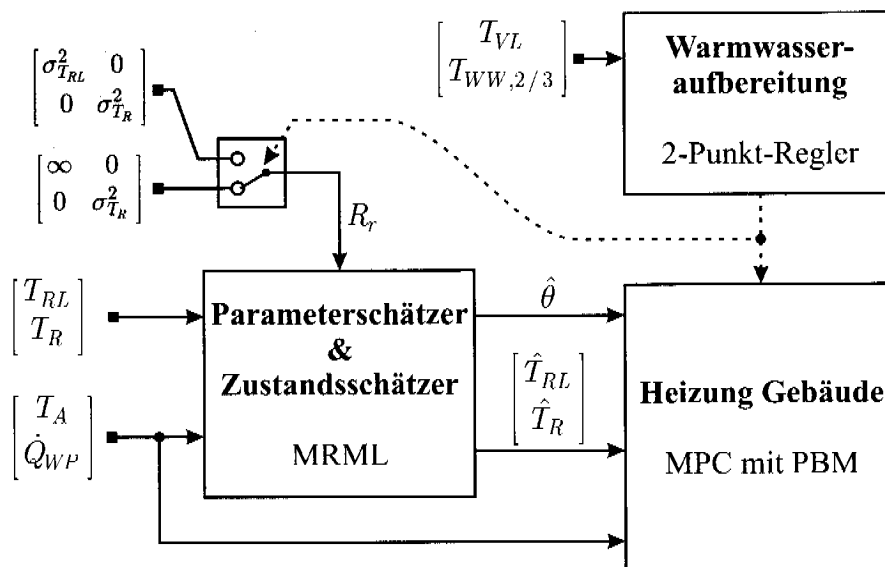


Abb. 4.21: Koordination zwischen Parameteridentifikation bzw. Gebäudeheizung und Warmwasseraufbereitung.

Seite Leer /  
Blank leaf

---

## 5 Alternative Regelvarianten

Im Rahmen eines Projekts des Bundesamt für Energie (BFE) und in Zusammenarbeit mit den drei Industriepartnern Satag Thermotechnik AG, Gabathuler AG und Siemens Building Technologies wurden drei neue Regelungsstrategien für die Heizung kleiner Wärmepumpenanlagen basierend auf der Pulsbreitenmodulation entwickelt und untereinander bzw. mit konventionellen Regelungsstrategien verglichen. Im ersten Teil des Projekts wurden die Reglervarianten in einem handelsüblichen Reglergerät implementiert und in einem Wohnhaus erprobt [13]. In den weiteren Phasen des Projekts wurden einerseits die PBM-Regler erweitert und diese andererseits für einen besseren Vergleich an einem Prüfstand (vgl. Kapitel 6) anhand einer Gebäudeemulation verglichen [4, 32].

Der herkömmliche witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauftemperatur-Regler wird in den meisten Kleinwärmepumpenanlagen eingesetzt. Dieser basiert auf einem einfachen Hysteresis-Regelungskonzept; dabei wird das Ein- bzw. Ausschaltsignal der Wärmepumpe anhand einer statischen Kennlinie der Rücklauftemperatur in Funktion der Aussenlufttemperatur bestimmt. Ein mögliches Problem bei solchen Regelungsstrategien ist, dass die Wärmepumpenlaufzeit oft zu kurz ist, so dass die Arbeitszahl der Wärmepumpe schlecht wird. Ferner können die Kosten und der Energieverbrauch nicht explizit optimiert werden und müssen in der Heizkurve berücksichtigt werden. Das Zeitprogramm und die Warmwassererwärmung sind ebenfalls mit der Heizkurve des Gebäudes gekoppelt, d.h. jede Änderung des Zeitprogramms oder der Wassererwärmungszeiten bedingt eine neue Einstellung der Rücklauftemperatur-Heizkurve.

Die PBM-Regler sind in der Lage, die Länge und Plazierung der Heizpulse zu optimieren, so dass eine optimale Arbeitszahl der Wärmepumpe und eine bessere Steuerung des Zeitprogramms erreicht werden können. Am Institut für Mess- und Regeltechnik wurde der adaptive modellbasierte prädiktive Regler mit Pulsbreitenmodulation entwickelt. Diese Reglervariante ist in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Die zweite Variante des PBM-Konzepts ist der energiekennlinienbasierte (EKB) Regler (entwickelt durch Gabathuler AG). Bei



dieser Regelungsstrategie wird anstatt der Heizkurve der Tagesenergiebedarf in Funktion der Aussentemperatur vorgegeben. Die Pulse werden unter Berücksichtigung der gewünschten Niedertarifanteils, der Pulslänge und der Pausenlänge in verschiedene Zeitfenster verteilt. Die dritte Regelungsstrategie, welche im Rahmen des Projekts des BFE entwickelt wurde, ist der laufzeitkennlinienbasierte (LKB) Regler (entwickelt durch Siemens Building Technologies). Dieses Konzept ist ähnlich der EKB-Regelungsstrategie, jedoch wird dabei anstatt des Tagesenergiebedarfs direkt die Tageswärmepumpenlaufzeit vorgegeben. Insgesamt sind vier Zeitfenster definierbar, wobei jedem der Soll-Laufzeitanteil in Prozent zugeordnet werden kann. Die Heizpulse werden unter Berücksichtigung der Wunsch-Pulslänge und der Wunsch-Pausenlänge in den vier Zeitfenstern verteilt.

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über den konventionellen Zweipunkt-Regler und die zwei weiteren PBM-Wärmepumpenregler gegeben, welche für den Reglervergleich in Kapitel 7 verwendet werden. Abschnitt 5.1 enthält die Beschreibung des konventionellen Zweipunkt-Reglers, der in den meisten Kleinwärmepumpen implementiert ist. Ferner werden die zwei weiteren PBM-Reglervarianten dargestellt, welche von den Industriepartnern Gabathuler AG. und Siemens Building Technologies hergestellt wurden. In Abschnitt 5.2 wird das Prinzip der energiekenlinienbasierten Regler (EKB) erläutert und in Abschnitt 5.3 das Konzept des laufzeitkennlinienbasierten Reglers (LKB) beschrieben.

## 5.1 Konventioneller Zweipunkt-Regler

Für die Regelung mit dem witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauftemperaturregler werden die Einschalt- bzw. Ausschaltzeiten der Wärmepumpe anhand einer Kennlinie mit Hysterese bestimmt. Die dazu benötigte Kennlinie entspricht einer linearen oder stückweise linearen Funktion der aktuellen Aussentemperatur. Diese kann grundsätzlich mit der Steigung  $s$ , dem Offset  $B$  und der Hysterese  $\Delta T_{Hyst}$  charakterisiert werden (vgl. Abb. 5.1). Die flachere Heizkurve des Gebäudes bei tieferen Aussentemperaturen wird berücksichtigt, indem die Steigung der Kennlinie für Temperaturen unterhalb  $0\text{ °C}$  halbiert wird. Mit der Wahl einer grösseren Hysterese werden im Mittel längere Laufzeiten der Wärmepumpe erzielt.

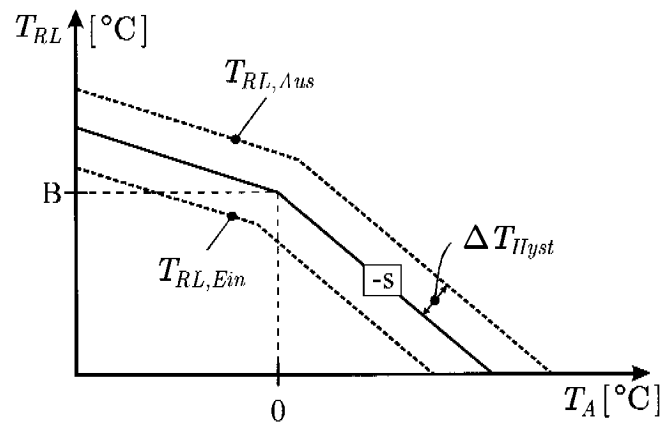


Abb. 5.1: Kennlinie des witterungsgeführten Zweipunkt-Reglers für eine bestimmte Raumtemperatur.

Weiter besteht die Möglichkeit ein Wochen-Zeitprogramm zu definieren. Mögliche Betriebsarten sind der Normalbetrieb (falls normal geheizt werden soll) und der reduzierte Betrieb (falls weniger geheizt werden soll). Bei beiden Betriebsarten kann die Sollraumtemperatur vom Betreiber eingestellt werden. Dazu wird die statische Kennlinie entsprechend nach unten oder nach oben verschoben.

Bei der Inbetriebnahme der Wärmepumpenanlage mit einem konventionellen Zweipunkt-Regler soll die Anfangsschätzung der Heizkurve von einem Fachmann eingestellt werden. Die kleinen Anpassungen der Kennlinie können später vom Betreiber auf einfache Weise über die Einstellung „zu warm / zu kalt“ im Regler vorgenommen werden. Der Regler passt dann automatisch die Steigung und den Offset der Kennlinie an.

Das Prinzip der witterungsgeführten Zweipunkt-Regelung ist anhand einer zweitägigen Simulation in Abb. 5.2 veranschaulicht. Auf dem oberen Bild sind sowohl die gemessene Rücklauftemperatur als auch die Schalttemperaturen beim Normalbetrieb bzw. reduziertem Betrieb dargestellt. Im Normalbetrieb wird die Rücklauftemperatur mit der normalen Hysterese-Kennlinie geregelt. Sobald auf reduzierten Betrieb geschaltet wird, wird die Rücklauftemperatur mit der tieferen Hysterese-Kennlinie geregelt. Die unteren zwei Bilder entsprechen dem Stellsignal der Wärmepumpe und dem gemessenen Ausstemperaturverlauf.

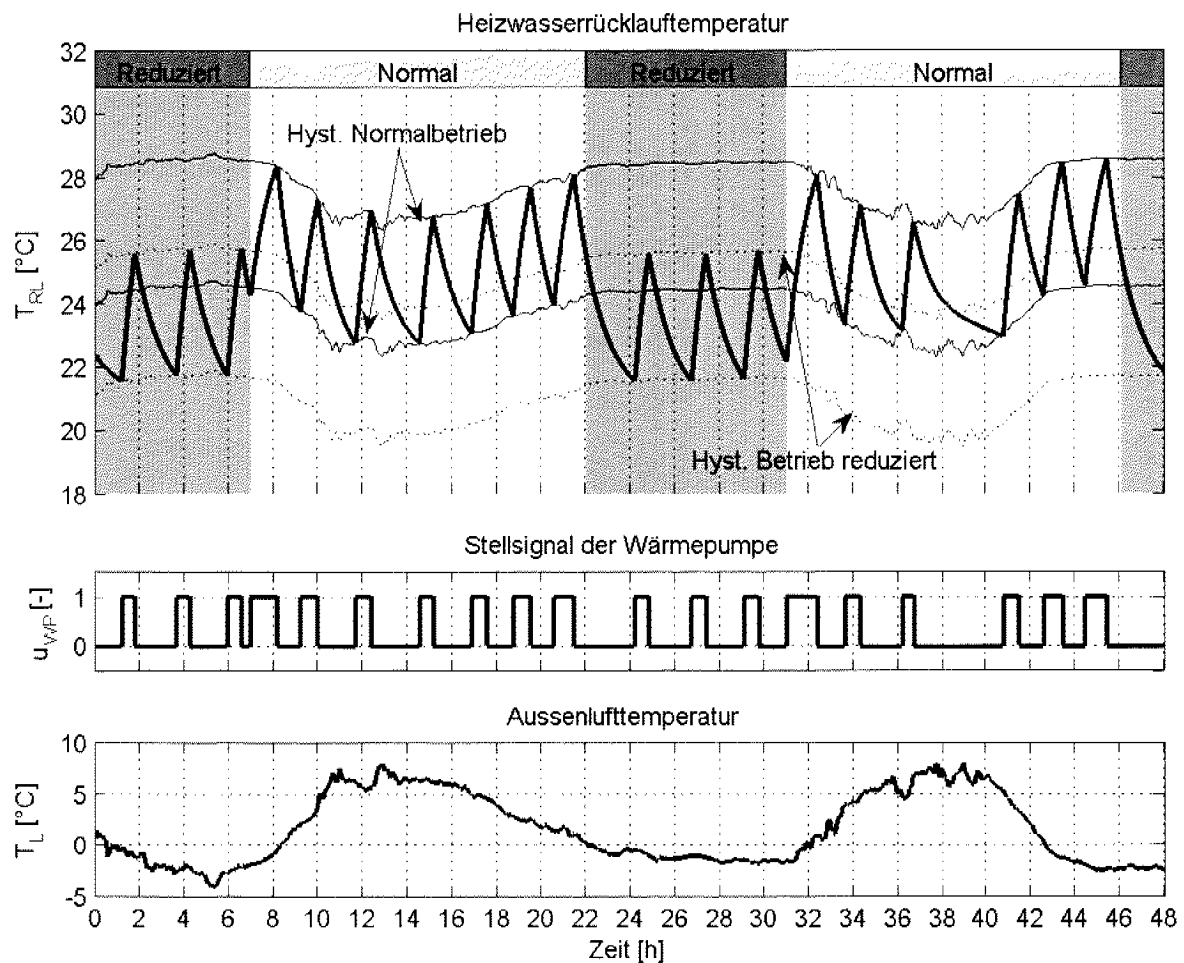


Abb. 5.2: Veranschaulichung einer Wärmepumpenregelung mit einem witterungsgeführten Zweipunkt-Regler. Gewählte Parameter: Zeitprogramm für den Normalbetrieb: 7:00-22:00, Hysterese:  $\pm 2$  °C, Sollraumtemperatur beim Normalbetrieb: 21 °C, Sollraumtemperatur bei reduziertem Betrieb: 20 °C

Die benötigten Messgrößen für das Zweipunkt-Reglerkonzept sind:

- Aussentemperatur
- Rücklauftemperatur
- Raumtemperatur (eventuell für eine automatische Kennlinienanpassung)

## 5.2 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler

Die grundsätzliche Idee beim energiekenlinienbasierten PBM-Regler ist der Ersatz der bisherigen abstrakten Heizkurve (Rücklauftemperatur als Funktion der Aussentemperatur) durch die Energiekennlinie (Tagesenergiebedarf als Funktion der Aussentemperatur). Der effektive Tagesenergiebedarf des Gebäudes hängt vom 24-stündigen Mittelwert der Aussentemperatur ab. Deshalb wird die Kennlinie als Funktion des 24h-Aussentemperaturmittelwerts ausgelegt. Diese Überlegung stimmt mit den Resultaten des Hausmodells zweiter oder dritter Ordnung im statischen Fall überein, bei welchen der Tageswärmebedarf anhand der Integration des statischen Wärmeleistungsbedarfs geschätzt wird:

$$\begin{aligned}
 Q_{Bed,24h} &= \int_0^{24h} \dot{Q}_{Bed,Stat} dt = \int_0^{24h} \kappa_G (T_{R,Soll} - (T_A + \Delta T_{Stat})) dt \\
 &= 24h \cdot \kappa_G \cdot (T_{R,Soll} - \Delta T_{Stat}) - 24h \cdot \kappa_G \cdot \text{Mitt}_{[24h]}(\tilde{T}_A) \\
 &= B - s \cdot \text{Mitt}_{[24h]}(\tilde{T}_A).
 \end{aligned} \tag{Gl. 5.1}$$

Die Kennlinie für das energiekenlinienbasierte Reglerkonzept ist in Abb. 5.3 dargestellt. Diese wird durch den Wärmebedarf bei 0 °C B und die Kennliniensensteigung s definiert. Eine allfällige Verflachung der Kennlinie bei tiefen Aussentemperaturen könnte ebenfalls berücksichtigt werden, indem eine nichtlineare Kennlinie oder eine stückweise lineare wie beim Zweipunkt-Regler gewählt wird.

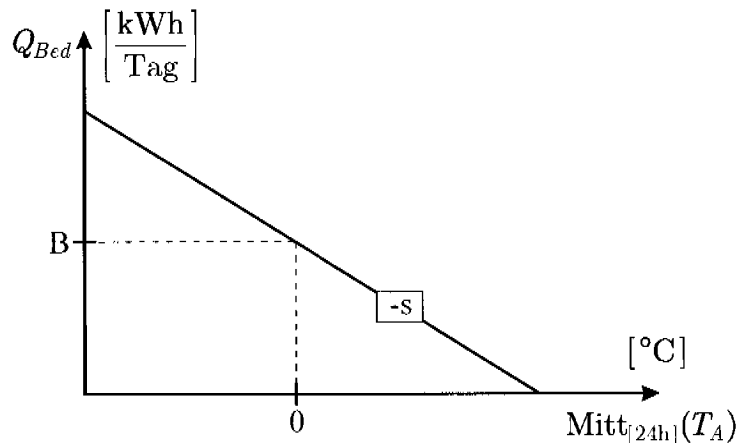


Abb. 5.3: Kennlinie des energiekenlinienbasierten Reglers für eine bestimmte Soll-Raumtemperatur.

Die Wärmeenergie kann im Laufe des Tages in zwei Zeitfenster (Niedertarif- und Hochtariffenster) verteilt werden, damit insbesondere die tieferen Energiekosten in den Niedertarifzeiten für die Heizung berücksichtigt werden können. Der gewünschte Anteil Energie im Niedertariffenster kann vom Benutzer definiert werden. Die Heizpulse werden möglichst am Ende jeder Zeitfenster verteilt, dabei wird für die Bestimmung der Anzahl Pulse die gewünschte Pulslänge und Pausenlänge berücksichtigt. Sobald die Anzahl Pulse festgelegt ist, wird die Startzeit so berechnet, dass die gewünschte Energie dem Gebäude am Ende des Tages vollständig zugeführt sein wird. Da der Energiebedarf am Ende des Tages noch wachsen kann (Temperatursturz), wird eine Zeitreserve von 20 % der Soll-Laufzeit eingerechnet. Die Vorhersage der Pulsverteilung in jedem Fenster wird durch die geschätzte Startzeit, Pulszahl und Puls- bzw. Pausenlängen charakterisiert. Nach dem Start des ersten Pulses wird die Anzahl Pulse bis am Ende des Zeitfensters eingefroren und nur noch die Puls- und Pausenlänge angepasst. Der Regler sorgt dafür, dass am Ende des Niedertariffensters der Niedertarifanteil der gewünschten Wärme erreicht wird und dass am Ende des Hochtariffensters der gesamte Tageswärmebedarf geliefert wird. Der Istwert der Tagesenergie wird anhand der Wärmepumpenkennlinie berechnet. Am Ende jedes Tages wird die fehlende Wärmemenge auf den nächsten Tag übertragen. Die genaue Beschreibung des EKB-Regleralgorithmus befindet sich in [13].

Die Abb. 5.4 veranschaulicht das Konzept des EKB-Reglers anhand einer zweitägigen Simulation. Das obere Bild zeigt den Vergleich zwischen geschätzten Tageswärmebedarf, Niedertarifanteil, Wärmebedarf bis zum Ende des nächsten Heizpulses und Ist-Tagesenergie. Der Startpunkt für die Berechnungen ist der Anfang des Niedertariffensters am Ende des Tages (in diesem Beispiel jeweils um 22:00 Uhr). Der Wärmebedarf wird anhand der gemittelten Aussentemperatur und der Kennlinie bestimmt und laufend angepasst. In jedem Zeitfenster werden die Puls- und Pausenlänge möglichst konstant gehalten, diese werden nur zu den Änderungen des Tagesenergiebedarfs angepasst. Die Pulse im Hochtariffenster werden so verteilt, dass am Ende des letzten Pulses noch eine Zeitreserve von ungefähr 20 % bleibt. Das mittlere Bild in Abb. 5.4 zeigt das Ein-/ Ausschaltsignal der Wärmepumpe, im unteren Bild sind die momentane Lufttemperatur und deren 24-stündige Fenstermitteilung dargestellt.

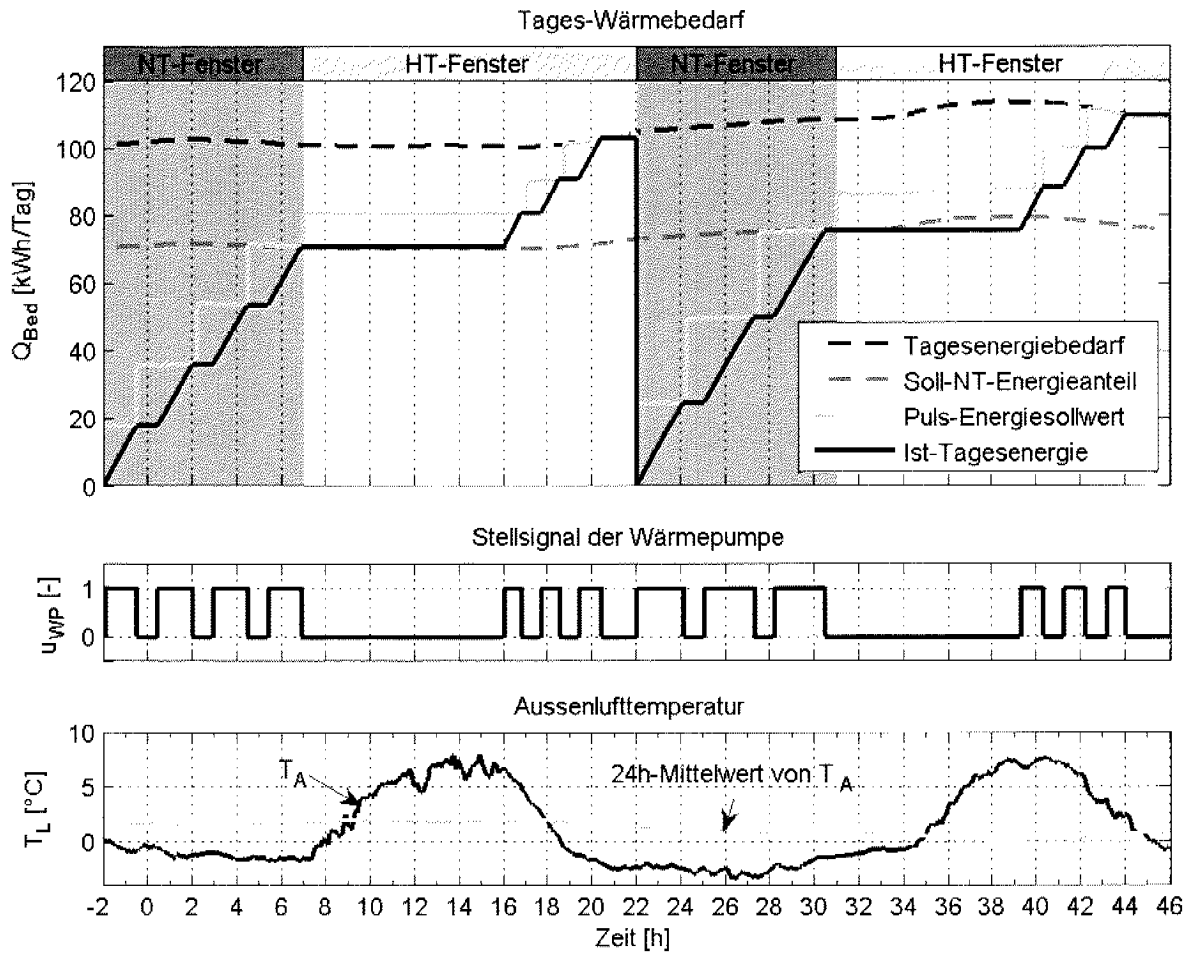


Abb. 5.4: Beispiel einer Wärmepumpenregelung mit dem energiekenlinienbasierten Regler mit folgenden Parametern: Niedertariffenster: 22:00-7:00, gewünschter Anteil Energie in der Niedertarifzeit: 70 %, Puls- und Pausenlänge: 60 Min.

Die benötigten Messgrößen für den energiekenlinienbasierten Regler sind folgendermassen zusammengefasst:

- Aussentemperatur
- Sole-Temperatur (bei Sole/Wasser-Wärmepumpen)
- Vorlauftemperatur des Heizwassers

### 5.3 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler

Das Konzept dieser PBM-Reglervariante basiert auf der Laufzeit der Wärmepumpe. Ähnlich dem EKB-Regler wird beim laufzeitkennlinienbasierten Regler die benötigte Laufzeit der Wärmepumpe anhand einer Kennlinie bestimmt, anstatt des 24-Mittelwerts wird jedoch die benötigte Wärmepumpenlaufzeit mittels einer „gemischten Aussentemperatur“ bestimmt. Diese errechnet sich aus der gemessenen und der gedämpften Aussentemperatur mit einstellbaren Zeitkonstante und Mischverhältnis (Abb. 5.5). Dabei entspricht die Zeitkonstante  $\tau$  der Trägheit des Gebäudes. Der Parameter  $x$  in Abb. 5.5 stellt das Mischverhältnis zwischen gemessener und gefilterter Aussentemperatur dar.

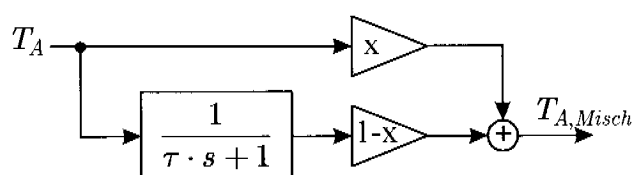


Abb. 5.5: Berechnung der gemischten Aussentemperatur.

Die Laufzeitkennlinie kann anhand von insgesamt vier Stützpunkten beliebig eingestellt werden und gilt für eine Raumtemperatur von 20 °C. Eine Änderung des Raumtemperatursollwerts entspricht einer Verschiebung der Kennlinie nach unten oder oben. Bei dieser Betrachtungsweise der Heizungsregelung wird die Kennlinie der Wärmepumpe bzw. die Messung der Wärmeleistung nicht gebraucht.

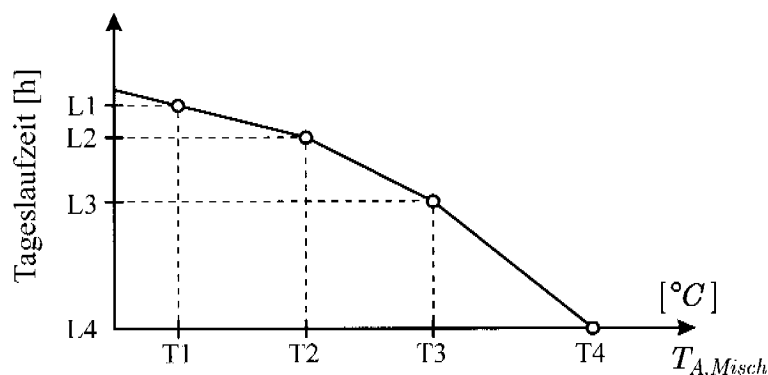


Abb. 5.6: Kennlinie des laufzeitkennlinienbasierten Reglers für eine bestimmte Raumtemperatur.

Das Konzept für die Pulsverteilung entspricht ungefähr demjenigen des EKB-Reglers. Dabei werden die Pulse in vier Zeitfenster aufgeteilt. Die Fensterzeiten und der Laufzeitanteil in jedem Zeitfenster können vom Benutzer gewählt werden. Die Pulse werden wie beim EKB-Konzept vom Regler am Ende jedes Fensters plaziert, unter Berücksichtigung der Wunschpulslänge bzw. Wunschpausenlänge. Das vollständige Konzept ist in [13] beschrieben.

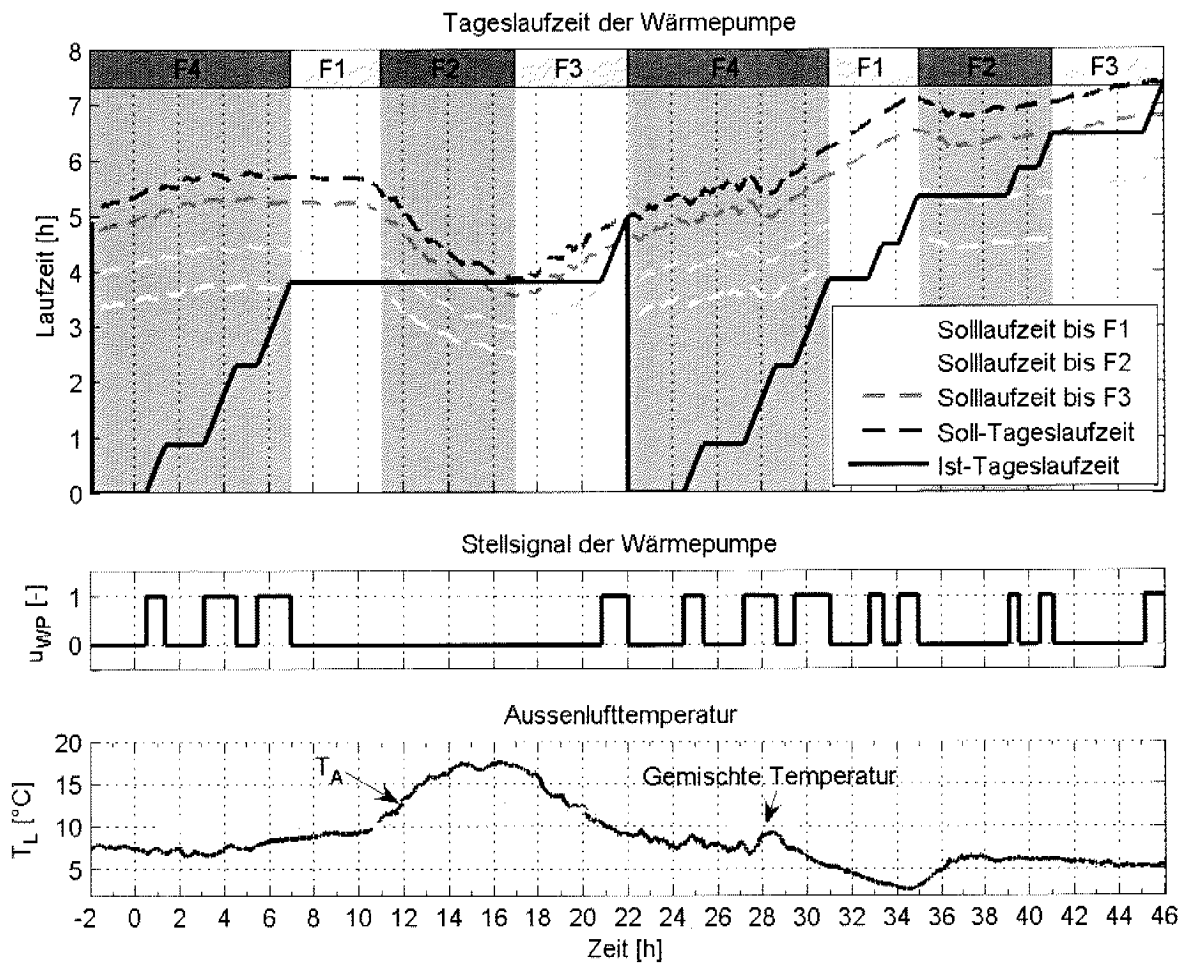


Abb. 5.7: Beispiel einer Wärmepumpenregelung mit dem laufzeitkennlinienbasierten Regler. Fensterzeiten: F1: 7:00-11:00, F2: 11:00-17:00, F3: 17:00-22:00, F4: 22:00-7:00. Laufzeitanteil: F1: 7 %, F2: 15 %, F3: 8 %, F4: 70 %. Puls und Pausenlänge: 60 Min. Anteil gedämpfter Temperatur: 75 %



Die Resultate einer zweitägigen Emulation sind in Abb. 5.7 dargestellt. Der Startpunkt für die Tagesintegration der Laufzeit ist der Anfang von Fenster 4 (um 22:00 Uhr). Ähnlich dem EKB-Regler wird die Laufzeit ständig aktualisiert, basierend auf den neusten Werten der gemischten Aussentemperatur. In diesem Beispiel wird der grösste Anteil der Solllaufzeit in Fenster 4 aufgeteilt. Wenn Wärme benötigt wird, werden die Heizpulse am Ende der Zeitfenster verteilt. Das mittlere Bild entspricht der Heizpulsverteilung, im unteren Bild sind die momentane Aussenlufttemperatur und die gemischte Aussenlufttemperatur (mit 75 % Anteil gedämpfter Temperatur) dargestellt.

Zusammenfassend braucht der laufzeitkennlinienbasierte Regler nur folgende Messungen, um einen korrekten Betrieb zu gewährleisten:

- Aussenlufttemperatur
- Vorlauftemperatur (zur Begrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur)
- Rückmeldung des Kompressors
- EW-Sperrzeiten

---

## 6      **Dynamische Emulation am Wärmepumpenprüfstand**

Die neuen PBM-Regler für Kleinwärmepumpenanlagen sollen möglichst genau miteinander und mit den alten Reglervarianten verglichen werden. Die richtige Vorgehensweise ist, die Regler während einer beliebigen Zeitperiode mit einer realen Testwärmepumpe in einem realen Haus zu prüfen (vgl. [13]). Dazu sollten alle wichtigen (Stör- und Eingangs-) Signale gemessen werden, so dass sämtliche wichtigen thermischen Effekte im Haus berücksichtigt werden und ein fairer Reglervergleich ermöglicht wird. In der Praxis können jedoch viele Störgrößen (z.B. Fenster öffnen, Cheminée anzünden, usw.) nicht gemessen werden, zudem sind die Verläufe der messbaren Signale (wie die Aussentemperatur und die Sonnenstrahlung) für jeden Versuch verschieden. Um dieses Problem elegant zu umgehen, kann die gesamte oder ein Teil der Heizanlage durch ein Simulationsmodell ersetzt werden. Für den Aufbau des Versuchs muss zuerst festgestellt werden, welche Objekte (Wärmepumpe, Haus, Erdwärmesonde, Heizwasserleitung, Regler) durch das Simulationsmodell ersetzt werden und welche Komponenten real vorhanden bleiben sollen, so dass eine geeignete Schnittstelle zwischen Simulationsmodell und den realen Objekten konzipiert werden kann. Einerseits hat die Simulation den Vorteil, dass die Signale und physikalischen Parameter im Modell bekannt sind und dass die Eingangssignale reproduzierbar sind, andererseits wird aber das reale Objekt durch die Modellierung oft stark vereinfacht, mit der Gefahr, dass das entsprechende Simulationsmodell die Realität nicht genügend gut reproduziert.

Am Institut für Mess- und Regeltechnik wurden drei verschiedenen Varianten realisiert, um die Regler für Sole/Wasser-Wärmepumpen zu testen. In der ersten Methode werden die gesamte Heizanlage und der Regler durch einen Simulationsmodell ersetzt. Leider ist diese Variante nicht befriedigend für einen fairen Reglervergleich, ist aber ein einfacher Weg, um mit wenig Hardware schnelle Versuche durchzuführen.

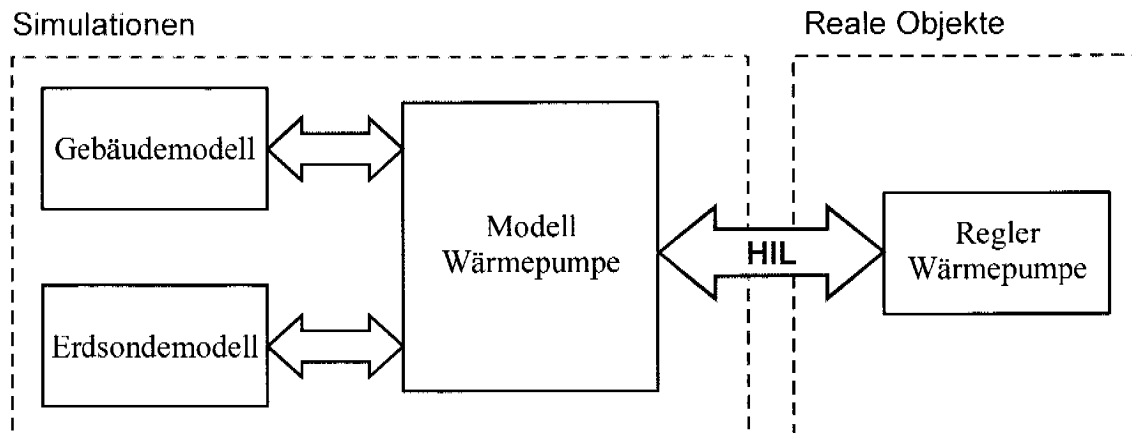


Abb. 6.1: Emulation mit dem HIL-Testgerät

In der zweiten Methode wird nur das reale Reglergerät behalten. Die restliche Heizanlage wird durch das Simulationsmodell ersetzt und mit dem Regler durch ein geeignetes Testgerät (Hardware in the Loop, HIL) verknüpft [32]. Dieses Konzept ist in Abb. 6.1 veranschaulicht. Obwohl diese Variante einen Schritt näher der Realität ist, können der effektive Energieverbrauch und der Wirkungsgrad der Wärmepumpe nicht genau bestimmt werden. In der dritten Variante werden deshalb sowohl die reale Wärmepumpe als auch das Reglergerät behalten [5, 32]. Die Schnittstelle zwischen Simulationsmodell und Wärmepumpe besteht aus einer Anlage, um die Simulationen mit der Testwärmepumpe zu koppeln (Abb. 6.2). Um die simulierten Sole- bzw. Heizwassersollwerte zu erreichen, wird die Anlage mit einem Regler geregelt.

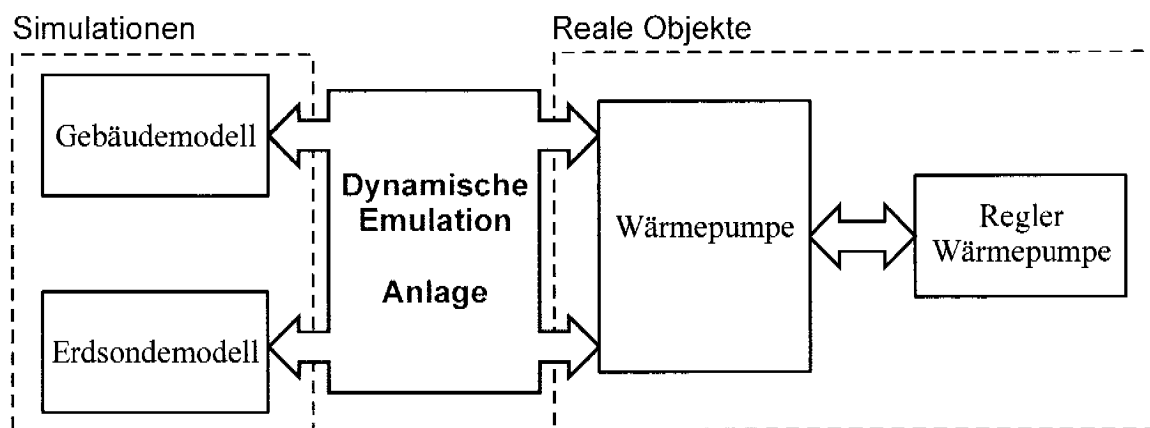


Abb. 6.2: Emulation mit einer dynamischen Anlage am Wärmepumpenprüfstand.

Mit dieser Lösungsvariante können somit bei jedem Versuch sowohl die Wetterverläufe als auch das thermische Verhalten des Gebäudes und der Erd-

wärmesonde reproduziert werden. Andererseits bleibt das reale Verhalten der Wärmepumpe bzw. des Reglers gewährleistet. Die Hauptaufgabe der Anlage, welche als Schnittstelle zwischen Simulationen und der Testwärmepumpe dient, ist es, die Sollwerte des Haus- und des Erdwärmesondenmodells am Eingang der Wärmepumpe zu regeln. Ein genaueres Schema der Kopplung des Erdwärmesonden- bzw. Hausmodells, der Anlage, der Wärmepumpe und des Reglers ist in Abb. 6.3 dargestellt. Das Erdwärmesonden- und das Hausmodell simulieren jeweils die Wärmepumpenquelle und Wärmeabgabe und generieren die Sollwerte der Temperaturen ( $T_{S,RL,Soll}$ ,  $T_{W,RL,Soll}$ ) und Massenströme ( $\dot{m}_{S,Soll}$ ,  $\dot{m}_{W,Soll}$ ) am Rücklauf des Sole- bzw. Heizwasserkreislaufs für den Eingang der Wärmepumpe. Diese Sollwerte werden anhand der simulierten Wetterdaten und der gemessenen Temperaturen am Ausgang der Wärmepumpe ( $T_{S,VL}$ ,  $T_{W,VL}$ ) bestimmt. Das Heizwasser und die Sole, welche durch die Wärmepumpe fließen, werden anhand der Anlage auf den Solltemperaturen und Solldurchflüssen am Eingang der Wärmepumpe geregelt. Der Wärmepumpenregler hat die Messwerte der Testwärmepumpe  $S_{WP}$  (Kältemittel-, Sole- und Heizwassertemperaturen bzw. Kältemitteldrücke) und die vom Simulationsmodell synthetisch generierte Aussenlufttemperatur ( $T_A$ ) zur Verfügung und bestimmt das Ein/Aus-Schaltsignal  $u_{WP}$  der Wärmepumpe.

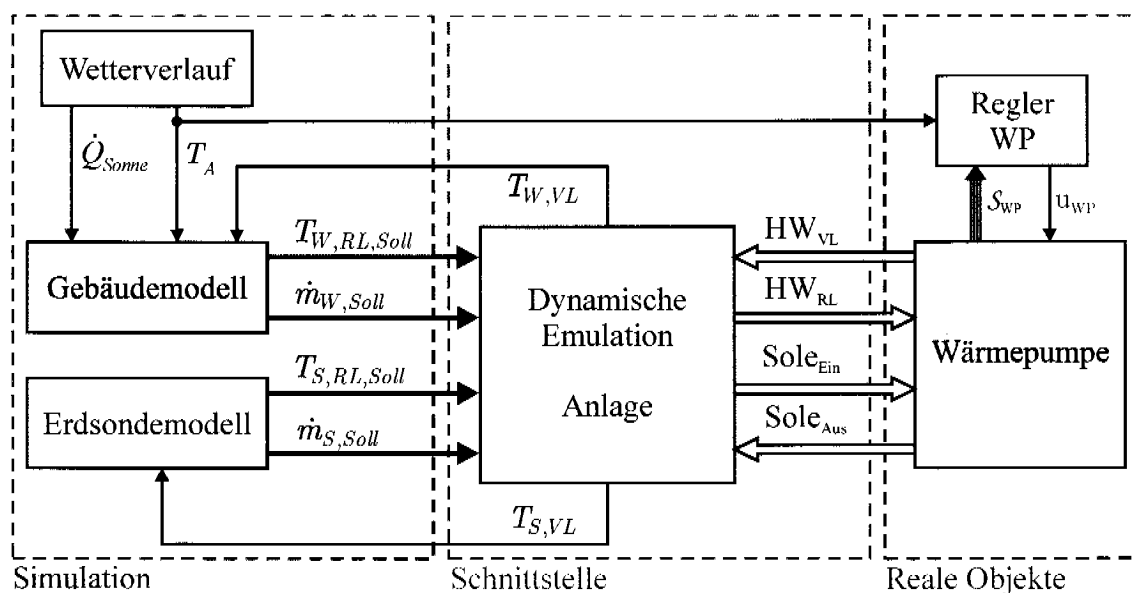


Abb. 6.3: Prinzip der Gebäude-Emulation

Für die Simulation der Haus- und der Erdwärmesondendynamik kann in allgemeinen ein beliebiges Modell implementiert werden. Für das Haus werden

z.B. das einfache System 3. Ordnung in Abschnitt 2.1 oder das komplexere mit dem CARNOT Blockset entwickelte Modell von Abschnitt 6.4.1 verwendet, für die Erdwärmesonde wird das in Abschnitt 6.4.3 beschriebene Modell verwendet. Um das Verhalten des Simulationsmodells realistisch zu halten, wird das Modell zuerst mit realen Messdaten validiert. Für die Echtzeitsimulation wird das Simulationsmodell in das spezielle Echtzeitbetriebssystem „xpc-Target“ kompiliert und auf einem separaten „Target“-Rechner durchgeführt.

Die Anlage ist hingegen in zwei Teile unterteilt, die Soleseite und die Heizwasserseite, welche jeweils aus einem geschlossenen Kreislauf mit zwei Tanks bestehen. Auf jeder Seite wird die Temperatur der Flüssigkeit im ersten Tank kalt und im zweiten Tank warm gehalten, so dass durch deren Mischung (mit einem geregelten Mischventil) die simulierte Solltemperatur am Eingang der Wärmepumpe erreicht werden kann. Für die Temperaturregelung wird jeder Tank separat betrachtet und durch eine Energiebilanz wird für jeden Tank der Sollwärmestrom bestimmt. Die Wärmeflüsse in die / aus den Tanks werden anhand mehrerer Wärmetauscher und einer Hilfswärmepumpe generiert. Der Anlageregler wird auch im xpc-Target-Betriebssystem implementiert. Die Sensoren und Aktoren der Anlage sind anhand einer CAN-Schnittstelle [41] mit dem Simulationsrechner „Target“ angeschlossen.

Die gewählte Testwärmepumpe ist das Modell BW 108.1 (Sole/Wasser) der Firma SATAG Thermotechnik. Die entsprechende Reglerbox kann mit einem EPROM-Brenner programmiert werden, so dass die Wärmepumpen-Regleralgorithmen direkt in der Reglerbox implementiert werden können. Andernfalls kann die Wärmepumpe auch mit einem externen Reglergerät betrieben werden. Das Stellsignal wird im Reglergerät von SATAG begrenzt (z.B. minimale und maximale Puls- bzw. Pausenlängen, Temperaturen und Drücke).

## 6.1 Aufbau der Anlage

Grundsätzlich ist die Hauptaufgabe der Anlage die Emulation der Wärmeabgabe ins Gebäude und der Wärmeentnahme von der Erdsonde. Diese Aufgabe wird mit der Regelung der Solltemperaturverläufe am Eingang der Testwärmepumpe erreicht, unabhängig vom Wärmepumpenzustand (also unabhängig von den Temperaturen am Ausgang der Wärmepumpe). Zudem muss die Anlage versuchen, die Wärmeleistung der Testwärmepumpe wieder zu gewinnen, so dass möglichst wenig Energie vom aussen zugeführt bzw. nach aussen

verschwendet wird. Die Wärme der Testwärmepumpe wird mittels eines Wärmetauschers zurückgewonnen, welcher die Wärme vom Heizwasser zur Sole zurückführt.

Die Abb. 6.4 (aus [41]) zeigt den groben Hydraulikaufbau der Anlage. Hauptsächlich ist die Anlage in zwei Teile unterteilt, links der Solekreislauf und rechts der Heizwasserkreislauf. Beide Teile sind anhand des Wärmetauschers WT3 und der Hilfwärmepumpe HWP gekoppelt.

Wenn man die Heizwasserseite (rechts in Abb. 6.4) betrachtet, kann man folgende Überlegungen machen. Das Heizwasser am Austritt der Wärmepumpe wird in zwei Tanks (je 50 Liter Kapazität) verteilt. Die Temperatur im oberen Tank (KWT) wird kalt und im unteren Tank (HWT) warm gehalten, so wird die Solltemperatur am Eingang der Wärmepumpe anhand des geregelten Mischventils Mi4 durch die Mischung der Flüssigkeiten in den beiden Tanks erreicht. Um die Tanktemperaturen zu regeln, werden die Tanks an Wärmetauscher und einer Hilfwärmepumpe angeschlossen. Für die Temperaturregelung des unteren Tanks (HWT) kann einerseits anhand einer Hilfwärmepumpe (HWP) dem Tank Wärme zugeführt werden und andererseits anhand eines Wärmetauschers (WT1) Wärme vom Tank in ein fließendes kaltes Medium übertragen werden. Im oberen Tank (KWT) kann nur die abfließende Wärme geregelt werden, die Wärmeübertragung findet anhand eines Wärmetauschers (WT2) mit dem fließenden kalten Medium oder anhand eines zweiten Wärmetauschers (WT3) mit der Sole statt. Die oberen Tanks (KWT und HST) sind durch den Wärmetauscher WT3 und die unteren Tanks (HWT und KST) durch die Hilfwärmepumpe HWP gekoppelt.

Der Aufbau des Solekreislaufs ist analog dem Aufbau des Heizwasserkreislaufs. Der obere Tank (HST) wird wärmer als der untere Tank (KST) gehalten, so dass die Solltemperatur der Sole am Eintritt der Wärmepumpe durch die Mischung der Sole beider Tanks mit dem Mischer Mi5 erreicht werden kann. Die Wärmezufuhr in die beiden Tanks erfolgt vom fließenden warmen Stadtwasser anhand der zwei Wärmetauscher WT4 und WT5 und im oberen Tank zusätzlich vom kalten Heizwassertank anhand des Wärmetauschers WT3. Die aktive Wärmeabfuhr erfolgt nur im unteren Tank anhand der Hilfwärmepumpe HWP.

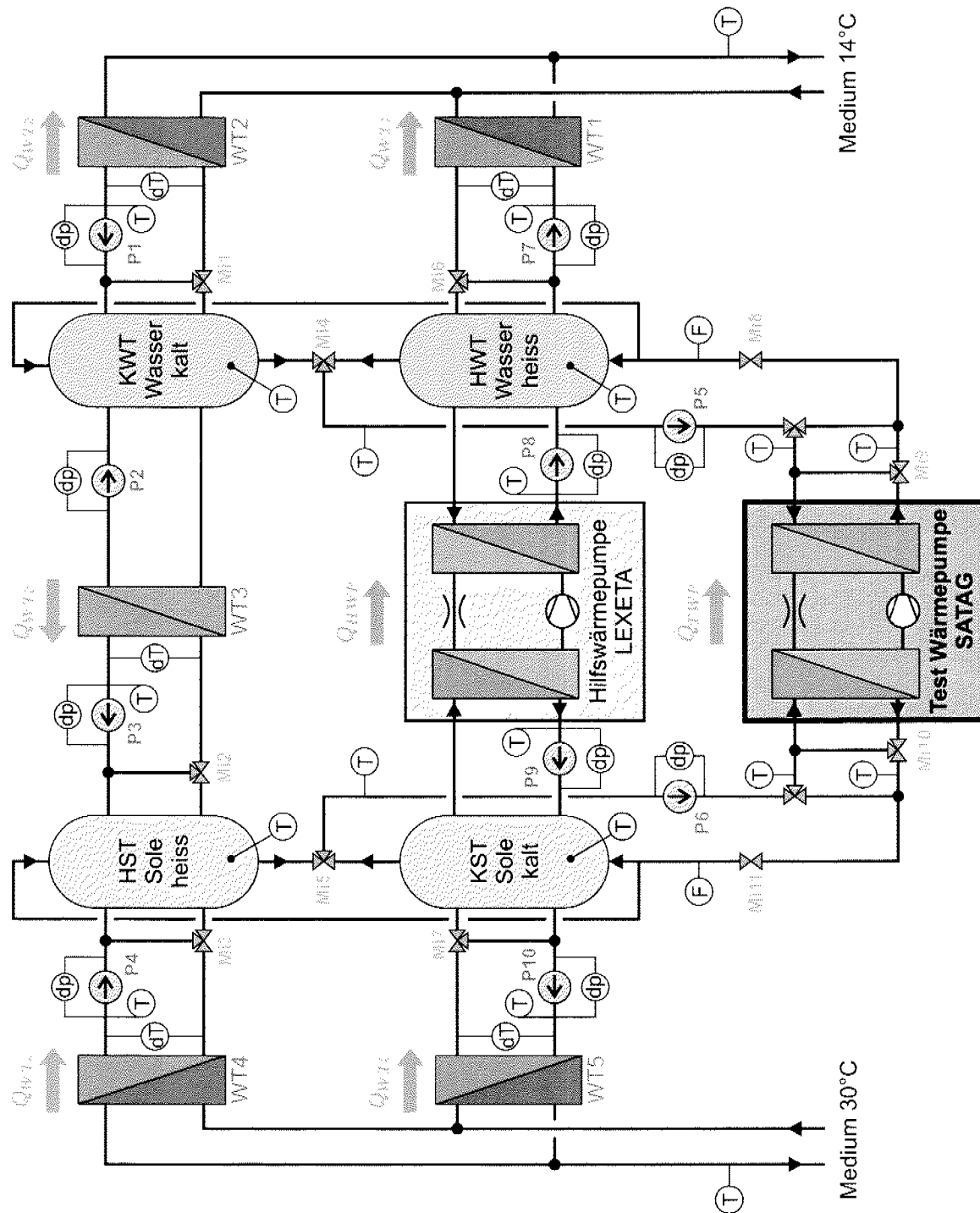


Abb. 6.4: Schematische Darstellung der Anlage

Für den Wärmetransport zwischen den Wärmetauschern und den Tanks wird direkt die Flüssigkeit in den Tanks verwendet. Um die Regelung des Wärmetauscherwärmestroms in den Tank zu ermöglichen, wird ein Dreiwegventil verwendet, welches den Massenstrom und folglich auch den Wärmestrom durch den Tank steuert. Wie in Abb. 6.4 dargestellt, wird der Wärmestrom durch die Wärmetauscher anhand der Dreiwegventile Mi1, Mi2, Mi3, Mi6 und Mi7 durch die Ventilposition eingestellt. Die Pumpen P1, P2, P3, P4, P7 und P10 (Modell UPS 25-25) stellen einen konstanten (nicht einstellbaren) Durchfluss der Flüssigkeit durch die Wärmetauscher sicher.

Die Pumpen P8 bzw. P9 (UPS 25-25) stellen einen konstanten Durchfluss des Heizwassers bzw. der Sole zwischen Tank und Hilfswärmepumpe sicher. Die Pumpen P5 bzw. P6 (UPS 25-55) besorgen hingegen einen konstanten Durchfluss im Heizwasser- bzw. Solekreislauf durch die Testwärmepumpe.

Die Dreiwegventile Mi1...Mi11 können mit einem konstanten Drehmoment geschlossen bzw. geöffnet werden. Die benötigte Zeit für das Öffnen bzw. Schliessen eines Dreiwegventils beträgt 70 Sekunden.

Die Hilfswärmepumpe ist eine Sole/Wasser-Wärmepumpe Typ SW 50-I der Firma Lexeta und wird verwendet, um die Temperaturspreizung in den Wasser- bzw. Soletanks zu halten. Im Gegenteil zur Testwärmepumpe kann die Wärmeleistung der Hilfswärmepumpe durch die Steuerung der Kompressordrehzahl (anhand eines Frequenzumformers) eingestellt werden. Um Schaden an der Hilfswärmepumpe zu vermeiden, darf der Kompressor nicht bei einer beliebig tiefen Drehzahl laufen, so ist der minimale Wärmestrom durch die Hilfswärmepumpe begrenzt.

Die Regelung der Anlage benötigt die Messung der Druckdifferenzen, Durchflüsse, Temperaturen und Temperaturdifferenzen ( $dP$ ,  $F$ ,  $T$  bzw.  $dT$  in Abb. 6.4) an verschiedenen Stellen der Installation. Die wichtigsten Sensoren entsprechen den Temperaturfühlern in den Tanks und am Ausgang bzw. Eingang der Testwärmepumpe. Weiter sind die Wärmeströme durch die Wärmetauscher und die Wärmepumpen erforderlich, aber diese sind nicht direkt messbar. Deshalb werden deren Schätzungen anhand den Druckdifferenz- und Temperaturdifferenzsensoren berechnet.



## 6.2 Interpretation und Umrechnung der Sensorsignale

Für die Anlageregelung sollen die wichtigen Signale erfasst und die Sensoren richtig positioniert werden. Offensichtlich werden für die Tanktemperaturregelung die Tanktemperaturen, sowie die Temperaturen am Eingang bzw. Ausgang der Testwärmepumpe benötigt. Da in der Anlage die Wärmeleistungen in die und aus den Tanks geregelt werden, wird die Schätzung sämtlicher Wärmeströme benötigt. Die Wärme in den Tanks wird hauptsächlich von der fließenden Flüssigkeit (Heizwasser bzw. Sole) übertragen. Diese kann anhand des bekannten Hauptsatzes der offenen Systeme (Energiebilanz) aus der Thermodynamik geschätzt werden:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{Ein} - T_{Aus}). \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Diese Gleichung stellt den Wärmestrom  $\dot{Q}$  eines offenen Systems dar, welcher vom durchtretenden Massenstrom  $\dot{m}$  verursacht wird. Dabei ist  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität und  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz der Flüssigkeit zwischen Eingang und Ausgang des Systems.

Für die Bestimmung der Wärmeströme werden somit die Massenströme und die Temperaturdifferenzen des offenen Systems benötigt. Der Massenstrom durch den Wärmetauscher und durch die Hilfwärmepumpe wird jedoch nicht gemessen, sondern anhand der Druckdifferenz und der Kennlinie der Umwälzpumpen bestimmt. Um den Massenstrom durch die Wärmetauscher und die Hilfwärmepumpe aufrecht zu erhalten, werden die Umwälzpumpen UPS 25-25 verwendet. Diese Pumpen können manuell auf drei verschiedene Drehzahlstufen geschaltet werden, um einen geeigneten mittleren Massenstrom zu erreichen. In Abb. 6.5 sind die Herstellerkennlinien für die drei Drehzahlstufen dargestellt. In der Anlage wird die dritte Drehzahlstufe für alle Pumpen verwendet. Die Kennlinien sind noch von der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit abhängig. In der folgenden Abbildung sind die Kurven für das Wasser dargestellt.

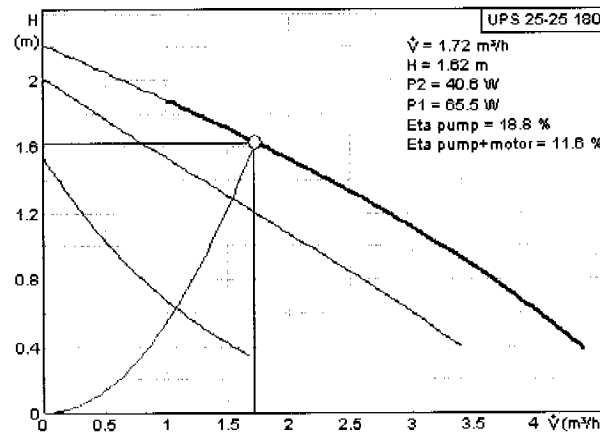


Abb. 6.5: Kennlinie der Umwälzpumpe UPS 25-25.

Der Parameter  $H$  bezeichnet den Füllstand und  $\dot{V}$  ist der Volumenstrom. Die Abhängigkeit zwischen  $H$  und  $\dot{V}$  kann im allgemeinen mit einer quadratischen Funktion beschrieben werden und ist vom Konstruktionstyp und Widerstand der hydraulischen Schaltung abhängig. Die ungefähren charakteristischen Q-H Kurven der Wärmetauscherschaltungen sind in der Abbildung durch die rote Kurve dargestellt. Die gemessene Druckdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Pumpe wird als Höhe dargestellt:

$$H[\text{m}] = \frac{p[\text{mbar}] \cdot 100[\text{Pa/mbar}]}{\rho[\text{kg/m}^3] \cdot 9.81[\text{m/s}^2]}, \quad (\text{Gl. 6.2})$$

wobei  $p$  die gemessene Druckdifferenz und  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit ist. Folglich kann der Massenstrom anhand der Kennlinie geschätzt werden.

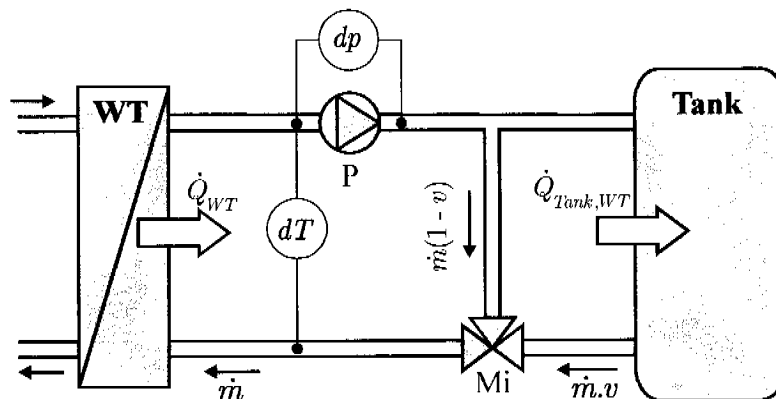


Abb. 6.6: Wärmeübertragung zwischen Tank und Stadtwasser.

Die Schätzung des Wärmetauscherwärmestroms wird für alle Wärmetauscher (WT1 bis WT5) ähnlich berechnet. Der Wärmetransport in den Wärmetau-

scher findet anhand Konvektion statt, die Wärme wird dann mittels der strömenden Flüssigkeit (Heizwasser bzw. Sole) in den Tank übertragen. Die Menge Wärmeleistung durch die Wärmetauscher ist von der Position der Mischer abhängig. Abb. 6.6 zeigt den schematischen Aufbau (die Richtung der Wärmeleistung gilt für die Soleseite).

Die Sole fließt durch den Wärmetauscher WT mit einem konstanten Massenstrom  $\dot{m}$ . Das Ventil verteilt die Flüssigkeit, so dass ein Teil direkt in den Wärmetauscher zurückfließt. Der andere Teil fließt in den Tank. Der Parameter  $v$  bezeichnet den Zustand des Ventils; bei  $v = 1$  ist das Ventil offen und die ganze Flüssigkeit wird in den Tank eingespeist. Der Sensor dT misst die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  zwischen Ausgang und Eingang des Wärmetauschers,  $dp$  misst die Druckdifferenz der Umwälzpumpe. Da der Massenstrom  $\dot{m} \cdot v$  nicht gemessen wird, ist es nicht möglich, den Wärmestrom  $\dot{Q}_{Tank,WT}$  anhand der (Gl. 6.1) zu bestimmen. Um  $\dot{Q}_{Tank,WT}$  zu schätzen, wird deshalb die Energiebilanz der hydraulischen Schaltung in Abb. 6.6 benützt:

$$\dot{Q}_{Tank,WT} = \dot{Q}_{WT} - \dot{Q}_{Verluste} - \frac{dE_{Rohr}}{dt}, \quad (\text{Gl. 6.3})$$

d.h. der Wärmetransport in den Tank ist gleich der Wärme durch den Wärmetauscher minus die Energieänderung in der Rohrleitung (Speicherung der Wärme im Rohr plus Energieänderung der Flüssigkeit) und minus die Wärmeverluste in die Umgebung. Angenommen, dass keine bedeutenden Wärmeverluste in der Rohrleitung auftreten und dass keine Energie in den Rohren gespeichert wird, kann für die Berechnung des Wärmetransports vom Wärmetauscher in den Tank folgende Annahme getroffen werden:

$$\dot{Q}_{Tank,WT} = \dot{Q}_{WT} = \Delta T_{WT} \cdot \dot{m} \cdot c_p. \quad (\text{Gl. 6.4})$$

Mit der Steuerung des Mischventils wird indirekt die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{WT}$  beeinflusst. So kann der Wärmestrom durch den Wärmetauscher geregelt werden. Diese Überlegung gilt für die Wärmestromregelung durch die Wärmetauscher WT1, WT2, WT4 und WT5. Die Wärmeleistung vom KW-Tank zum HS-Tank durch den Wärmetauscher WT3 wird analog bestimmt. Diese wird auf der Soleseite berechnet und anhand des Mischventils Mi11 geregelt. Die Hydraulikschaltung für den oberen Teil der Anlage ist in Abb. 6.7 dargestellt. Hier wird auch die Annahme getroffen, dass die Wärme direkt

und ohne Verluste vom Wassertank KWT zum Soletank HST fließt. Die Tanks in der Wasserseite sind immer wärmer als die Tanks in der Soleseite.

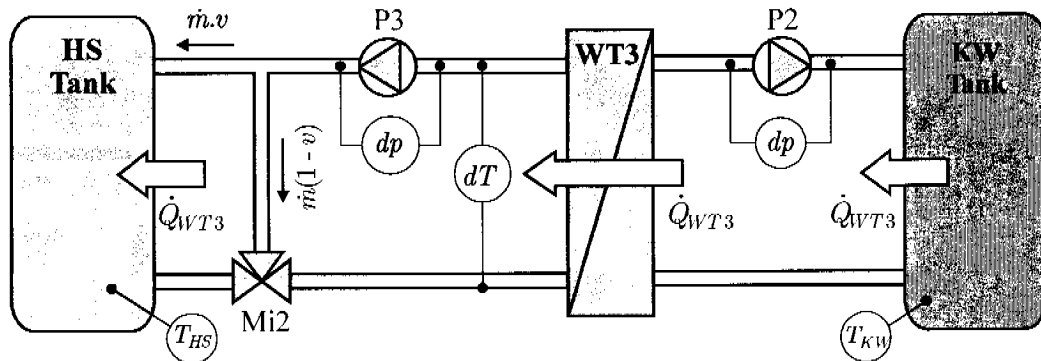


Abb. 6.7: Kopplung des kalten Wassertanks mit dem heissen Soletank anhand des Wärmetauschers WT3 und resultierender Wärmestrom  $\dot{Q}_{WT3}$ .

Der Wärmetransport vom KS-Tank zum HW-Tank mittels der Hilfwärmepumpe (Abb. 6.8) wird ebenfalls anhand der Gleichung (Gl. 6.1) berechnet. Unter der Voraussetzung, dass die Flüssigkeit im Tank völlig gemischt ist (die Temperatur wird im ganzen Tank uniform angenommen), kann der Wärmestrom am Eingang bzw. Ausgang der Hilfwärmepumpe folgendermassen berechnet werden:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{HWP, Ein} &= \dot{m}_{S, HWP} \cdot c_{p, S} \cdot (T_{KS} - T_{S, HWP, aus}) \\ \dot{Q}_{HWP, Aus} &= \dot{m}_{W, HWP} \cdot c_{p, W} \cdot (T_{HW} - T_{W, HWP, aus}).\end{aligned}\quad (\text{Gl. 6.5})$$

Die Regelung des Wärmestroms erfolgt durch die Steuerung der Kompressordrehzahl der Hilfwärmepumpe. Dabei muss beachtet werden, dass die Wärmeströme  $\dot{Q}_{HWP, Ein}$  und  $\dot{Q}_{HWP, Aus}$  nicht gleich sind.

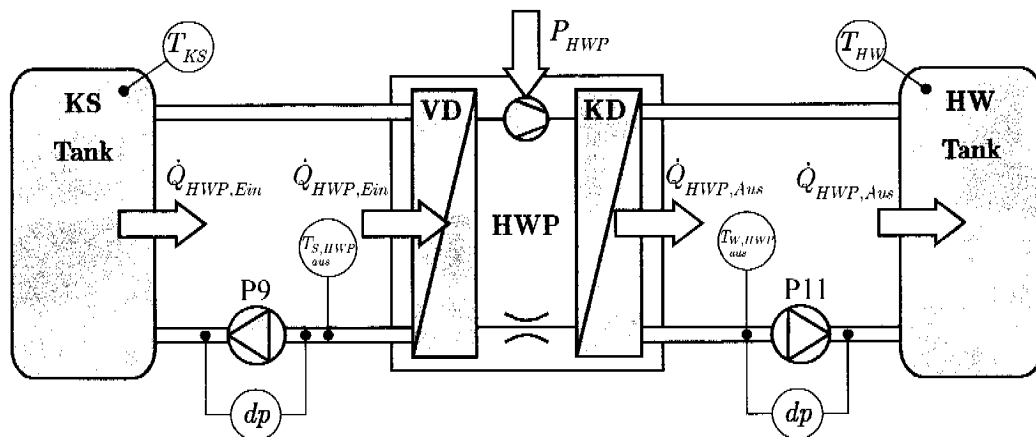


Abb. 6.8: Kopplung des warmen Wassertanks mit dem kalten Soletank. Resultierende Wärmeströme  $\dot{Q}_{HWP, Ein}$  und  $\dot{Q}_{HWP, Aus}$ .

Durch die Mischung der Tankflüssigkeiten mit den Mischern Mi4 bzw. Mi5 (vgl. Abb. 6.4) entsteht ein Wärmestrom von den wärmeren Tanks zu den kälteren Tanks ( $\dot{Q}_{S,m}$  für die Soleseite und  $\dot{Q}_{W,m}$  für die Heizwasserseite). Wenn zusätzlich die Wärmepumpe eingeschaltet ist, fließt Wärme von den Sole-Tanks in die Wassertanks ( $\dot{Q}_{TWP, Ein}$  und  $\dot{Q}_{TWP, Aus}$ ). Abb. 6.9 zeigt diese Situation für beide Seiten der Anlage. Die resultierenden Wärmeströme in die Tanks sind  $\dot{Q}_{HS, Stör}$ ,  $\dot{Q}_{KS, Stör}$ ,  $\dot{Q}_{HW, Stör}$  und  $\dot{Q}_{KW, Stör}$ . Diese Wärmeströme werden als gemessene Störgrößen betrachtet, da diese für die Regelung der Tanktemperaturen nicht beeinflusst werden können.

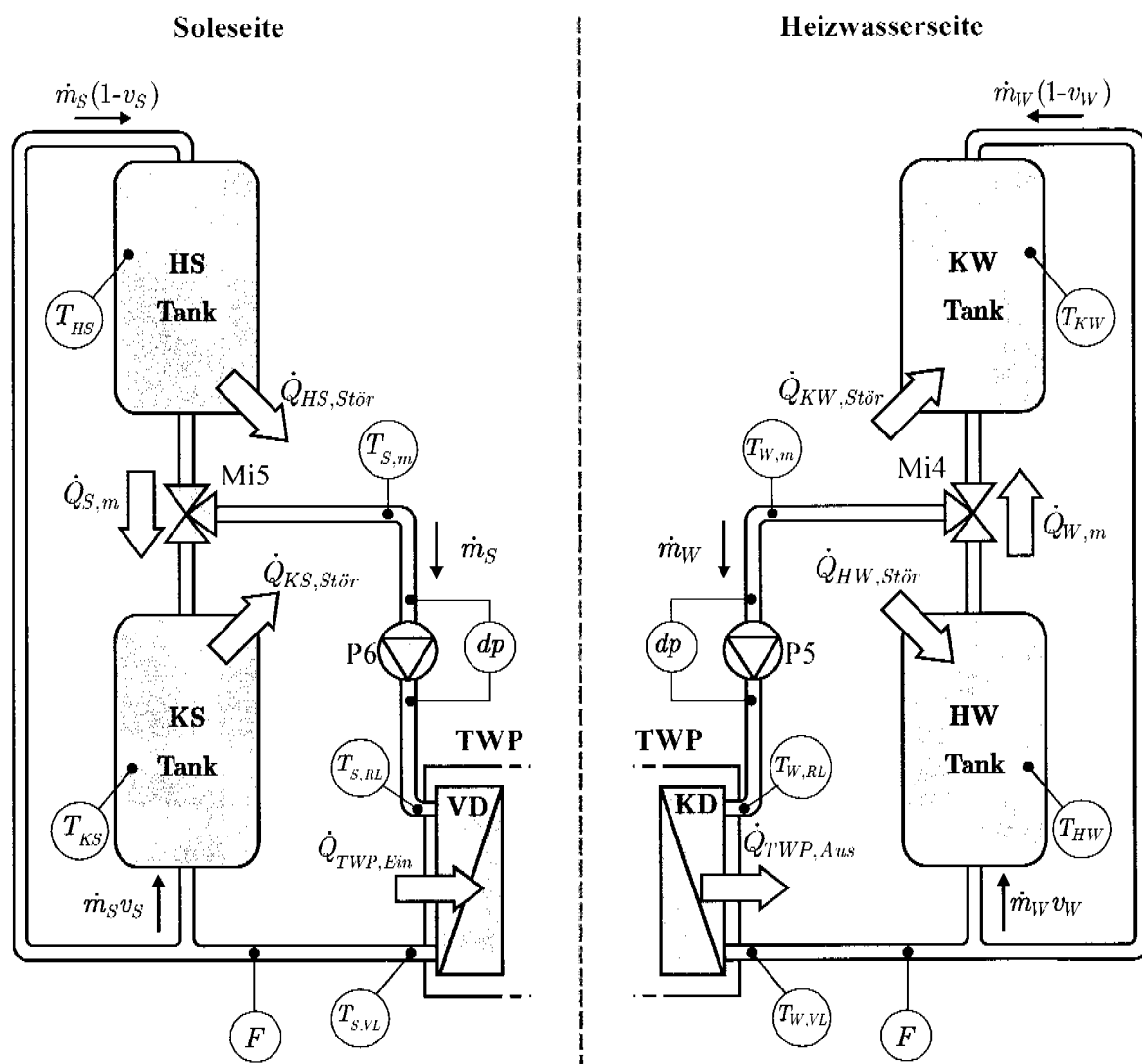


Abb. 6.9: Wärmeströme im Hauptkreislauf (werden als Störung für die Anlageregelung betrachtet). Links: Soleseite. Rechts: Heizwasserseite. Resultierende Wärmeströme durch die Tanks:  $\dot{Q}_{HS, Stör}$ ,  $\dot{Q}_{KS, Stör}$ ,  $\dot{Q}_{HW, Stör}$  und  $\dot{Q}_{KW, Stör}$ .

Um die Wärme durch die Tanks zu bestimmen, wird die Schätzung des Massenstroms benötigt. Das Mischverhältnis  $v$  der Mischer Mi4 und Mi5 wird nicht gemessen, kann aber anhand der Energiebilanz angenähert werden. Für den Mischer Mi5 gilt:

$$(\dot{m}_s \cdot v_s) \cdot c_p \cdot T_{KS} + (\dot{m}_s \cdot (1 - v_s)) \cdot c_p \cdot T_{HS} = \dot{m}_s \cdot c_p \cdot T_{S,m} \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Der Parameter  $v_s$  wird als der Anteil des Sole-Massenstromes definiert, welcher durch den Tank KS fließt. Lösen nach  $v_s$  liefert folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} v_s \cdot T_{KS} + (1 - v_s) \cdot T_{HS} &= T_{S,m} \\ v_s &= \frac{T_{HS} - T_{S,m}}{T_{HS} - T_{KS}} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 6.7})$$

Offensichtlich ist die Schätzung des Mischverhältnisses  $v_s$  besser, je grösser die Temperaturspreizung zwischen heissem und kaltem Soletank ist. Im Betriebszustand bleibt diese Temperaturdifferenz 4°C und ist ausreichend für eine gute Schätzung von  $v_s$ . Die Wärmeströme durch die Tanks und durch die Testwärmepumpe lauten für die Solesseite:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{TWP, \text{ein}} &= \dot{m}_S \cdot c_{p,S} \cdot (T_{S,RL} - T_{S,VL}) \\ \dot{Q}_{\text{Stör}, KS} &= \dot{m}_S \cdot v_s \cdot c_{p,S} \cdot (T_{S,VL} - T_{KS}) \\ &= \dot{m}_S \cdot v_s \cdot c_{p,S} \cdot (T_{S,RL} - T_{KS}) + \dot{m}_S \cdot v_s \cdot c_{p,S} \cdot (T_{S,VL} - T_{S,RL}) \\ &= \dot{Q}_{S,m} - v_s \cdot \dot{Q}_{TWP, \text{ein}} \\ \dot{Q}_{\text{Stör}, HS} &= \dot{m}_S \cdot (1 - v_s) \cdot c_{p,S} \cdot (T_{HS} - T_{S,VL}) \\ &= \dot{m}_S \cdot (1 - v_s) \cdot c_{p,S} \cdot (T_{HS} - T_{S,RL}) + \dot{m}_S \cdot (1 - v_s) \cdot c_{p,S} \cdot (T_{S,VL} - T_{S,RL}) \\ &= -\dot{Q}_{S,m} - (1 - v_s) \cdot \dot{Q}_{TWP, \text{ein}} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 6.8})$$

Wie vorher wird angenommen, dass keine Energie in den Rohren gespeichert wird und keine Wärmeverluste stattfinden. Als Vorzeichenkonvention wird angenommen, dass ein Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{Stör}}$ , welcher in einen Tank fließt, positiv ist. Die Richtung der Wärmepfade in den Tanks in Abb. 6.9 entspricht der Richtung der Wärmeströme, wenn die Testwärmepumpe eingeschaltet ist. In diesem Fall fließt Wärme aus beiden Tanks, somit werden die Wärmeströme  $\dot{Q}_{HS, \text{Stör}}$  und  $\dot{Q}_{KS, \text{Stör}}$  gemäss (Gl. 6.8) negativ.

Ähnlich kann das Mischverhältnis für die Wasserseite berechnet werden:

$$v_W = \frac{T_{KW} - T_{W,m}}{T_{KW} - T_{HW}}. \quad (\text{Gl. 6.9})$$

Der Parameter  $v_W$  entspricht dem Anteil des Massenstromes, welcher durch den Tank HW fließt. Die Wärmeströme durch die Tanks auf der Heizwasserseite lauten:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{TWP,aus} &= \dot{m}_W \cdot c_{p,W} \cdot (T_{W,VL} - T_{W,RL}) \\ \dot{Q}_{HW,Stör} &= \dot{m}_W \cdot v_W \cdot c_{p,W} \cdot (T_{HW} - T_{W,VL}) \\ &= -\dot{Q}_{W,m} + v_W \cdot \dot{Q}_{TWP,aus} \\ \dot{Q}_{KW,Stör} &= \dot{m}_W \cdot (1 - v_W) \cdot c_{p,W} \cdot (T_{W,VL} - T_{KW}) \\ &= \dot{Q}_{W,m} + (1 - v_W) \cdot \dot{Q}_{TWP,aus}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 6.10})$$

Die wichtigen Wärmestromgleichungen für die Herleitung der Wärmestrombilanzen in den Tanks sind somit in (Gl. 6.4)-(Gl. 6.10) zu finden. Man beachte, dass die Wärmetauscherwärmeströme und Hilfswärmepumpen-Wärmeströme regelbar sind und somit für die Regelung der Tanktemperaturen verwendet werden. Hingegen sind diejenigen Wärmeströme, welche durch die Mischung der Tankflüssigkeiten bzw. der Testwärmepumpe entstehen, als Störgrößen zu betrachten. Für die Wärmestromregelung muss man noch beachten, dass die Wärmeverluste durch die Tanks und die Rohrleitungen vernachlässigt werden und so einen systematischen Fehler in der Energiebilanz verursachen.

### 6.3 Regelung der Anlage

Das Hauptziel des Anlagereglers ist es zu bewirken, dass die Temperaturen am Eingang der Testwärmepumpe den berechneten Temperatursollverläufen folgen. Da der Heizwasserkreislauf bzw. Solekreislauf in einer echten Gebäudeheizung eine schnelle Temperaturdynamik aufweist, wird für eine korrekte Gebäudeemulation eine schnelle Reaktionszeit der Anlage benötigt. Die träge Dynamik der Tanks wird durch die Mischung der Flüssigkeit mit den Mischern Mi4 und Mi5 beschleunigt. Die Antwort der Anlage auf eine Anregung ist deshalb vor allem vom Verhalten der Mischventile Mi4 und Mi5 be-

stimmt. Die Regelung der Tanktemperaturen ist jedoch auch entscheidend für die Erreichung der gewünschten Temperaturen am Eingang der Testwärmepumpe. Damit die Solltemperaturen am Eingang der Testwärmepumpe (welche vom Simulationsmodell generiert werden) von der Anlage gehalten werden können, wird das Halten einer Temperaturspreizung zwischen den Tanks benötigt.

Die Abb. 6.10 zeigt das Gesamtkonzept der Anlagerelung. Die Regelung der vier Tanks und der Temperaturen am Eingang der Testwärmepumpe werden separat betrachtet, damit die komplexe Tanktemperaturregelung entkoppelt wird. Zudem wird die Regelung der einzelnen Tanks in zwei Ebenen aufgeteilt. Die zweite ist der ersten untergeordnet.

Die übergeordnete Ebene ist für die Regelung der Tanktemperaturen verantwortlich. Diese besteht aus einem PID-Regler mit Vorsteuerung. Die Ausgänge sind die Sollwärmeströme für die untergeordnete Regelung. Die Wärmeströme, die durch die Testwärmepumpe und durch Mischung entstehen, werden für die Regelung als Störgrösse  $\dot{Q}_{Tank,Stör}$  betrachtet. Diese Störung ist messbar und wird durch Vorsteuerung kompensiert. Der notwendige Wärmestrom für die Korrektur des Soll-Ist-Temperaturfehlers im Tank wird hingegen anhand des PID-Reglers vorgenommen. Der totale Sollwärmestrom für jeden Tank besteht aus der Summe des Steueranteils mit dem Regleranteil (Regelung mit Vorsteuerung). Der Sollwärmestrom jedes Tanks wird in den Wärmetauscher und in die Hilfwärmepumpe aufgeteilt. Es wird dabei versucht, möglichst viel Wärmeenergie in der Anlage zurückzugewinnen.

In der untergeordneten Ebene werden die Sollwärmeströme geregelt. Die Ausgangssignale des Reglers sind die Stellsignale für die Dreiwegventile und die Sollfrequenz für den Frequenzumformer der Hilfwärmepumpe. Da die Dreiwegventile nur mit einer konstanten Geschwindigkeit geöffnet bzw. geschlossen werden können, wird ein PID-Regler mit Pulsbreitenmodulation verwendet. Eigentlich reicht für diese Aufgabe ein gewöhnlicher 3-Punkt-Regler; der Vorteil des PID-Reglers mit Pulsbreitenmodulation ist jedoch, dass das Rauschen unterdrückt und die Stabilität erhöht werden kann.

Für die Regelung der Sole- bzw. Heizwassertemperaturen mit den Mischern Mi4 und Mi5 wird ein einfacher 3-Punkt-Regler verwendet. Diese Wahl ist dadurch begründet, dass ein Temperaturfehler am Eingang der Testwärmepumpe möglichst schnell korrigiert werden soll.



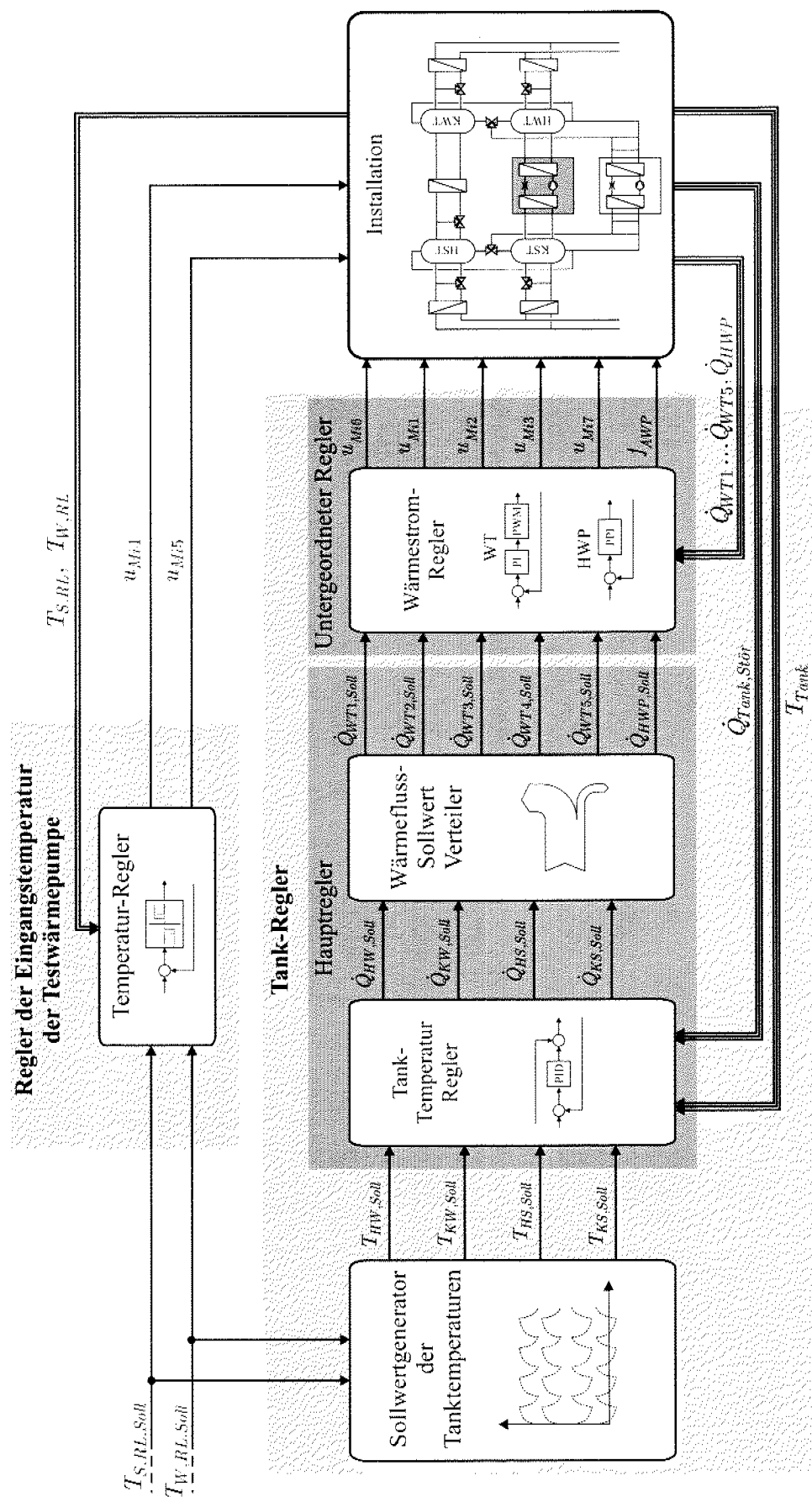


Abb. 6.10: Regelungskonzept für die Anlage

### 6.3.1 Sollwertgenerator für die Tanktemperaturen

An beiden Seiten der Anlage muss ein Tank immer wärmer und der andere Tank immer kälter als die Sollwerttemperatur am Eingang der Testwärmepumpe gehalten werden. Die Grössenordnungen der Temperaturen auf der Soleseite und der Heizwasserseite hängen vom gewählten Erdwärmesondenmodell und dem Gebäudemodell ab. In der Praxis liegen die Temperaturen im Verdampfer der Wärmepumpe (Soleseite) zwischen  $-5$  und  $+10$  °C und im Verflüssiger der Wärmepumpe (Heizwasserseite) zwischen  $15$  und  $50$  °C. Da diese Spreizung recht gross ist, ist es nicht sinnvoll, ständig die Tanks auf diesen Temperaturen zu halten. Der Aufbau der Anlage ermöglicht die dynamische Regelung der Tanktemperaturen, sofern die Sollwerttemperaturen nicht zu stark variieren. Untersuchungen haben gezeigt, dass den Temperaturprofilen des Solekreislaufs und des Heizwasserkreislaufs einer realen Gebäudeheizung (ohne Warmwasseraufbereitung) in den Tanks gut gefolgt werden kann. Als Strategie für die Anlageregelung wird deshalb das Sollprofil der Tanktemperatur gleich dem Soll-Temperaturprofil am Eingang der Testwärmepumpe gewählt, dazu wird der kalte Tank ständig um eine konstante Temperaturdifferenz kälter gehalten und der warme Tank entsprechend wärmer. Mit diesem Konzept wird eine bessere Robustheit im System gewährleistet, da die Mischer Mi4 und Mi5 nur noch die Fehler der Tanktemperaturregelung korrigieren müssen.

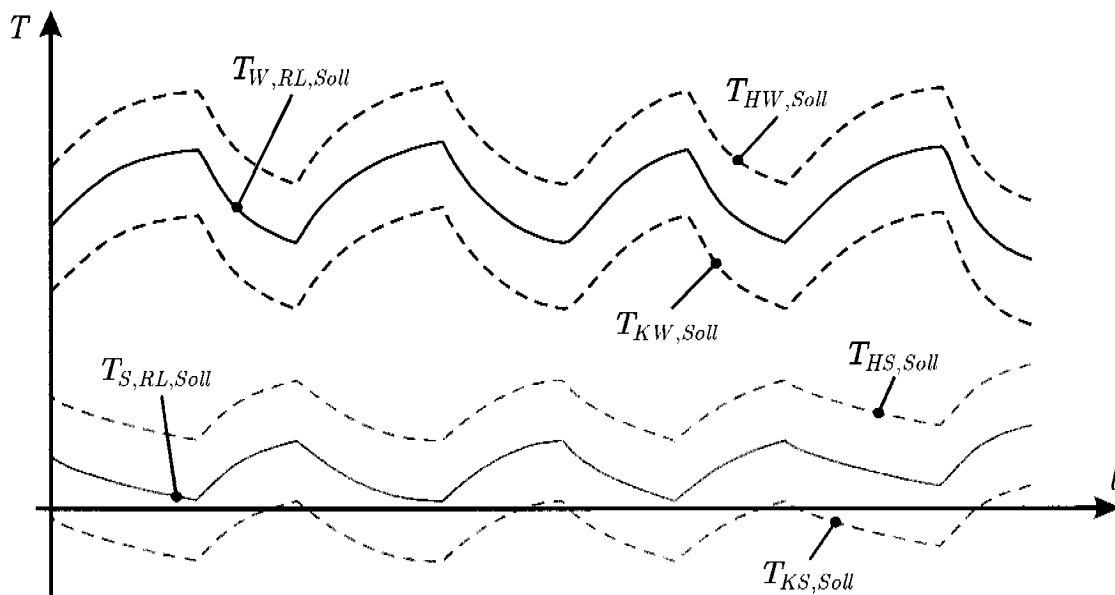


Abb. 6.11: Sollwertverlauf für die Tanktemperaturregelung.

Die Abb. 6.11 zeigt ein Beispiel eines Solltemperaturverlaufs für die Temperatur des Heizwassers bzw. der Sole am Eingang der Testwärmepumpe ( $T_{W,RL,Soll}$  und  $T_{S,RL,Soll}$ ) und die entsprechenden Tanktemperatursollwerte ( $T_{HW,Soll}$ ,  $T_{KW,Soll}$  für die Heizwasserseite und  $T_{HS,Soll}$ ,  $T_{KS,Soll}$  für die Soleseite).

### 6.3.2 Hauptregler für die Tanktemperaturen

Um die gewünschten Tanktemperaturen zu erreichen, werden die Wärmestromsollwerte anhand des Tanktemperaturreglers berechnet. Diese Wärmestromsollwerte werden geschickt auf den Wärmetauscher und die Hilfswärmepumpe verteilt, unter Berücksichtigung der Kopplung der Tanks auf der Soleseite mit den Tanks auf der Heizwasserseite.

#### 6.3.2.1 Tanktemperaturregler

Der gewählte Regler für die Tanktemperaturen entspricht einem „PID-Regler mit Anti-Reset Windup“. Zusätzlich wird ein Steueranteil für das Kompensieren der unregelbaren aber gemessenen Wärmeströme eingesetzt, welche durch die Mischung mit den Mischern Mi4 bzw. Mi5 und durch den Betrieb der Testwärmepumpe entstehen (vgl. Abb. 6.9, (Gl. 6.8) und (Gl. 6.10)). Der PID-Regler mit Anti-Reset-Windup (ARW) sorgt dafür, dass der Tanktemperaturfehler beseitigt wird. Die ARW-Schaltung wird eingesetzt, um die Aufwicklung des I-Anteils im PID-Regler zu vermeiden, da die effektiven Wärmeströme in der Anlage begrenzt sind. Die Abb. 6.12 zeigt den Temperaturregler für die Tanks am Prüfstand.

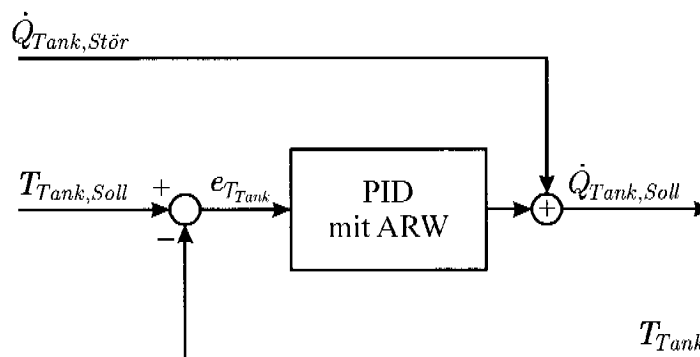


Abb. 6.12: PID-Regelung mit ARW und Vorsteuerung

Der Sättigungswert des Integrators wird konstant gehalten, obwohl der effektive maximale Betrag des regelbaren Wärmestroms von den Temperaturdifferenzen in den Wärmetauschern und in der Hilfswärmepumpe bestimmt wird.

Eigentlich wird die ARW-Schaltung hauptsächlich für die Initialisierung der Anlage gebraucht, wenn alle Temperaturen in den Tanks noch gleich sind.

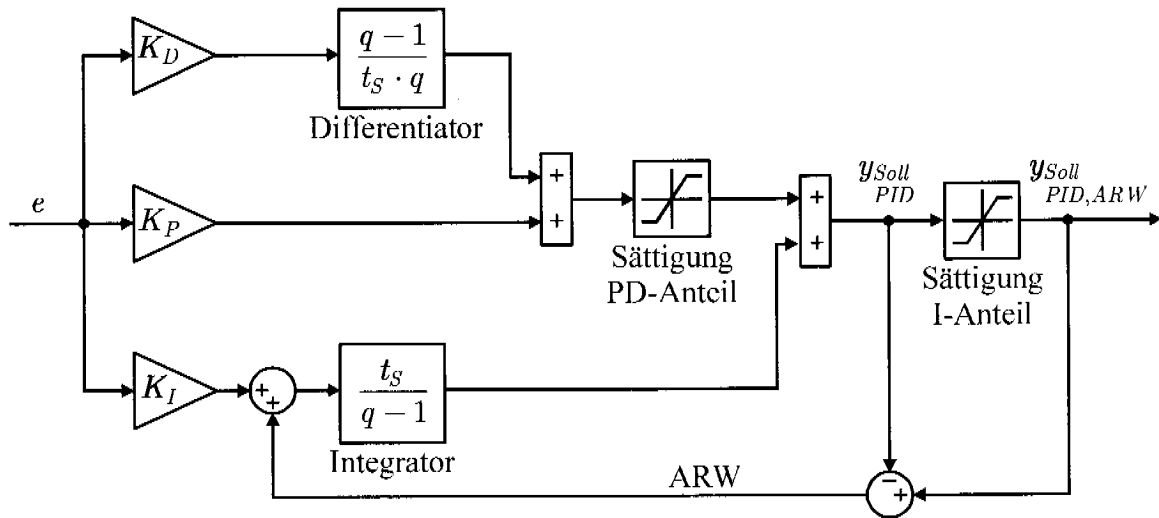


Abb. 6.13: PID-Regler mit Anti-Reset-Windup

Das genaue Schema des PID-Reglers mit ARW ist in Abb. 6.13 gezeigt. Die Schaltung entspricht einem konventionellen PID-Regler, mit der Ausnahme, dass beim Erreichen der Sättigung das überhöhte Signal vom „Speicher“ des integrierenden Anteils abgezogen wird. Es wird auch der PD-Anteil begrenzt. Die Parameter  $K_P$ ,  $K_D$  und  $K_I$  sind die Verstärkungen des P-, D-, bzw. I-Anteils. Da die Wärmepumpenanlage digital geregelt wird, werden die Differentiation und Integration zeitdiskret durchgeführt.

### 6.3.2.2 Wärmestrom-Sollwert-Verteiler

Nachdem die Wärmestromsollwerte für jeden Tank bestimmt sind, müssen diese auf jedem Wärmetauscher bzw. auf die Hilfswärmepumpe aufgeteilt werden. Dabei muss man beachten, dass die Wärmeströme durch die Wärmetauscher bzw. die Wärmepumpe nur in eine Richtung geregelt werden können. Zudem können die Wärmeströme im KW-Tank nur nach aussen aktiv beeinflusst werden und diejenigen im HS-Tank nur nach innen.



Für die obere Seite wird die Aufteilung der Wärmeleistungssollwerte so durchgeführt, dass möglichst viel Energie mit dem Wärmetauscher WT3 zurückgewonnen wird. Da in den oberen Tanks die Wärmeströme nur in einer Richtung aktiv geregelt werden können, wird als Sollwert für WT3 der minimale Wärmestromsollwert zwischen KW-Tank und HS-Tank gewählt. Der Rest der Sollwärme wird dann dem WT4 für den HS-Tank und dem WT2 für den KW-Tank übergeben:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{WT3,Soll} &= \min(-\dot{Q}_{KW,Soll}, \dot{Q}_{HS,Soll}) \\ \dot{Q}_{WT2,Soll} &= -\dot{Q}_{KW,Soll} - \dot{Q}_{WT3} \\ \dot{Q}_{WT4,Soll} &= \dot{Q}_{HS,Soll} - \dot{Q}_{WT3}.\end{aligned}\tag{Gl. 6.11}$$

Negative Wärmestromsollwerte können für den HS-Tank und positive Wärmestromsollwerte für den KW-Tank nicht geregelt werden (vgl. Abb. 6.14). Die Wärme in den KW-Tank bzw. aus dem HS-Tank wird indirekt von der Mischung mit Mi4 resp. Mi5 und der Testwärmepumpe verursacht.

Für die Aufteilung der Wärmeströme auf der unteren Seite der Anlage wird zuerst der Sollwärmestrom der Hilfwärmepumpe bestimmt. Da die Hilfwärmepumpe unterschiedliche Wärmeströme am Eingang und am Ausgang liefert, muss zuerst entschieden werden, welche Seite der Hilfwärmepumpe geregelt werden soll. Im stationären Fall kann folgender Ansatz benützt werden:

$$\dot{Q}_{HWP,Aus} = \dot{Q}_{HWP,Ein} + P_{HWP} = \dot{Q}_{HWP,Ein} + \Delta\dot{Q}_{HWP}(T_{KS}).\tag{Gl. 6.12}$$

Die Wärmeleistungsdifferenz  $\Delta\dot{Q}_{HWP}$  zwischen Eingang und Ausgang der Wärmepumpe hängt hauptsächlich von der Eintrittstemperatur der Sole im Verdampfer ab und kann anhand der Wärmepumpenkennlinie bestimmt werden (entspricht dem elektrischen Verbrauch). Als Wärmestromsollwert der Hilfwärmepumpe wird der grösste Sollwert zwischen KS-Tank und HW-Tank gewählt, unter Berücksichtigung der Wärmeleistungsdifferenz der Hilfwärmepumpe. Schliesslich wird anhand der Wärmetauscher WT5 und WT1 die überschüssige Wärmeleistung der Hilfwärmepumpe kompensiert (der KS-Tank wird mittels WT5 geheizt und der HW-Tank mittels WT1 gekühlt):

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_{HWP,Soll} &= \max(\dot{Q}_{HW,Soll}, -\dot{Q}_{KS,Soll} + \Delta\dot{Q}_{HWP}(T_{KS})) \\
\dot{Q}_{WT5,Soll} &= -\dot{Q}_{KS,Soll} - \dot{Q}_{HWP,Ein} \\
\dot{Q}_{WT1,Soll} &= \dot{Q}_{HW,Soll} - \dot{Q}_{HWP,Aus}
\end{aligned} \tag{Gl. 6.13}$$

Die Seite (Sole- oder Heizwasserseite) der Hilfswärmepumpe, welche geregelt werden soll, wird folgendermassen bestimmt:

$$\text{Regelung HWP-Wärmestrom: } \begin{cases} \dot{Q}_{HW,Soll} > -\dot{Q}_{KS,Soll} + \Delta\dot{Q}_{HWP}(T_{KS}) \rightarrow \text{Heizwasserseite} \\ \text{sonst} \rightarrow \text{Soleseite} \end{cases} \tag{Gl. 6.14}$$

Damit sind alle Soll-Wärmeströme für die Anlage bestimmt. Der untergeordnete Regler (Abb. 6.10, Abschnitt 6.3.3) soll dafür sorgen, dass diese Sollwerte in der Anlage gehalten werden.

### 6.3.3 Untergeordneter Regler für die Wärmeströme

Für die Regelung der Soll-Wärmeströme der Wärmetauscher steht das Steuersignal der Mischventile zur Verfügung und für die Regelung der Wärmeströme durch die Hilfswärmepumpe wird die Kompressordrehzahl gesteuert. In diesem Abschnitt werden die Strategien für die Regelung der Wärmetauscherwärmeströme und der Hilfswärmepumpenwärmeströme vorgestellt.

#### 6.3.3.1 Regelung der Wärmetauscherwärmeströme

Für die Auslegung des Wärmestromreglers für die Wärmetauscher muss die Modellierung der Hydraulikschaltung des Wärmetauschers in Abb. 6.6 untersucht werden. Der gewünschte Wärmestrom wird durch die Steuerung des Mischventils erreicht. Der Antrieb des Mischers ist ein Gleichstrommotor mit einer konstanten Drehzahl, deshalb sind als Eingangssignal  $u_{Mi}$  nur die Werte  $-1/0/+1$  zulässig. Die notwendige Verstellzeit, um das Ventil ganz zu öffnen bzw. schliessen beträgt 70 Sekunden (Abb. 6.15). Der resultierende Massenstromanteil entspricht im allgemeinen einer Funktion der Ventilposition  $v$ . Für die Regelung des Mischers wird angenommen, dass der Anteil des Massenstromes und die resultierende statische Wärmeleistung durch den Wärmetauscher proportional zur Ventilposition sind.

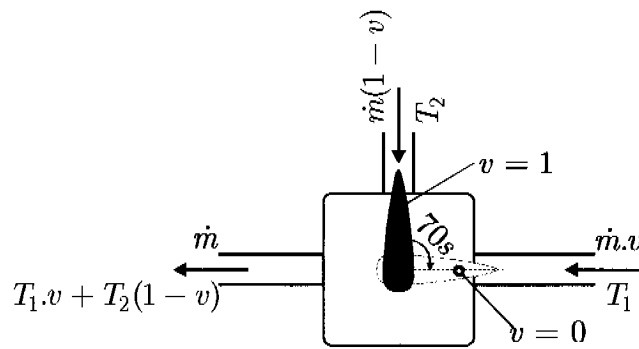


Abb. 6.15: Ein- und Ausgangsgrößen der Mischer am Prüfstand

Die Abb. 6.16 zeigt die Größen in der Wärmetauscher-Hydraulikschaltung. Im stationären Fall entspricht der Wärmestrom durch den Wärmetauscher  $\dot{Q}_{WT,Max} \cdot v$ , wobei  $\dot{Q}_{WT,Max}$  der momentane maximale Wärmestrom (mit  $v = 1$ ) ist. Der effektive Wärmestrom ist noch von einem dynamischen Anteil  $G_{WT}(s)$  abhängig, welcher die Trägheit des Wärmetauschers beschreibt.

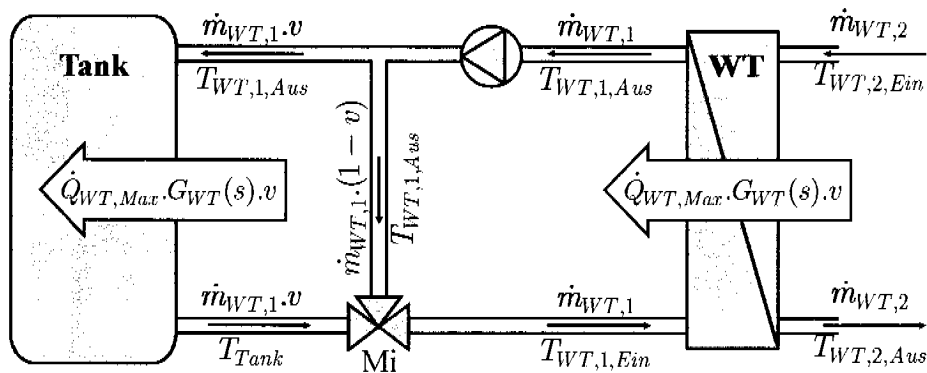


Abb. 6.16: Hydraulikschaltung für die Wärmestromregelung durch den Wärmetauscher. Resultierende Temperaturen, Massenströme und Wärmestrom.

Die Gleichung des Wärmetauscherwärmestroms lautet somit:

$$\dot{Q}_{WT} = \dot{Q}_{WT,Max}(T_{WT}) \cdot G_{WT}(s) \cdot v. \quad (\text{Gl. 6.15})$$

Die Übertragung  $G_{WT}(s)$  kann mit einer linearen dynamischen Funktion angenähert werden (z.B. Tiefpassfilter erster Ordnung), hingegen stellt  $\dot{Q}_{Max}(T_{WT})$  den nichtlinearen Anteil dar. Dieser ist hauptsächlich von den Temperaturen am Eingang des Wärmetauschers  $T_{WT,1,Ein}$  und  $T_{WT,2,Ein}$  ab-



hängig und darf nicht als konstant angenommen werden. Ein einfacher Ansatz für dessen Berechnung lautet:

$$\dot{Q}_{Max}(T_{WT}) = k_{WT} A_{WT} (T_{WT,2,Ein} - T_{WT,1,Ein}). \quad (\text{Gl. 6.16})$$

Damit diese Gleichung gilt, muss angenommen werden, dass die Massenströme auf beiden Seiten des Wärmetauschers konstant bleiben. Das Schema des Regelsystems ist in Abb. 6.17 dargestellt. Da für die Regelung nur die Werte  $-1/0/+1$  zulässig sind, ist es nur eine Ansteuerung mit einem 3-Punkt-Regler oder einem Regler mit Pulsbreitenmodulation möglich. Die Variante mit dem 3-Punkt-Regler ist nicht sehr geeignet, da der Regler bei jedem Fehlerbetrag mit der gleichen Stärke reagiert. Das könnte zur Folge haben, dass die Robustheit des Gesamtsystems kleiner wird. Anhand der Variante mit PBM kann hingegen das Problem der fixen Geschwindigkeit des Mischventils elegant behoben werden.

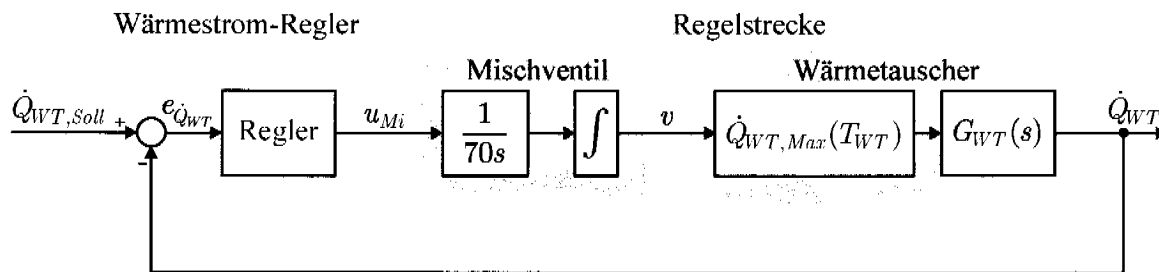


Abb. 6.17 Regelsystem für die Wärmestromregelung des Wärmetauschers

Die gewählte Regelungsstrategie für das Mischventil entspricht einem skalierten linearen PID-Regler mit ARW und PBM. Der Signalflussbild des Reglers ist in Abb. 6.18 dargestellt.

Das Signalflussbild des PID-Reglers mit ARW ist in Abb. 6.13 gezeigt, die gewählte Abtastzeit ist 1 Sekunde. Der Ausgang des PID-Anteils entspricht dem Sollwert der normierten Verstellgeschwindigkeit des Mischventils  $\omega_{Mi,Norm}$  und ist auf den Intervall  $[-1; +1]$  begrenzt. Ein Problem bei linearen PID-Reglern ist, dass das Regelverhalten und die Robustheit auf dem Prinzip der Linearität der Regelstrecke beruhen. Da die Übertragung des Wärmetauschers einen nichtlinearen Anteil enthält (vgl. (Gl. 6.16) und Abb. 6.17)) sollten die Parameter des PID-Anteils immer bezüglich dem momentanen Betriebspunkt variiert werden, um ein gleichmässiges Regelverhalten zu erhal-

ten. Andernfalls kann der nichtlineare Anteil anhand einer geschickten Skalierung des Signals am Eingang des PID-Reglers behoben werden.

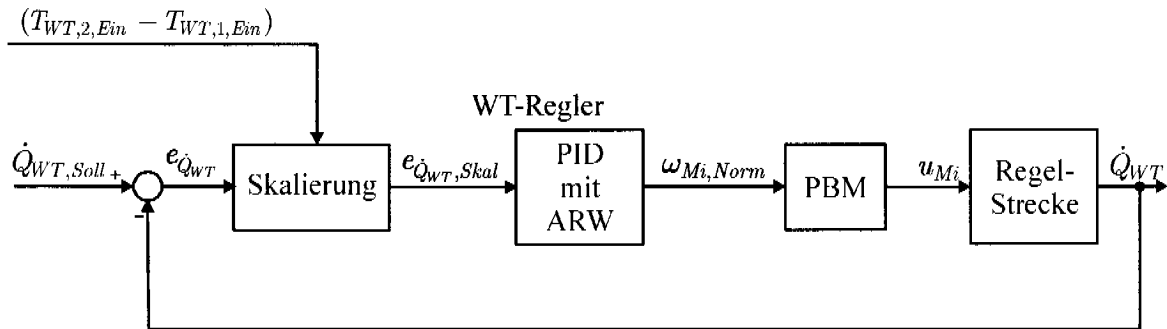


Abb. 6.18: Skalierter PID-Regler mit ARW und PBM für die Steuerung des Dreiwegventils.

Als Skalierungsfunktion soll die Inverse des nichtlinearen Anteils der Regelstrecke gewählt werden. Der Wärmestromfehler  $e_{\dot{Q}_{WT}}$  wird somit folgendermassen korrigiert:

$$e_{\dot{Q}_{WT},skal} = \frac{\Delta T_{WT,Nom}}{(T_{WT,2,Ein} - T_{WT,1,Ein}) + \xi} \cdot e_{\dot{Q}_{WT}} \quad (\text{Gl. 6.17})$$

Die Konstante  $\Delta T_{WT,Nom}$  ist eine nominelle Temperaturdifferenz des Wärmetauschers. Der Parameter  $\xi$  wird nur gebraucht, um eine Division durch Null bei  $T_{WT,2,Ein} = T_{WT,1,Ein}$  zu verhindern (wenn keine Wärmeübertragung möglich ist) und soll möglichst klein gewählt werden. Als Konsequenz der Skalierung wird die neue Strecke von  $e_{\dot{Q}_{WT}}$  nach  $\dot{Q}_{WT}$  linear und deshalb können die Parameter des PID-Reglers konstant gehalten werden. Es wird zusätzlich angenommen, dass die Dynamik von  $\dot{Q}_{Max}(T_{WT})$  vernachlässigbar ist.

Anhand der Pulsbreitenmodulation lässt sich schliesslich das Ausgangssignal des PID-Reglers in die diskreten Werte  $-1/0/+1$  umwandeln (vgl. Abb. 6.18). Das Eingangssignal im PBM-Block entspricht dem Sollanteil der Pulslänge bezüglich der Pulsbreite. Das Beispiel der Pulsbreitenmodulation für das Mischventil ist in Abb. 6.19 gezeigt. Eine vernünftige Pulsbreite beträgt 5-10 Sekunden; so wird der Ventilmotor nicht zu viel beansprucht und der Wärmestromfehler kann genügend schnell kompensiert werden. Die Abtastzeit für die Pulsbreitenmodulation beträgt 0.1 Sekunden.

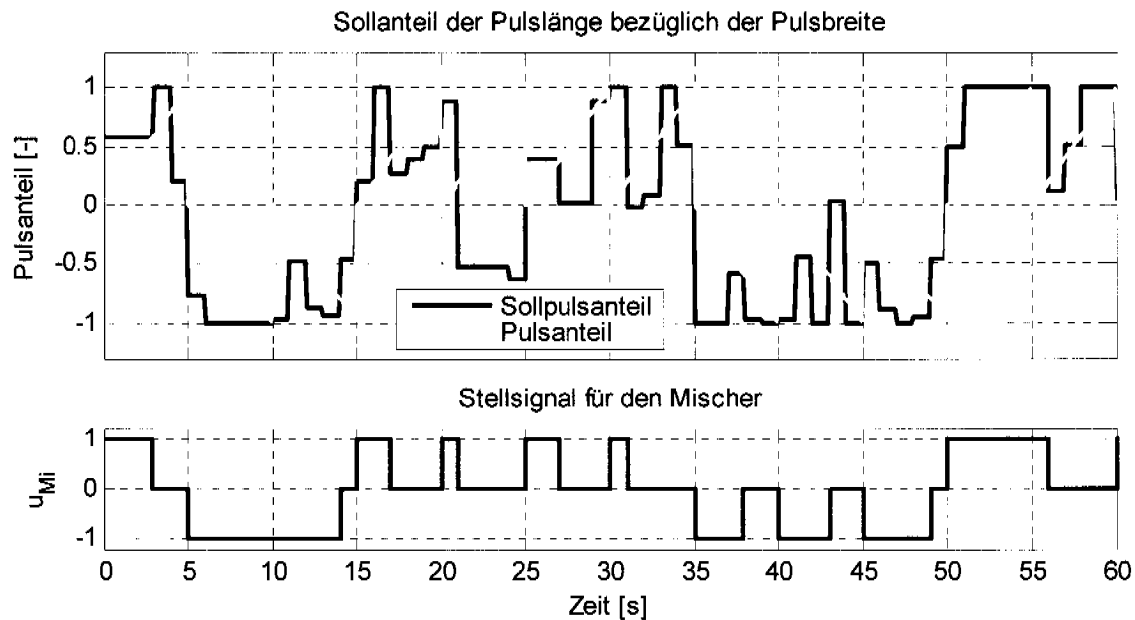


Abb. 6.19: Pulsbreitenmodulation für die Bestimmung des Stellsignals für den Mischer bei der Wärmestromregelung durch den Wärmetauscher.

### 6.3.3.2 Regelung der Hilfswärmepumpe

Die Hauptaufgabe der Hilfswärmepumpe ist es, den Wärmetransport (welcher durch die Mischung der Tankmedien entsteht) von den warmen Tanks zu den kalten Tanks zu kompensieren und damit die Temperaturspreizung zwischen oberen und unteren Tanks zu halten. Die Hilfswärmepumpe in der Anlage verfügt über einen variablen Drehzahlkompressor. Deshalb kann eine kontinuierliche Wärmestromregelung betrieben werden. Die minimale Wärmeleistung ist jedoch begrenzt, um einen Schaden des Kompressors zu vermeiden. Die Drehzahl des Kompressors wird anhand eines Frequenzumformers gesteuert, der zugelassene Intervall für die Frequenz  $f_{HWP}$  ist  $[0.7; 1]$ . Für die Wahl des Reglerkonzepts der Hilfswärmepumpe muss berücksichtigt werden, dass die Regelstrecke einerseits eine Totzeit aufweist und andererseits nichtlinear ist. Die Regelstrecke bzw. das Regelsystem der Hilfswärmepumpe ist in Abb. 6.20 veranschaulicht.

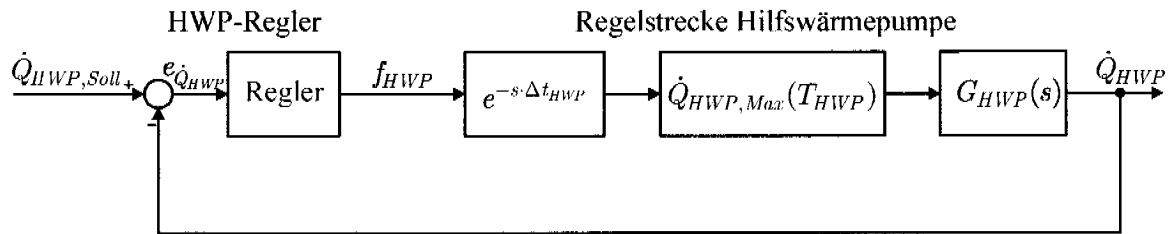


Abb. 6.20: Regelsystem für die Wärmestromregelung der Hilfwärmepumpe.

Dabei kann der dynamische Anteil der Regelstrecke mit einem linearen Tiefpassfilter erster Ordnung angenähert werden.

Die Nichtlinearität der Regelstrecke wird von der variablen Wärmepumpenkennlinie verursacht und ist hauptsächlich von der Soletemperatur am Eingang des Verdampfers abhängig. Um das nichtlineare Verhalten zu beseitigen, wird, wie bei der Wärmetauscherregelung, das Stellsignal des Wärmestromreglers mittels einer Skalierungsfunktion normiert. Letztere lautet:

$$e_{\dot{Q}_{HWP},skal} = \frac{\dot{Q}_{HWP,Nom}}{\dot{Q}_{HWP,Max}(T_{KS})} \cdot e_{\dot{Q}_{HWP}} \quad (\text{Gl. 6.18})$$

Die Funktion  $\dot{Q}_{HWP,Max}(T_{KS})$  entspricht der Wärmepumpenkennlinie bei maximaler Kompressordrehzahl ( $f_{HWP} = 1$ ), und  $T_{KS}$  ist die Temperatur im kalten Soletank bzw. am Eingang des Hilfwärmepumpen-Verdampfers.  $\dot{Q}_{HWP,Nom}$  ist eine nominelle Wärmepumpenwärmeleistung, welcher die Reglerparameter angepasst werden sollen.

Das gewählte Regelkonzept für die Hilfwärmepumpe ist ein „Smith-Prädiktor“ [15]. Diese Reglervariante wird auf Strecken mit Totzeiten angewendet. Die Übertragungsfunktion des Prozesses wird dabei als bekannt angenommen. Falls diese Übertragungsfunktion mit einem Tiefpassfilter erster Ordnung angenähert werden darf, reduziert sich das Reglersystem zu einem Prädiktiven PI-Regler (PPI). Letzterer ist in Abb. 6.21 dargestellt.

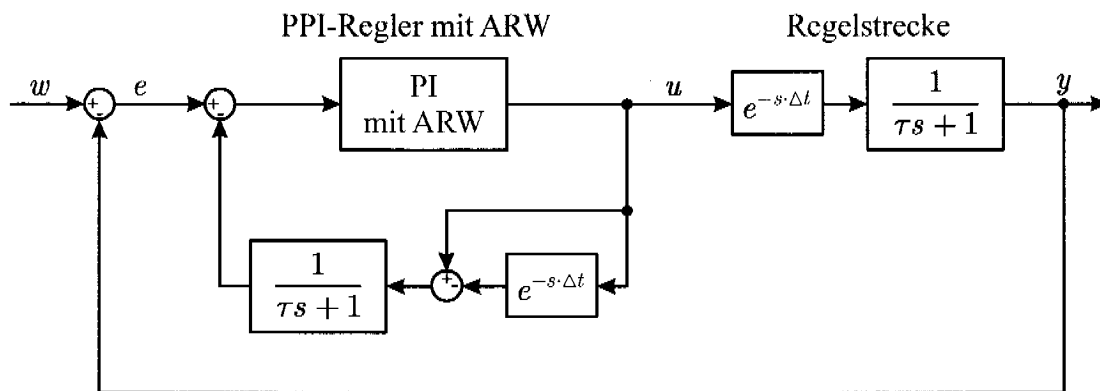


Abb. 6.21: Prädiktiver PI-Regler.

Dabei entspricht der PI-Regler mit ARW dem Signalflussbild in Abb. 6.13 mit  $K_D = 0$ . Die Parameter des PI-Anteils werden folgendermassen gewählt:

$$K_P = \frac{1}{\lambda} \quad K_I = \frac{K_P}{T_N} = \frac{1}{\lambda \cdot \tau}, \quad (\text{Gl. 6.19})$$

wobei  $T_N$  als Nachstellzeit definiert ist. Der Parameter  $\lambda$  ist der Einstellparameter im Regler und entspricht der Zeitkonstante des Regelsystems relativ zur Zeitkonstante der Regelstrecke  $\tau$ . Die gemessene Totzeit der Hilfswärmepumpe beträgt ungefähr 3.3 Sekunden und die Zeitkonstante 4.2 Sekunden [26]. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wahl von  $\lambda=2.2$  ein vernünftiges Regelverhalten liefert. Das Signalflussbild des gesamten Reglers ist in Abb. 6.22 dargestellt.

Die Hilfswärmepumpe wird ausgeschaltet, wenn bereits die Testwärmepumpe läuft, da der Wärmebedarf der Tanks von der Testwärmepumpe gedeckt wird. Für den Rest der Zeit muss die Hilfswärmepumpe eingeschaltet bleiben, um die Temperaturspreizung zwischen oberen und unteren Tanks zu halten. Im allgemeinen sind die Wärmestromsollwerte für die Hilfswärmepumpe tiefer als die minimale Hilfswärmepumpenleistung. Um im Mittel tiefere Wärmeleistungen von der Hilfswärmepumpe zu erhalten, wurde eine Lösungsvariante basierend auf der Pulsbreitenmodulation untersucht [26]. Diese wird jedoch für die Emulationen nicht eingesetzt, da die Pulsbreite nicht grösser als 5 Sekunden gewählt werden muss, um sinnvolle Regelungsergebnisse zu erhalten. In der Praxis kann jedoch diese Ein/Ausschaltfrequenz ziemlich schnell Schäden im Kompressor verursachen.

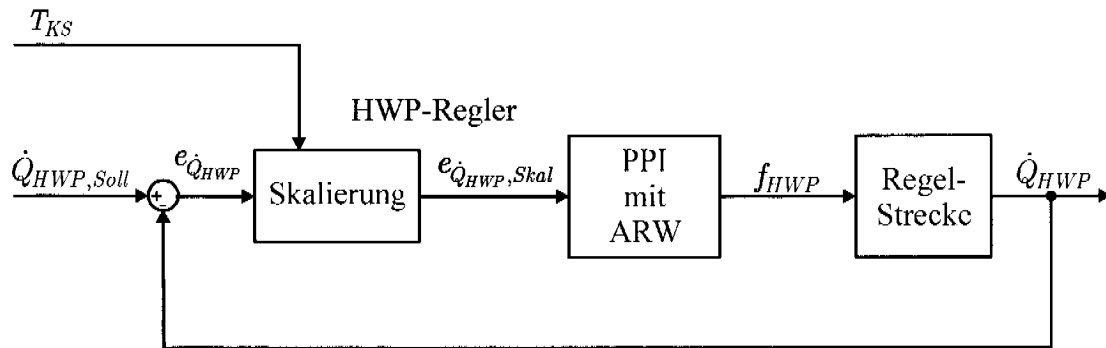


Abb. 6.22: Skalierter PPI-Regler mit ARW für die Wärmestromregelung der Hilfswärmepumpe.

### 6.3.4 Mischtemperaturregler

Der gewählte Regler für die Mischer Mi4 und Mi5, welcher die Temperatur der Flüssigkeiten am Eingang der Testwärmepumpe regeln soll, entspricht einem einfachen 3-Punkt-Regler. Diese Wahl ist damit begründet, dass schnelle Reaktionen der Mischventile bei sprunghaften Veränderungen der Temperatursollwerte gebraucht werden. Hingegen ist die Reaktionszeit eines Mischerreglers mit Pulsbreitenmodulation wie in Abschnitt 6.3.3.1 von der Pulsbreite begrenzt.

### 6.3.5 Resultate

In diesem Abschnitt werden die Resultate der Anlageregelung mit einer Emulation gezeigt. Für die Generierung der Temperatursollwerte am Eingang der Testwärmepumpe wurde ein Simulationsmodell einer Gebäudeheizung mit Erdwärmesonde verwendet. Die Abb. 6.23 zeigt die Resultate der Tanktemperaturregelung (Hauptregler) und der Mischtemperaturregelung.

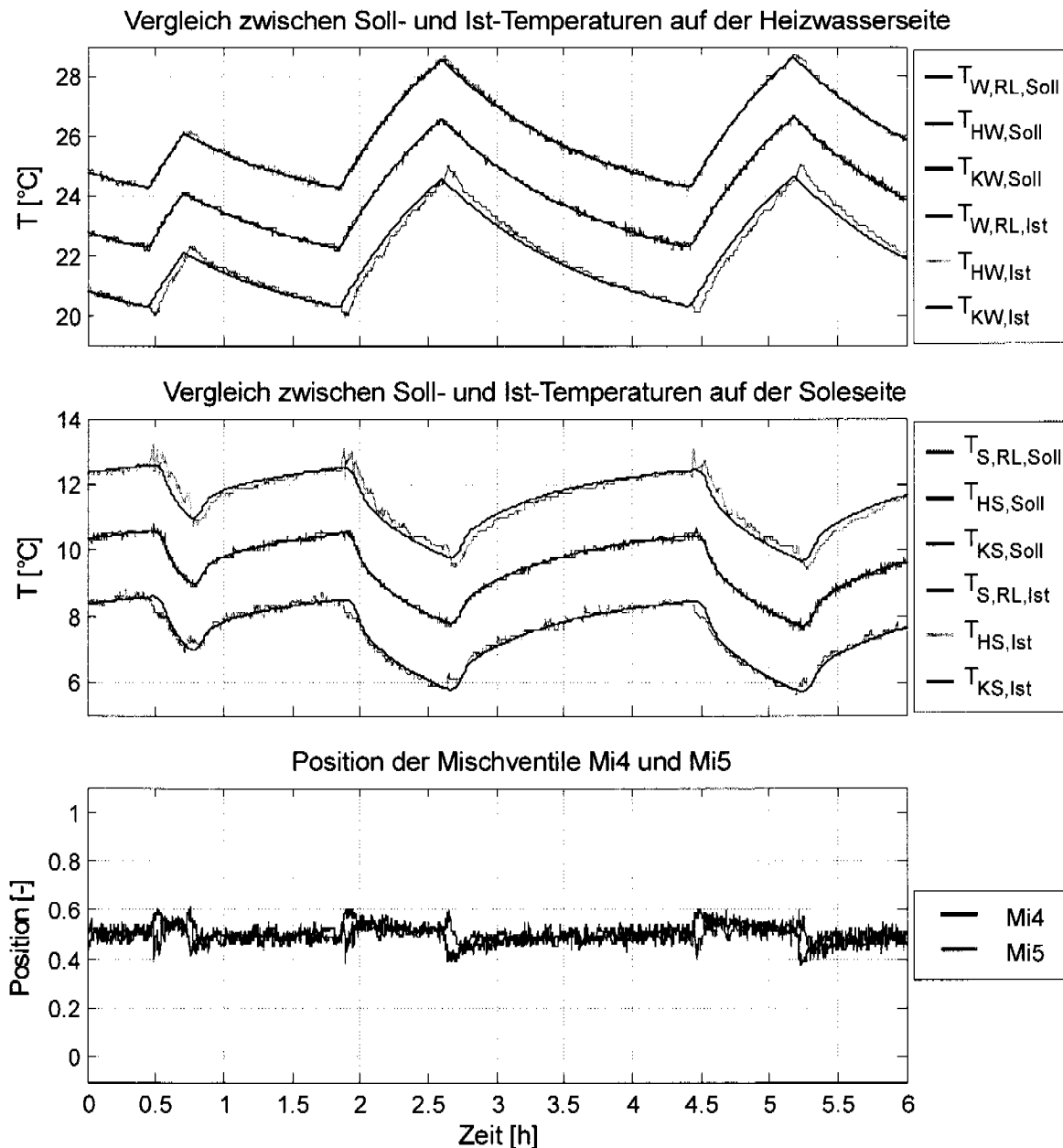


Abb. 6.23 Tanktemperaturregelung und Mischtemperaturregelung. Oberes Bild: Soll-/Ist-Vergleich der Temperaturen auf der Heizwasserseite, mittleres Bild: Soll-/Ist- Vergleich der Temperaturen auf der Soleseite. Unteres Bild: Position der Mischventile Mi4 und Mi5 (Regelung der Temperaturen am Eingang der Testwärmepumpe)

Die gewählte Tanktemperaturspreizung auf der Sole- bzw. Heizwasserseite beträgt jeweils 4 °C. Die Temperaturen auf der Heizwasserseite (Bild oben) und auf der Soleseite (mittleres Bild) werden von der Anlage mit einer guten Genauigkeit gehalten. Wie das untere Bild zeigt, müssen die Mischer Mi4 und Mi5 nur kleine Korrekturen an den Mischverhältnissen zwischen kaltem und

heissem Tank anbringen, um die Temperatursollwerte am Eingang der Testwärmepumpe zu halten.

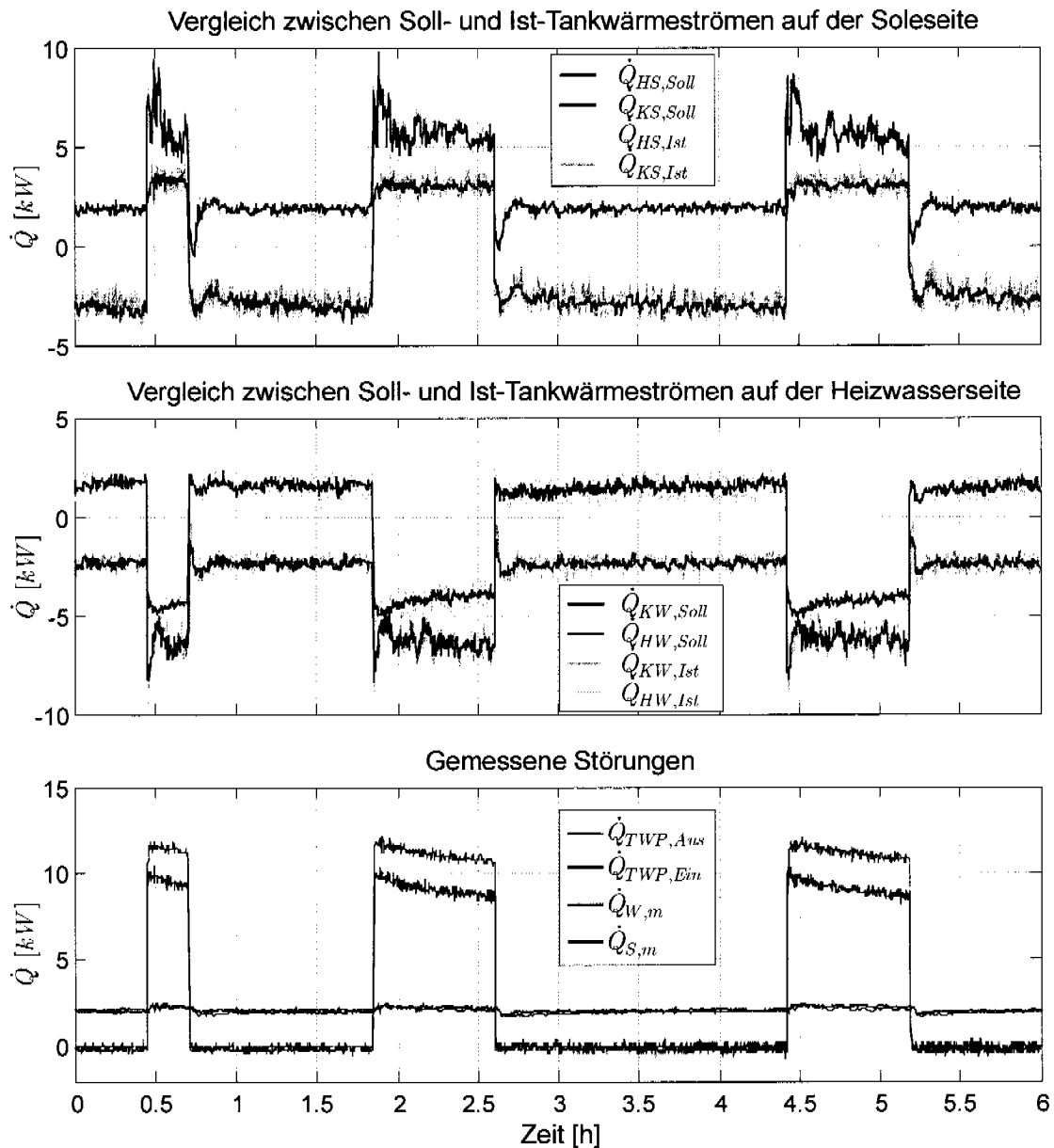


Abb. 6.24: Vergleich zwischen Soll-Tankwärmeströmen (aus dem Hauptregler) und effektiven Tankwärmeströmen (Resultate des untergeordneten Reglers). Oben: Tankwärmeströme auf der Solesseite. Mitte: Tankwärmeströme auf der Heizwasserseite. Unten: Störwärmeströme der Testwärmepumpe und der Mischung der Tankmedien.

Auch der untergeordnete Regler kann die Wärmestromsollwerte der Tanks gut halten. Die Störungen der Testwärmepumpe (Steueranteil im Tanktemperaturregler) können in der Anlage kompensiert werden. Man beachte, dass die Sollwerte für den warmen Soletank bzw. für den kalten Wassertank (obere



Seite der Anlage, vgl. Abb. 6.7) während der ganzen Emulation positiv bzw. negativ bleiben. Das bedeutet, dass die unidirektionale Wärmestromregelung mit den Wärmetauschern WT3, WT2 und WT4 für die oberen Tanks genügt. Die positiven Sollwärmeströme auf der Heizwasserseite bzw. die negativen Sollwärmeströme auf der Soleseite können (aktiv) nur mittels der Hilfwärmepumpe erreicht werden. Die Abbildung zeigt, dass die Hilfwärmepumpe nur gebraucht wird, wenn die Testwärmepumpe ausgeschaltet ist.

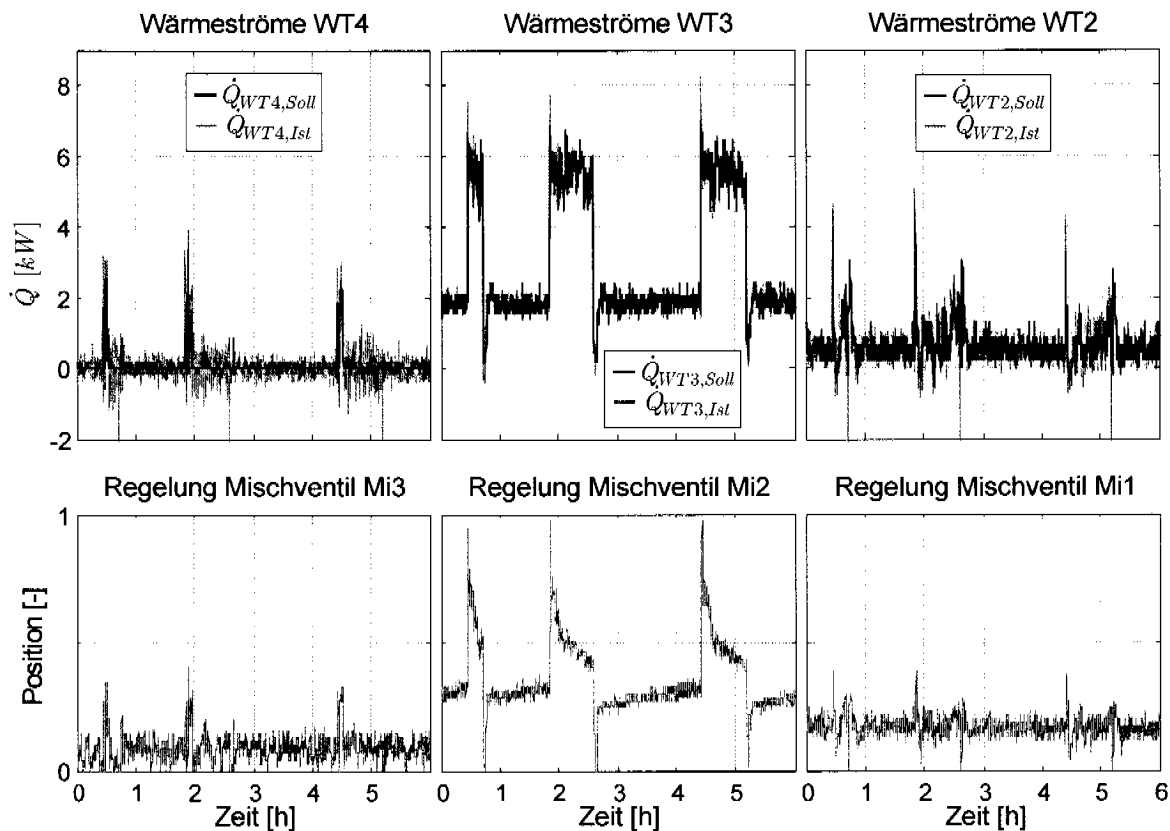


Abb. 6.25: Wärmestromregelung in der oberen Seite der Anlage (vgl. Abb. 6.7). Obere Bilder: Soll-/Ist-Vergleich der Wärmeströme der Wärmetauscher WT2, WT3 und WT4. Untere Bilder: Mischerposition in der oberen Seite der Anlage (untergeordnete Regelung).

Weiter sind in Abb. 6.25 und Abb. 6.26 die Wärmestromverläufe der einzelnen Wärmetauscher bzw. der Hilfwärmepumpe gezeigt. In Abb. 6.25 wird die Situation für die obere Seite der Anlage dargestellt (vgl. Abb. 6.7 und (Gl. 6.11)). Der grösste Anteil der Wärme kann anhand des Wärmetauschers WT3 wieder in der Anlage zurückgeführt werden. Der bleibende Wärmestromfehler in den oberen Tanks wird mittels der Wärmetauscher WT4 und WT2 kor-

rigiert. Der grössere Betrag des Wärmestromsollwerts für die Heizwasserseite (der Wärmestromsollwert für WT2 ist im Mittel grösser als Null) ist damit zu begründen, dass die Test- und Hilfs-Wärmepumpen grössere Leistungen in die Heizwasserseite liefern. Die beobachtete Position der Mischventile (untere Bilder in Abb. 6.25) zeigt, dass der grösste Teil der Wärmestromregelung hauptsächlich von Mi2 bzw. WT3 durchgeführt wird. Die Abb. 6.26 zeigt die Wärmestromregelung für die untere Seite der Anlage (vgl. Abb. 6.8 und (Gl. 6.13)). Der Soll-/Ist-Vergleich der Wärmeströme für die Hilfswärmepumpe zeigt deutlich, dass die minimale Wärmeleistung der Hilfswärmepumpe höher als die mittleren Sollwerte liegt. Als Resultat bleibt der Kompressor ständig auf der minimalen Drehzahl. Der überschüssige Hilfswärmepumpenwärmestrom wird von den Wärmetauschern WT1 und WT5 korrigiert.

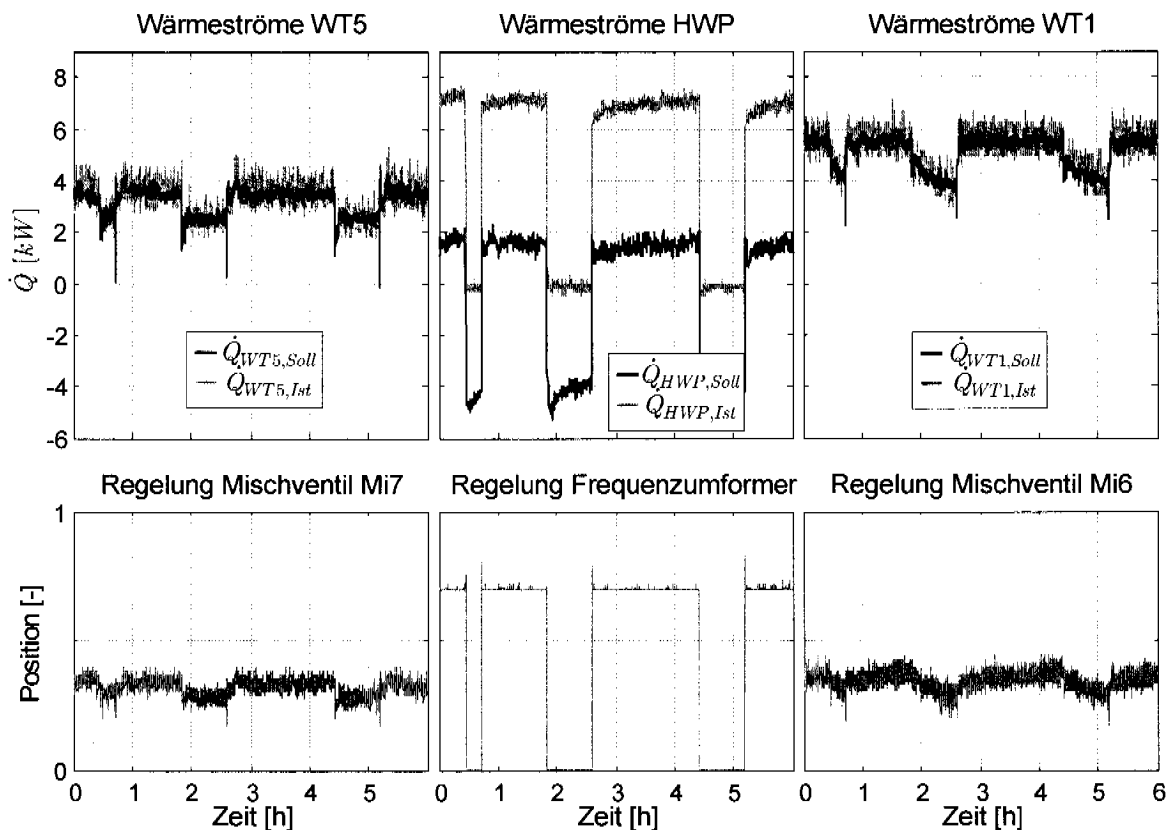


Abb. 6.26: Wärmestromregelung in der unteren Seite der Anlage (vgl. Abb. 6.8). Obere Bilder: Soll-/Ist-Vergleich der Wärmeströme der Wärmetauscher WT1, WT5 und der Hilfswärmepumpe. Untere Bilder: Mischerposition in der unteren Seite der Anlage (untergeordnete Regelung) und Sollfrequenz für den Kompressor der Hilfswärmepumpe.

## 6.4 Simulationsmodelle für die Emulation

Um die Emulation einer Kleinwärmepumpenanlage im Prüfstand zu ermöglichen, werden die Simulationen des thermischen Verhaltens des Gebäudes und der Erdwärmesonde gebraucht. Diese Modelle sollen synchron mit der Testwärmepumpe laufen, damit die Echtzeit-Emulation ermöglicht wird. Um einen fairen Vergleich zwischen Wärmepumpenreglern durchzuführen, sollen zusätzlich die wichtigen Grössen im Simulationsmodell (Raumlufthtemperatur, effektive Wärmeverluste usw.) während der Gesamtemulation erfasst werden.

Sowohl das Gebäudeheizungsmodell als auch das Modell des Speichers für die Warmwasseraufbereitung sind mit dem CARNOT-Blockset [36] implementiert. CARNOT ist ein spezielles Tool für die Modellierung thermodynamischer und physikalischer Vorgänge mit Matlab. Dabei wird jedes Objekt (wie z.B. die Wand, der Raum, der Fussboden usw.) durch ein Modul repräsentiert, welches die komplexen Differentialgleichungen für die Beschreibung des physikalischen Verhaltens enthält. Die Interaktionen zwischen den Bausteinen werden anhand von speziellen Vektoren ermöglicht, die die wichtigen Informationen wie die Wärmeströme und die Temperaturen enthalten. Eine genauere Beschreibung des CARNOT-Konzepts und der wichtigsten Bausteine, welche für die Modellierung der Kombianlage gebraucht wurden, befindet sich im Anhang A.

Das gewählte Modell für die Erdwärmesonde wurde hingegen am Institut für Mess- und Regeltechnik aus der Idee in [18] entwickelt und mit der „Simulink Toolbox“ in Matlab implementiert.

### 6.4.1 Das Gebäude

Das gewählte Gebäudemodell entspricht der Referenzanlage Winterthur-Seen. Das Wärmeabgabesystem besteht aus 2/3 Fussbodenheizung und 1/3 Heizkörperheizung, und damit die Sonnenstrahlungseffekte besser modelliert werden, wird das Gebäude in zwei Räume unterteilt. Der erste Raum modelliert diejenigen Zimmer der Referenzanlage, welche eher gegen Süd-West orientiert sind und wegen den grossen Fensterflächen mehr von der Sonnenstrahlung beeinflusst werden. Der zweite Raum fasst die Zimmer auf der Nord-Ost-Seite zusammen, welche von der Sonnenstrahlung wenig oder kaum beeinflusst werden. Beide Räume sind durch eine innere Wand getrennt. Zusätzlich wird das Gebäudemodell durch einen Keller mit konstanter Tempe-

ratur ergänzt, um die Wärmeverluste im Wärmeabgabesystem zu modellieren (Abb. 6.27).

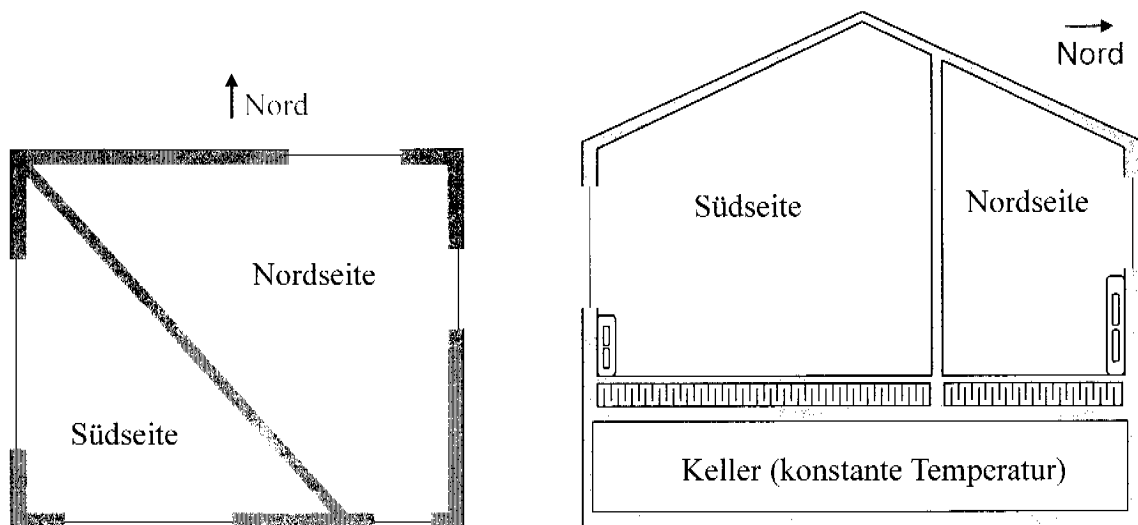


Abb. 6.27: Schema der Raumverteilung für das Gebäudemodell

In Abb. 6.28 sind die Wechselwirkungen zwischen den „Objekten“ im Gebäudemodell ohne Heizung dargestellt. Im CARNOT-Blockset wird die Temperatur der Raumluft in die homogene Strahlungstemperatur und die konvektive Temperatur ( $T_{R,Rad}$  und  $T_{R,Konv}$ ) aufgeteilt [9]. Die erstere wird von der Wärmestrahlung beeinflusst (Sonnenstrahlung und langwellige Strahlung) und die letztere hängt von den konvektiven Wärmeströmen ab. Dabei werden drei Wärmetransportarten definiert:

- Langwellige Strahlungs-Wärmeübertragung
- Kurzwellige Strahlungs-Wärmeübertragung (Sonnenstrahlung)
- Konvektive Wärmeübertragung.

Die Sonnenstrahlung wird einerseits von der Aussenwand absorbiert und fließt andererseits durch die Fenster in den Fussboden. Im Unterschied zum Vorschlag des CARNOT-Blocksets wird im Modell der Referenzanlage Winterthur-Seen ein Teil der Sonnenstrahlung auch im Raum zugeführt, damit der momentane Sonnenstrahlungseffekt besser modelliert wird (vgl. Abb. 6.28). Die Intensität der Strahlung wird in Abhängigkeit der Position der Wand bzw. Fussboden und der Sonne berechnet.

Der langwellige Strahlungswärmestrom entspricht der Emission der Objekt-oberflächen. Dabei wird die Wärmestrahlung zwischen Raum und Innenwän-

den bzw. Fussboden und zwischen Aussenwänden und Luft bzw. Raumluft modelliert. Von Bedeutung im Modell ist die Abstrahlung vom Gebäude in den Himmel.

Der konvektive Wärmestrom entspricht der Wärmeleitung zwischen den Objekten, welche miteinander in Kontakt sind.

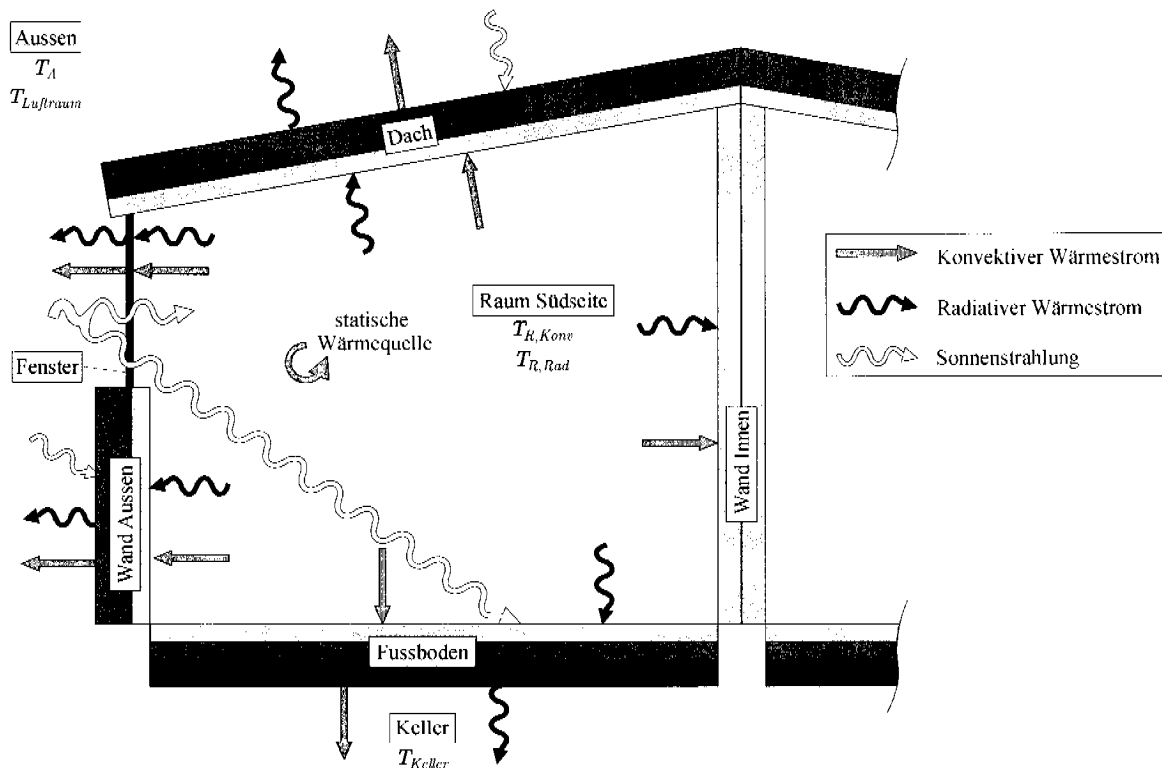


Abb. 6.28: Wechselwirkung zwischen den Objekten (vom CARNOT-Blockset) im Hausmodell (ohne Heizung).

Die Wärmegewinne, welche von der diffusen Sonnenstrahlung, der Küche, dem Cheminée und den Personen verursacht werden, werden als Wärmequelle mit konstantem konvektivem Wärmeleistungsbetrag modelliert. Die Gewinne der direkten Sonnenstrahlung werden separat modelliert. Der gewählte Tagesenergiegewinn für das gesamte Gebäudemodell lautet:

$$E_{\text{Gewinn}} = 36 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{Tage}} \right] \quad (\text{Gl. 6.20})$$

Für die Raumlufthausteine werden im Gebäudemodell folgende Parameter gewählt:

Tabelle 6.1: Gewählte Parameter für die Raumknoten des Gebäudemodells  
(Volumen basierend auf den Bauplänen der Referenzanlage Winterthur-Seen)

	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Zeitkonstante [s]
<b>Raum Südseite</b>	240	3600
<b>Raum Nordseite</b>	300	3600

Die Zeitkonstante entspricht dem Parameter des Tiefpassfilters für die Filterung der Wärmeleistungen in den und aus dem Raum. Diese wird absichtlich so hoch gewählt, damit das Gesamtmodell bei der zeitdiskreten Echtzeitauswertung stabil bleibt.

Die Wärmeleitung in den Wänden (sowie im Dach und Fussboden) wird mit dem Beuken-Modell berechnet [36]. Dabei wird die Wand in Schichten aufgeteilt, welche sich durch Dicke und Materialeigenschaften unterscheiden. Die gewählten Flächen des Modells der Referenzanlage Winterthur-Seen sind in Tabelle 6.2 dargestellt:

Tabelle 6.2: Gewählte Flächen für die Aussenwände und das Dach des Gebäudemodells  
(basierend auf den Bauplänen der Referenzanlage Winterthur-Seen)

	Südseite		Nordseite	
	Wand [m <sup>2</sup> ]	Fenster [m <sup>2</sup> ]	Wand [m <sup>2</sup> ]	Fenster [m <sup>2</sup> ]
<b>West</b>	60	18	-	-
<b>Süd</b>	30	21	30	6
<b>Ost</b>	-	-	36	3
<b>Nord</b>	-	-	60	4
<b>Dach</b>	100	-	83	-

Sämtliche Aussenwände und das Dach werden mit zwei Schichten modelliert und besitzen gleiche Materialkonstanten und Dicken. Die spezifische Leitfähigkeit, die Dicke und die Fläche bestimmen die statische Kennlinie des Gebäudes, hingegen hängt die Trägheit des Gebäudemodells hauptsächlich von der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte der Wand bzw. des Daches ab.

Tabelle 6.3: Gewählte Materialkonstanten für die Aussenwände / das Dach des modellierten Gebäudes

	Dicke [m]	Spez Leitfähigkeit [W/(m.K)]	Spez. Kapazität [J/kg.K]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Schicht 1	0.1	0.11	0.18	900
Schicht 2	0.35	0.78	0.18	1800

Das Heizungssystem besteht aus einer hydraulischen Schaltung, welche einen Teil des Heizwassers in die Heizkörper und den anderen Teil in den Fussboden verteilt. Der Zwischenspeicher im Heizwasserkreislauf (vgl. Abb. 1.4) wird nicht modelliert, dafür wird die Fussbodenheizung des Modells träger gewählt. Wie die Abb. 6.29 zeigt, wird das Heizwasser mit einem Ventil gleichmässig in den zwei Räumen verteilt. Dabei wird die Leistung in beiden Räumen auf 1/3 Heizkörperheizung und 2/3 Fussbodenheizung aufgeteilt. Der Massenstrom des Heizwassers entspricht dem echten (gemessenen) Heizwassermassenstrom durch die Testwärmepumpe in der Anlage.

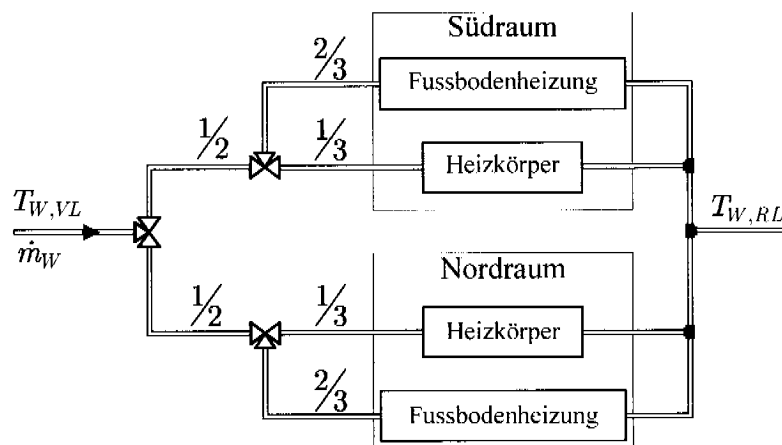


Abb. 6.29 Wärmeabgabesystem im Gebäudemodell der Referenzanlage Winterthur-Seen

Weiter sind in Abb. 6.30 das Schema der Fussboden- und der Heizkörperheizung dargestellt. Die Fussbodenheizung wird als Speicher mit uniformer Temperatur  $T_{RL,FB}$  und Masse  $m_{FB}$  modelliert. Die Wärme wird im Fussboden von einer sogenannten aktiven Schicht absorbiert und mit dem Beuken-Modell (Wandmodellierung) im Fussbodenbaustein berücksichtigt. Der Fussboden wird mit drei Schichten modelliert. In der mittleren Schicht wird die Wärme des Heizwassers zugeführt. Die Materialeigenschaften des Fussbodens sind in Tabelle 6.4 zusammengestellt.

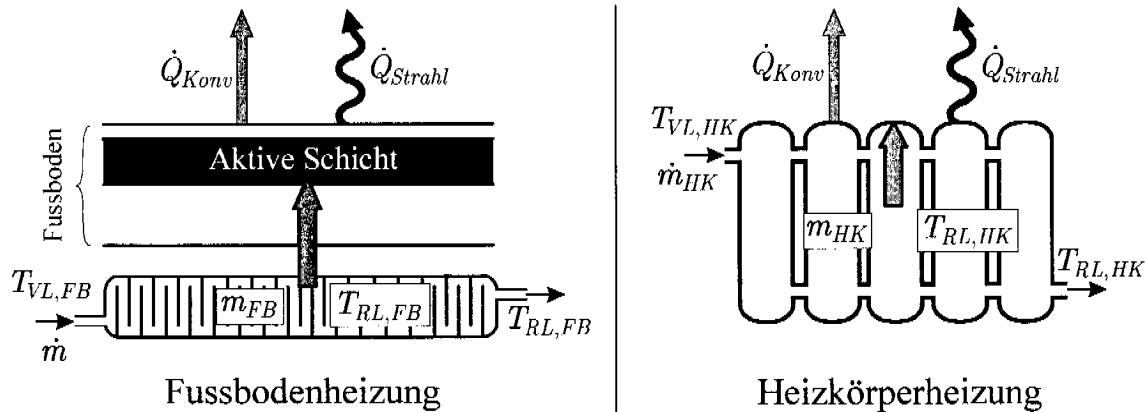


Abb. 6.30: Konzept des Fussbodenheizungs- (links) und des Heizkörperbausteins (rechts) in CARNOT

Die identifizierten Parameter der Fussbodenheizung für den Raum auf der Südseite und der Nordseite sind in Tabelle 6.5 dargestellt. Diese beeinflussen hauptsächlich das Verhalten des Heizwassers und nur minim die statische Kennlinie des Gebäudes (nur durch die Wärmeverluste in den Keller).

Tabelle 6.4: Gewählte Materialkonstanten für den Fussboden des Gebäudemodells

	Dicke [m]	Spez Leitfähigkeit [W/(m.K)]	Spez. Kapazität [J/kg.K]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Schicht 1</b>	0.015	1.4	0.28	2000
<b>Schicht 2</b>	0.15	0.79	0.5	1800
<b>Schicht 3</b>	0.1	0.05	0.28	1200

Tabelle 6.5: Gewählte Parameter für die Fussbodenheizung des modellierten Gebäudes

	Südseite	Nordseite
<b>Fläche Fussbodenheizung</b>	144 [m <sup>2</sup> ]	120 [m <sup>2</sup> ]
<b>Wärmeleitung Heizwasser → Fussboden</b>	2000 [W/m <sup>2</sup> ]	1000 [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Heizwassermasse Fussboden</b>	550 [kg]	420 [kg]

Ähnlich wird auch der Heizkörper als Speicher mit uniformer Temperatur  $T_{RL,HK}$  und Masse  $m_{HK}$  modelliert, das Heizkörperschema ist im rechten Bild von Abb. 6.30 gezeigt. Die Wärmeübertragung findet direkt mit dem Raum statt. Die nominelle Wärmeleistung in Tabelle 6.6 bezieht sich auf die nominelle Temperaturdifferenz zwischen Heizwasser und Raum.



Tabelle 6.6: Gewählte Parameter für die Heizkörperheizung des modellierten Gebäudes

	Südseite	Nordseite
<b>Heizwassermasse Radiator</b>	60 [kg]	60 [kg]
<b>Nominelle Wärmeleistung Heizkörper → Raum</b>	570 [W]	570 [W]
<b>Nominelle Temperaturdifferenz</b>	15 [°C]	15 [°C]

### 6.4.1.1 Validierung

Für die Validierung des Modells wurden die Messdaten aus [13] verwendet. Da die Anzahl Parameter des Modells sehr hoch ist, mussten die Parameter des Gebäudes zuerst vernünftig gruppiert werden. Die Anfangsschätzungen der Dimensionen der Wände, der Fenster und des Fussbodens wurden anhand der Hauspläne bestimmt. Andere Größen wie z.B. die Materialeigenschaften der Wände und des Fussbodens wurden aus dem CARNOT-Blockset übernommen. Die Anpassung der Simulationsergebnisse an die Messungen wurde anhand eines numerischen Minimierungsalgorithmus durchgeführt. Die Ergebnisse der Parameteridentifikation für die wichtigsten Parameter des Modells sind bereits in Tabelle 6.1-Tabelle 6.6 zusammengefasst.

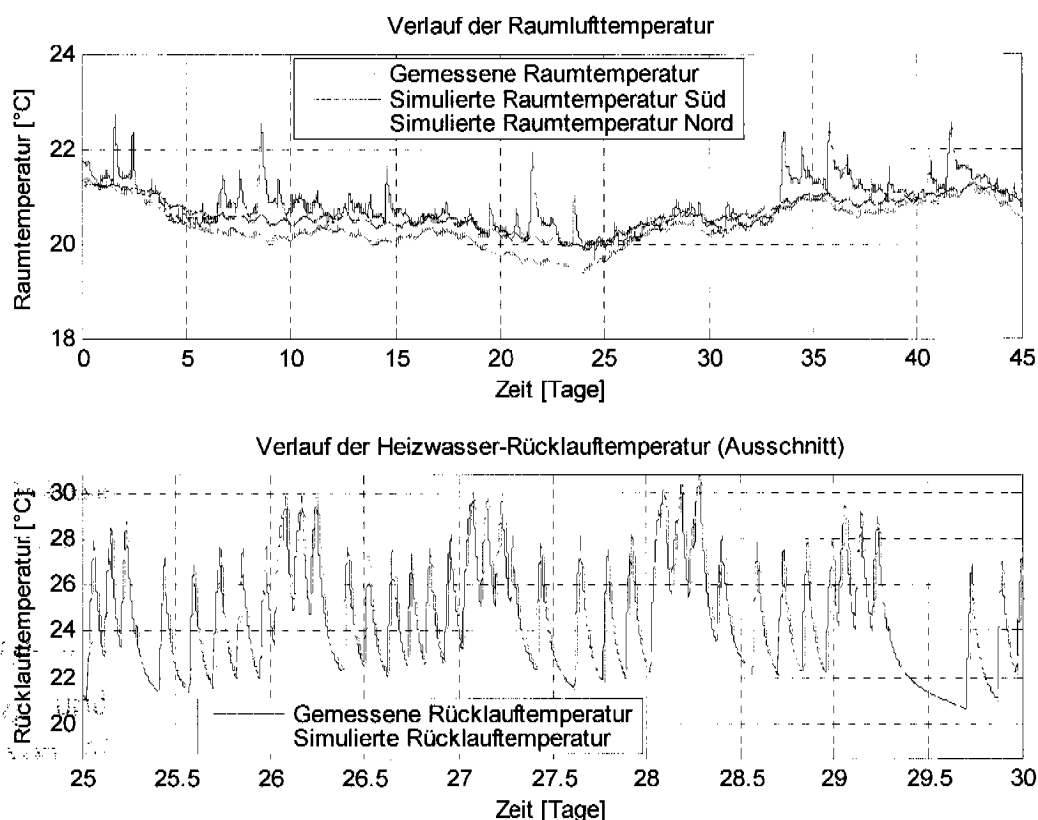


Abb. 6.31: Vergleich zwischen Simulationen und Messungen an der Referenzanlage Winterthur-Seen (Messreihe 20.11.00–4.1.01)

Abb. 6.31 zeigt die Resultate des Simulationsmodells mit den optimierten Parametern im Vergleich zu den realen Messungen. Als Eingangssignale für das CARNOT-Modell wurden die Aussentemperaturen und Vorlauftemperaturen der Messreihe verwendet. Die direkte Sonnenstrahlung wurde im Modell nicht betrachtet, da keine Messungen der Strahlung vorlagen.

Weiter ist in Abb. 6.32 die geschätzte Energiekennlinie (vgl. Energiekennlinienbasierter Regler, Abschnitt 5.2) des Simulationsmodells für die Sollraumtemperatur von 21°C im Vergleich zu den Messdaten aus [13] dargestellt. Da die Tagesenergiewerte der realen Messdaten im allgemeinen nicht einer konstanten Raumtemperatur von 21°C entsprechen, sind die Aussentemperaturpunkte der Messungen auf eine theoretische Ist-Raumtemperatur von 21°C korrigiert (lineare Korrektur, in Übereinstimmung mit (Gl. 5.1)).

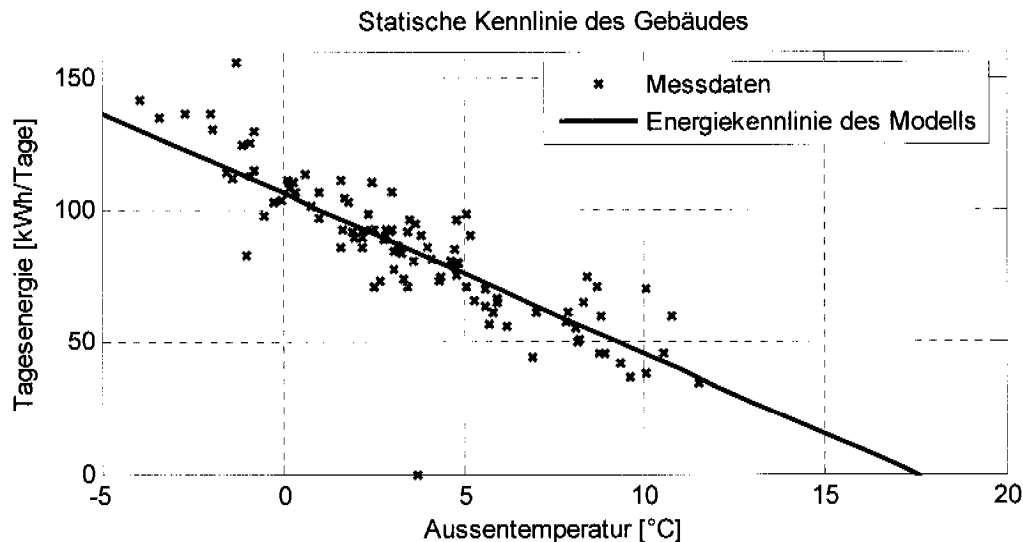


Abb. 6.32: Vergleich zwischen geschätzter Energiekennlinie des Simulationsmodells und gemessenen Tagesenergiewerten aus der Heizperiode 20.11.00 - 4.1.01 und 17.1.01 - 13.3.01. Die Messwerte sind auf eine hypothetische Raumtemperatur von 21 °C korrigiert.

## 6.4.2 Der Speicher

Das Modell für die Emulation der Warmwasseraufbereitung entspricht einem Speicher mit externem Wärmetauscher und reproduziert die Stufenladung bzw. Schichtentladung (wie in Abschnitt 4.2 beschrieben). Die gewählte hydraulische Schaltung entspricht dem Schema in Abb. 4.17. Der Speicher und der externe Wärmetauscher werden ebenfalls mit dem CARNOT-Blockset modelliert. Die Warmwassertemperatur wird in der horizontalen Richtung uniform angenommen. Der Speicher wird in mehrere horizontale Schichten

aufgeteilt. Für jeden Knoten wird die Temperatur anhand einer Energiebilanz bestimmt [36, 44].

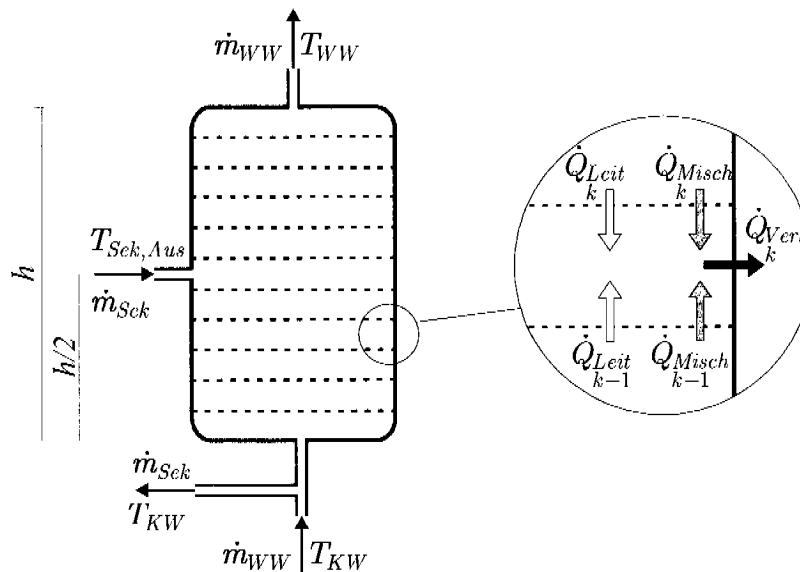


Abb. 6.33: Modellierung des Speichers für die Warmwasseraufbereitung

Der resultierende Wärmestrom in jeden Knoten entsteht aus der Summe folgender thermischen Effekte:

- Axiale Wärmeleitung  $\dot{Q}_{Leit}$ : modelliert den Wärmestrom zwischen Knoten, welcher von der Leitung verursacht wird.
- Massentransport-Wärmestrom  $\dot{Q}_{Misch}$ : Diese Wärmeströme werden vom Warmwassermassenstrom während der Speicherladung bzw. dem Warmwasserverbrauch verursacht.
- Wärmeverlust  $\dot{Q}_{Verl}$ : Modelliert die Verluste an die Umgebung.

Für die Dimensionierung des Speichers werden die Überlegungen von Abschnitt 4.2.1.1 betrachtet. Die wichtigen Parameter sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 6.7: Wichtige Parameter für das Speichermodell

#### Speichermodell

<b>Kapazität</b>	400 [l]
<b>Schichten</b>	200 [#]
<b>Entnahme / Einspeisung Sekundärseite</b>	0 / 50 [% der Speicherhöhe]
<b>Entnahme / Einspeisung Warmwasser</b>	100 / 0 [% der Speicherhöhe]

Um die Schichtentladung und Stufenladung nachvollziehen zu können, soll eine grosse Anzahl Schichten gewählt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass mit 200 Schichten die schnellen Dynamiken im Speicher vom Modell gut reproduziert werden. Um die Schichtentladung bzw. Stufenladung zu beobachten, werden die simulierten Warmwassertemperaturen auf 10 Speicherhöhen gemessen. Für die Regelung der Warmwasseraufbereitung wird jedoch nur ein Sensor auf 7/10 der Speicherhöhe zur Verfügung gestellt.

Der Wärmetransport im Plattenwärmetauscher wird mittels einer nominellen Wärmeleitung (welche als einstellbarer Parameter definiert ist) bestimmt und zu den aktuellen Massenströmen auf der Primär- und der Sekundärseite korrigiert. Um die Kapazität des Wärmetauschers zu berücksichtigen, werden das Heizwasser auf der Primärseite und das Warmwasser auf der Sekundärseite des Wärmetauschers als Speicher mit uniformer Temperatur modelliert. Die Wärmeübertragung von der Primärseite auf die Sekundärseite findet jeweils in den Ausgängen der Speicher statt (vgl. Abb. 6.34).

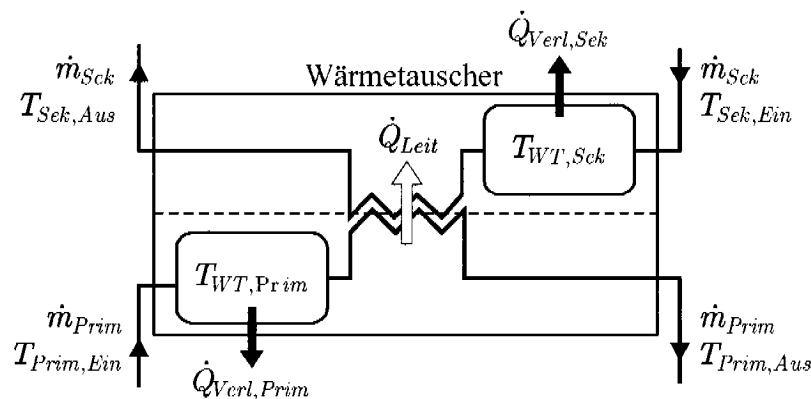


Abb. 6.34: Schema des Plattenwärmetauschermodells.

Für die Dimensionierung des Modells wurden die physikalischen Parameter des externen Plattenwärmetauschers „Danfoss XB 20-1-40“ übernommen. Die wichtigsten Einstellwerte sind in der Tabelle auf der folgenden Seite zusammengefasst:

Tabelle 6.8: Wichtige Parameter für das Wärmetauschermodell

**Modell des externen Plattenwärmetauschers**

Typ	Gegenstrom
Nominelle Wärmeleitung:	$3500 \cdot 1.4$ [W/K]
Nomineller Massenstrom (Prim. und Sek. Seite):	0.5 [kg/s]
Wärmekapazität	$10 \cdot 500$ [J/K]
Durchfluss Primärseite	Gemessen (Anlage)
Durchfluss Sekundärseite	0.5 [kg/s]

**6.4.2.1 Simulationsresultate**

Die ersten Versuche in Abb. 6.35 zeigen das Verhalten des Speichermodells mit konstantem Warmwasserverbrauch. Das Modell kann bei einem Entladungszyklus mit einem konstanten Warmwasserverbrauch von 1.2 l/Min die Schichtentladung gut reproduzieren (Abb. 6.35 rechts). Wegen der Warmwasserverwärmung in axialer Richtung und den Wärmeverlusten im Speicher ist bei einem kleineren (eher unrealistischen) Warmwasserverbrauch (Abb. 6.35 links, 0.2 l/Min) die Schichtentladung schwächer.

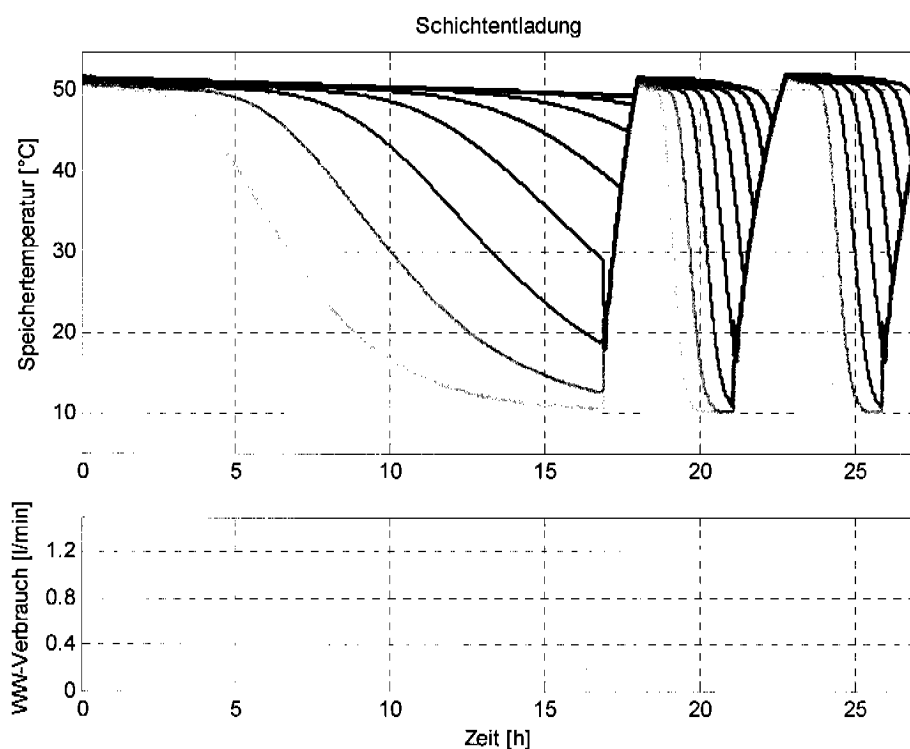


Abb. 6.35 Simulationsresultate der Schichtentladung im Warmwasserspeicher.  
Bei den Stunden 17, 21 und 26 wird der Speicher geheizt.

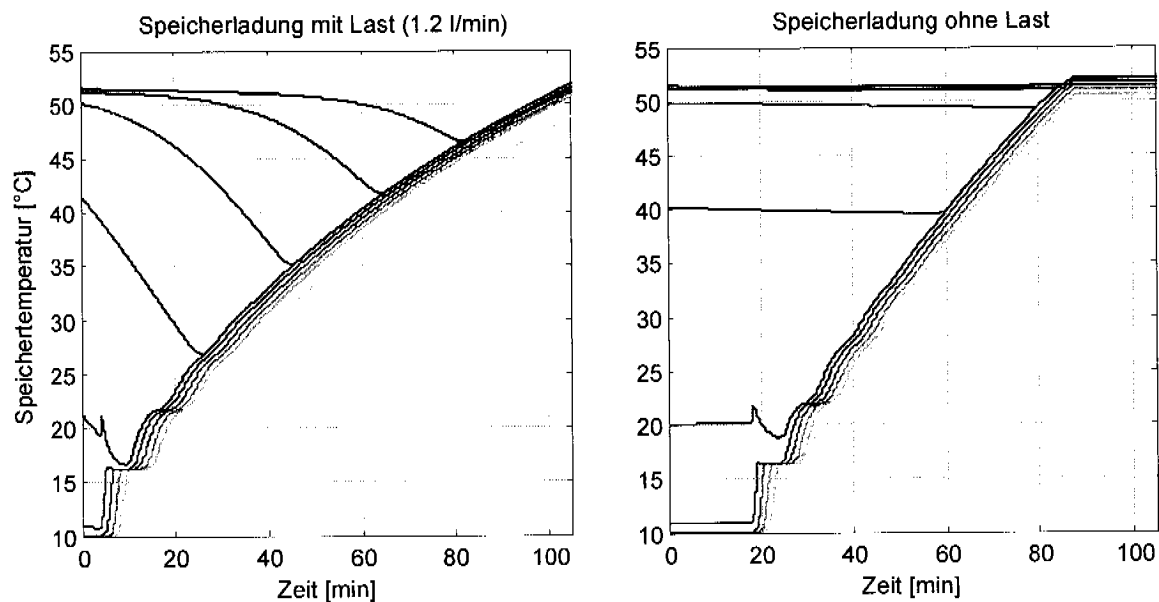


Abb. 6.36: Simulation der Stufenladung im Speicher mit (links) und ohne (rechts) Verbrauch.

Die Stufenladung des Speichers ist in Abb. 6.36 links (mit Last) und rechts (ohne Last) dargestellt. Die ersten drei Durchgänge sind in beiden Fällen erkennbar, dann wachsen die Speichertemperaturen konstant. Ähnliche Resultate werden auch mit anderen Modellparametern erhalten. Wie in Abschnitt 4.2.1.1 erwähnt und in Abb. 4.16 gezeigt wird, ist die Temperaturdifferenz auf der Primär- bzw. Sekundärseite des Plattenwärmetauschers von den gewählten Massenströmen abhängig, d.h. je kleiner der Massenstrom ist, desto höher ist die Temperaturdifferenz der Stufen.

Das Verhalten des Speichermodells ist im Grossen und Ganzen gut und kann mit den Resultaten aus [3, 43] verglichen werden. Eine genaue Validierung sämtlicher Temperaturen im Speicher ist jedoch wegen der Komplexität des Systems nicht möglich. Die Abb. 6.37 zeigt die simulierten Speichertemperaturen mit einem realen Warmwasserverbrauchsverlauf. Da die Anregungen stärker sind als jene in Abb. 6.35, ist die Schichtentladung besser sichtbar. Die axiale Wärmeleitung des Warmwassers im Speicher ist klar ersichtlich, wenn kein Warmwasserverbrauch stattfindet (Tag 2 in Abb. 6.37).

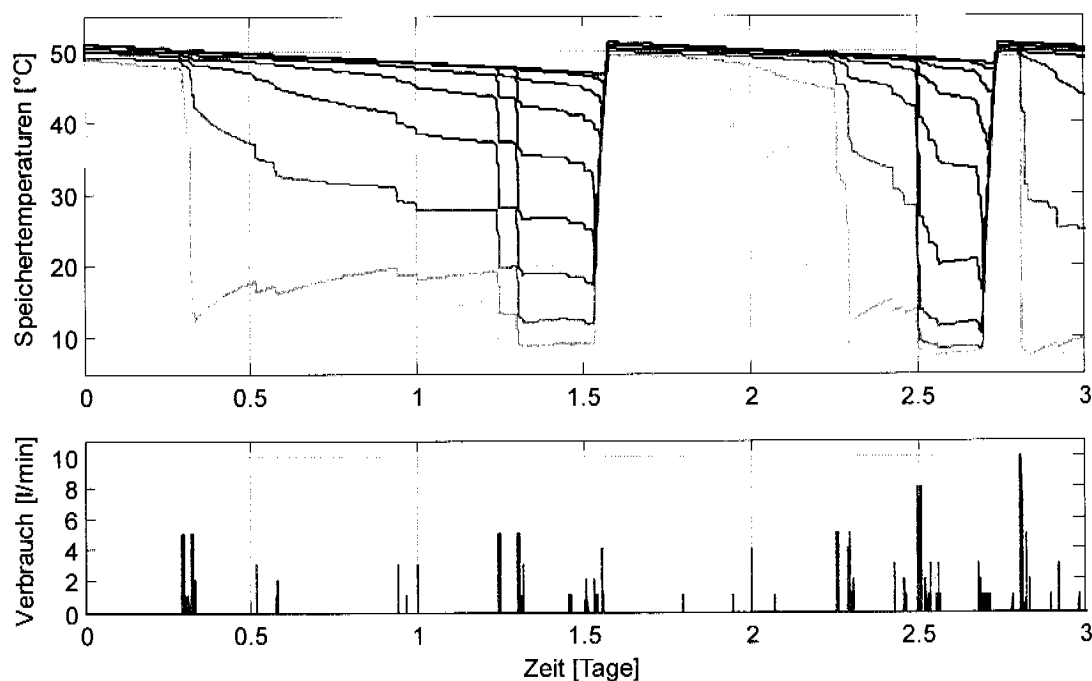


Abb. 6.37: Simulation der Speichertemperaturen mit einem echten Verbrauchsverlauf.

### 6.4.3 Die Erdwärmesonde

Da am Prüfstand eine Sole/Wasser-Wärmepumpe eingesetzt wird, wird für die Emulationen auch das Modell einer Erdwärmesonde benötigt. Es soll den Verlauf der Sole am Eingang der Testwärmepumpe emulieren. Die ausgewählte Modellierungslösung entspricht dem Vorschlag aus der Arbeit in [18], welcher im Rahmen des BFE-Projekts „Berechnungsmodul für Erdwärmesonden“ entwickelt wurde. Der ausgewählte Erdsondetyp ist eine Doppel-U-Sonde mit einer Länge von 50-250 m.

Das Modell berechnet das Verhalten der Sonde und der Erde im Nahbereich. Dabei werden das Erdemodul und das Solemodul separat ausgewertet. Die Kopplung zwischen beiden Modulen wird jeweils nur bei der Berechnung der Randbedingungen betrachtet. Um die Auswertungen mit einem numerischen Programm zu ermöglichen, werden die radialen Ortskoordinaten diskretisiert. Das ganze Sondenmodul wird in Schichten in axialer Richtung aufgeteilt, zusätzlich wird die Erde im Nahbereich noch in Schichten in radialer Richtung aufgeteilt, so dass verschiedene Materialeigenschaften im Erdnahbereich berücksichtigt werden können. Als Vereinfachung werden die Wärmeleitungen in der Erde als eindimensional modelliert, d.h. der Wärmetransport findet nur in radialer Richtung statt. Hingegen findet im Sondenmodul die Wärmeüber-

tragung sowohl von der Erde in radialer Richtung als auch in der Sole durch den Massentransport in axialer Richtung statt.

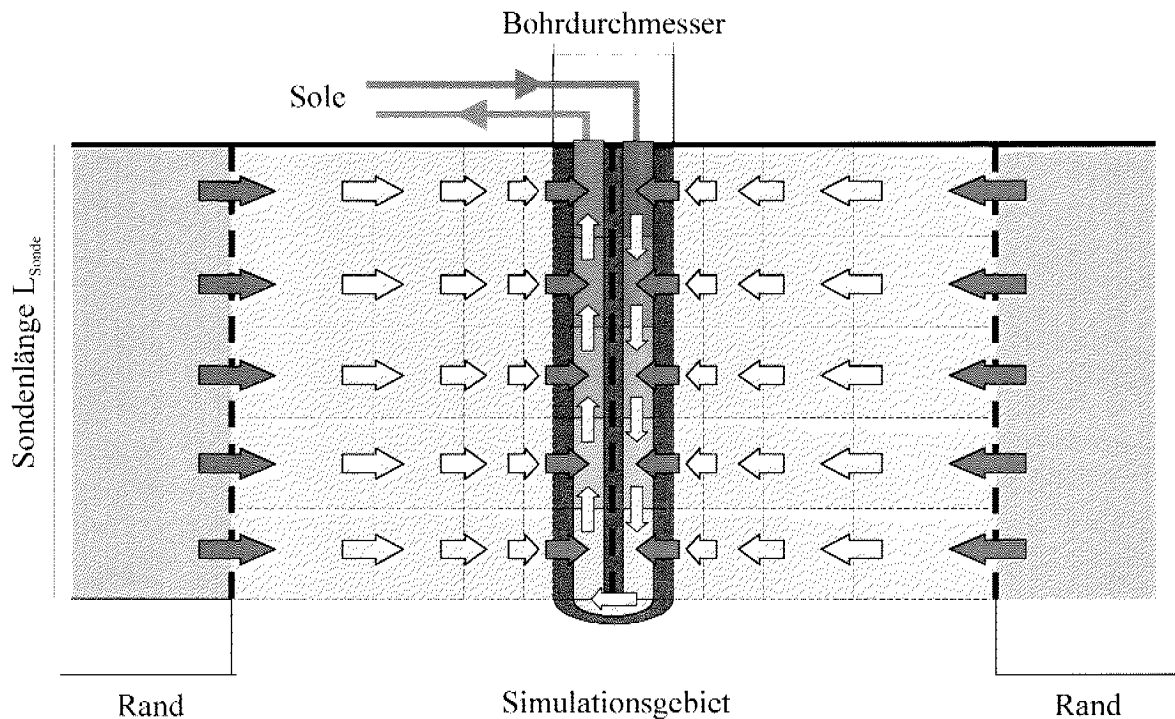


Abb. 6.38: Simulationsbereich im Sondenmodell.

#### 6.4.3.1 Definition des Rechengitters

Um die Auswertung des Erdsondenmoduls zu erleichtern, wird der ganze Simulationsbereich in Schichten aufgeteilt. Da das thermische Verhalten der Erde gegenüber der axialen Achse als symmetrisch angenommen wird, werden die Zylinderkoordinaten für die Berechnungen gewählt.

Die Schichtdicke in axialer Richtung wird für die gesamte Sondentiefe mit der gleichen Länge gewählt (vgl. Abb. 6.39), die Dicke wird durch die gewünschte Anzahl Knoten  $N_{Axi}$  und der Sondenlänge  $L_{Sonde}$  folgendermassen definiert:

$$dl = \frac{L_{Sonde}}{N_{Axi}}. \quad (\text{Gl. 6.21})$$

Typische Werte sind  $L_{Sonde} = 50 \dots 250$  m und  $N_{Axi} = 5 \dots 10$ . Für die Berechnungen der Temperaturen im Erdnahbereich wird auch eine Aufteilung in radialer Richtung benötigt. In diesem Fall wird der Radius des Rechengitters



variabel gewählt, da die Temperaturgradienten in der Nähe der Sonde grösser sind. Die ersten zwei Gitterpunkte entsprechen jeweils dem Radius der Sondenrohre und dem Bohrradius. Der Radius der weiteren Gitterpunkte wird anhand des gewünschten grössten Rechenradius  $r_{N_{Rad}}$ , des Gitterfaktors  $f$  und der Anzahl Knoten  $N_{Rad}$  bestimmt. Die Radien der Schichten lauten somit:

$$\begin{aligned} r_0 &= D_r / 2 \\ r_1 &= D_B / 2 \\ \text{für } 2 \leq i \leq N_{Rad} : r_i &= r_{i-1} + (r_{N_{Rad}} - r_1) \frac{1-f}{1-f^{N_{Rad}-1}} f^{i-2}. \end{aligned} \quad (\text{Gl. 6.22})$$

Mit  $f \rightarrow 1$  sind die Gitterabstände gleich, hingegen mit  $f = 2$  wird die Radiusdifferenz zwischen zwei Schichten verdoppelt.

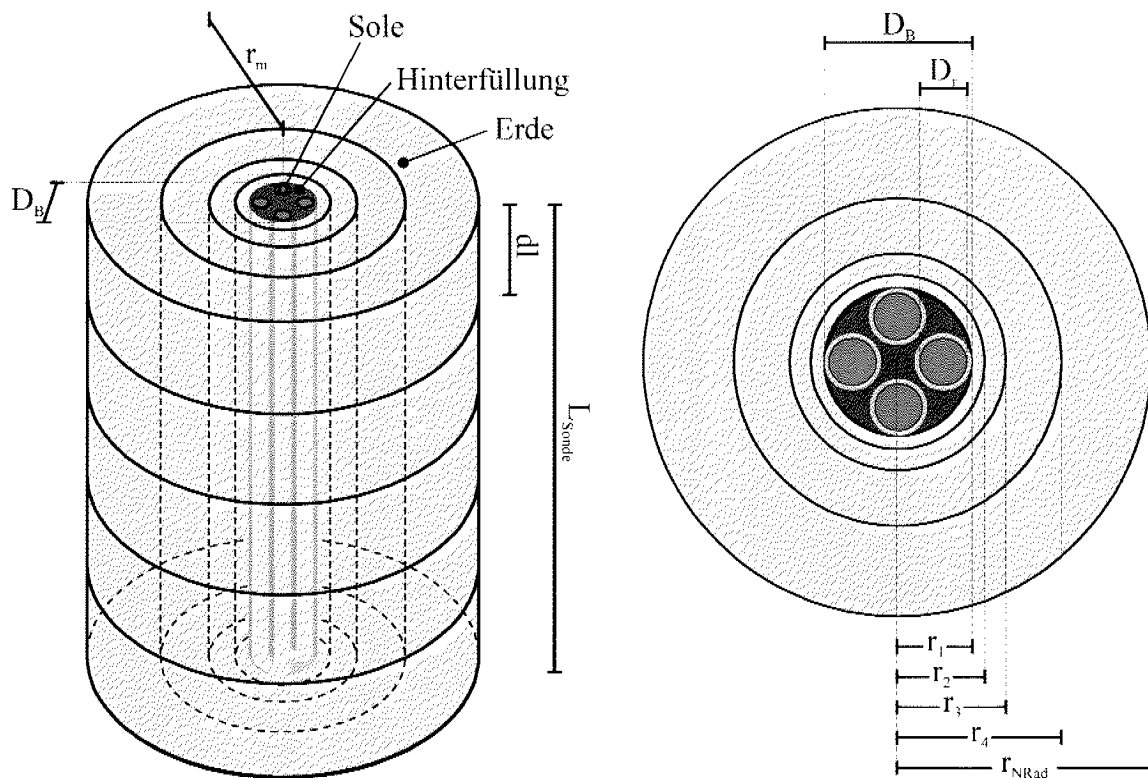


Abb. 6.39: Aufteilung des Erdsondenbereichs in Schichten. Beispiel mit 5 Rechenknoten in radialer Richtung und 5 in axialer Richtung.

Die Knoten werden in den Massenschwerpunkt der Schichten plaziert. Für zylindrische Schichten wird dieser folgendermassen bestimmt:

$$rz_i = \sqrt{\frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{2}}, \text{ für } i = 1 \dots N_{Rad}. \quad (\text{Gl. 6.23})$$

Normalerweise werden für die Simulationen des Erdnahbereichs  $r_{N_{Rad}} = 1.5 \dots 2$  m und  $N_{Rad} = 5 \dots 10$  gewählt.

#### 6.4.3.2 Radiale Modellierung des Erdnahbereichs

Für die Beschreibung der Wärmeleitung im Erdnahbereich wird die bekannte eindimensionale Fourier-Gleichung angewendet:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \text{mit } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \quad (\text{Gl. 6.24})$$

Dabei ist  $a$  die Temperaturleitfähigkeit,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität des Materials. Für das Lösen des Problems im Erdnahbereich wird die Fourier-Gleichung entlang der Ortskoordinate  $x$  diskretisiert. Die gewählte Achse für die Diskretisierung ist die radiale Richtung. Für jeden Knoten lautet somit die ortsdiskrete Differentialgleichung:

$$\dot{T}_{E\langle k,i \rangle} = \frac{L_{E\langle i \rangle}}{C_{E\langle i \rangle}} (T_{E\langle k,i-1 \rangle}(t) - T_{E\langle k,i \rangle}(t)) - \frac{L_{E\langle i+1 \rangle}}{C_{E\langle i \rangle}} (T_{E\langle k,i \rangle}(t) - T_{E\langle k,i+1 \rangle}(t)) \quad (\text{Gl. 6.25})$$

wobei  $T_{E\langle k,i \rangle}$  der Temperatur der Erde im Knoten  $\langle k,i \rangle$  entspricht. Der Index  $i$  steht für die radiale und  $k$  für die axiale Ortskoordinate,  $L_{E\langle i \rangle}$  ist die thermische Leitfähigkeit und  $C_{E\langle i \rangle}$  die Wärmekapazität der Erde in der Schicht  $i$ . Die Materialkonstanten in axialer Richtung werden uniform angenommen. Da der Erdnahbereich axialsymmetrisch angenommen wird, darf die zweidimensionale Konfiguration der Doppel-U-Sonde wie im rechten Bild von Abb. 6.39 nicht exakt modelliert werden.

Die Abb. 6.40 zeigt das Rechengitter für die Simulation des Temperaturfelds in radialer Richtung. Die Schicht bei  $i = 0$  ist mit Sole gefüllt, diese dient für die Kopplung des Erdnahmodells mit dem Solemodell. Die zweite Schicht entspricht hingegen der Hinterfüllung in der Bohrung. Die weiteren Schichten werden mit den Materialeigenschaften der Erde dimensioniert.

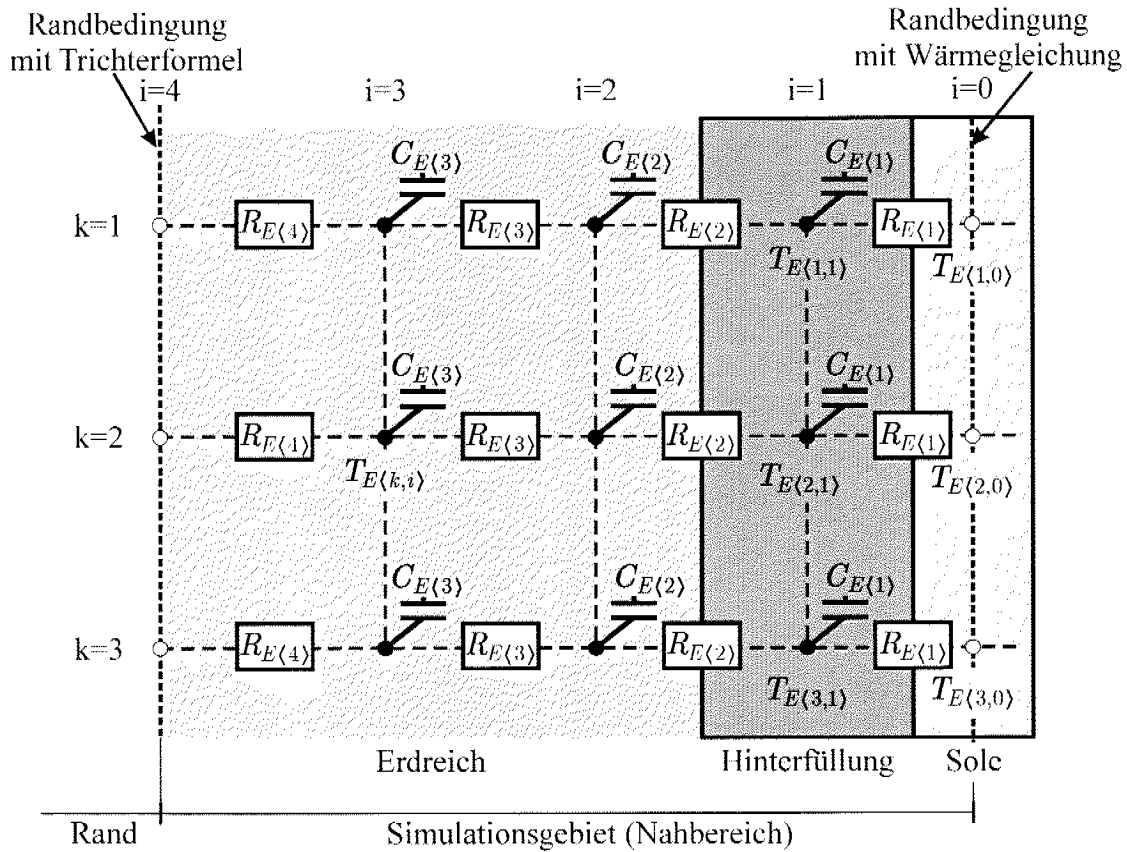


Abb. 6.40: Rechengitter der Erde im Nahbereich der Sonde ( $N_{Rad} = 3$ ). Die Punkte mit weisser Füllung stellen die Randbedingungen für die Auswertung von (Gl. 6.25) dar.

Die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität können anhand der Fouriergleichung in Zylinderkoordinaten bestimmt werden [18, 27]. Am besten wird der thermische Widerstand anstatt der Leitfähigkeit verwendet. Er kann für ein Rohr mit Innenradius  $r_{Innen}$  und Aussenradius  $r_{Aussen}$  folgendermassen bestimmt werden:

$$\frac{1}{L_E} = R_E = \frac{\ln(r_{Aussen} / r_{Innen})}{2\pi \cdot dl \cdot \lambda}. \quad (\text{Gl. 6.26})$$

Für die Bestimmung des thermischen Widerstands zwischen den ersten zwei Schichten wird angenommen, dass der Wärmetransport durch Konvektion verursacht wird. Die Gleichungen lauten:

$$\begin{aligned}
 R_{E\langle 1 \rangle} &= \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot dl} \left( \frac{1}{\alpha_{Sole} \cdot r_0} + \frac{1}{\lambda_{Füll}} \ln \left( \frac{r_1 - rz_1}{r_0} \right) \right) \\
 R_{E\langle 2 \rangle} &= \frac{1}{2\pi \cdot dl} \left( \frac{1}{\lambda_{Füll}} \ln \left( \frac{r_1}{rz_1} \right) + \frac{1}{\lambda_{Erde}} \ln \left( \frac{rz_2}{r_1} \right) \right) \\
 \text{für } (2 < k \leq N_{Rad}) : \quad R_{E\langle k \rangle} &= \frac{1}{2\pi \cdot dl} \left( \frac{1}{\lambda_{Erde}} \ln \left( \frac{rz_k}{rz_{k-1}} \right) \right) \\
 R_{E\langle N_{Rad}+1 \rangle} &= \frac{1}{2\pi \cdot dl} \left( \frac{1}{\lambda_{Erde}} \ln \left( \frac{r_{N_{Rad}}}{rz_{N_{Rad}}} \right) \right).
 \end{aligned} \tag{Gl. 6.27}$$

Dabei wird angenommen, dass die Temperaturleitfähigkeit der Erde  $\lambda_{Erde}$  uniform im ganzen Simulationsbereich ist. Der Parameter  $\lambda_{Füll}$  entspricht der thermischen Leitfähigkeit der Hinterfüllung,  $\alpha_{Sole}$  ist der Wärmeübergangskoeffizient der Sole und ist von der Nusseltzahl abhängig [18]. Für eine Rohrströmung gilt:

$$\alpha_{Sole} = \frac{Nu(Re, Pr) \cdot \lambda_{Sole}}{D_r}. \tag{Gl. 6.28}$$

Die Nusseltzahl  $Nu$  ist in allgemeinen von der Reynoldszahl und der Prandtlzahl abhängig, Da die Rohrströmung im Erdsondenmodul für die Emulation laminar ist, kann die Nusseltzahl als konstant angenommen werden [18]:

$$Nu_{lam} = 4.36. \tag{Gl. 6.29}$$

Im Fall einer turbulenten Strömung (mit  $Re > 2300$ ) wird die Nusseltzahl wie in [18] modifiziert.

Die Wärmekapazitäten für die Gitterpunkte können folgendermassen bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 C_{E\langle 1 \rangle} &= c_{P,Füll} \cdot \rho_{Füll} \cdot \pi (r_1^2 - 4r_0^2) dl \\
 \text{für } 2 \leq i \leq N_{Rad} : C_{E\langle i \rangle} &= c_{P,Erde} \cdot \rho_{Erde} \cdot \pi (r_i^2 - r_{i-1}^2) dl.
 \end{aligned} \tag{Gl. 6.30}$$

### 6.4.3.3 Axiale Modellierung der Sole

Für die Berechnungen der Soletemperaturen werden beiden Sonden zusammengefasst, d.h. es wird angenommen, dass die Temperaturverläufe beider Sonden gleichmässig sind. Es wird jedoch zwischen hinunter- und hinaufliessender Sole unterschieden. Die Sole wird in horizontalen Schichten der Länge  $dl$  aufgeteilt und für jedes Rechengitter wird eine Energiebilanz aufgestellt. Dabei werden die Wärmeströme in axialer Richtung, welche vom Solemassenstrom verursacht werden, und die Wärmeströme in radialer Richtung mit der Erde modelliert. Laut dem Hauptsatz der offenen Systeme ergibt sich die Energiebilanz für die hinunterfliessende Sole:

$$\dot{T}_{S,Ab\langle k \rangle}(t) = \frac{1}{m_S \cdot c_{p,Sole}} \left[ L_S (T_{S,Ab\langle k-1 \rangle}(t) - T_{S,Ab\langle k \rangle}(t)) + \frac{L_{E\langle 1 \rangle}}{2} (T_{E\langle k,1 \rangle}(t) - T_{S,Ab\langle k \rangle}(t)) \right] \quad , \quad (Gl. 6.31)$$

und für die Knoten der hinaufströmenden Sole:

$$\dot{T}_{S,Auf\langle k \rangle}(t) = \frac{1}{m_S \cdot c_{p,Sole}} \left[ L_S (T_{S,Auf\langle k-1 \rangle}(t) - T_{S,Auf\langle k \rangle}(t)) + \frac{L_{E\langle 1 \rangle}}{2} (T_{E\langle 1+N_{Axi}-k,1 \rangle}(t) - T_{S,Auf\langle k \rangle}(t)) \right] \quad . \quad (Gl. 6.32)$$

Dabei sind die thermische Leitfähigkeit der Sole  $L_S$  und die Masse der Sole in jeder Schicht  $m_S$  folgendermassen definiert:

$$\begin{aligned} L_S &= c_{p,Sole} \cdot \dot{m}_S \\ m_S &= 2\pi \cdot r_0^2 \cdot dl \cdot \rho_{Sole} \end{aligned} \quad (Gl. 6.33)$$

Die thermische Leitfähigkeit  $L_{E\langle 1 \rangle}$  wird anhand der (Gl. 6.27) bestimmt. Die Randbedingungen für das Solemodell lauten:

$$\begin{aligned} T_{S,Ab\langle 0 \rangle}(t) &= T_{S,VL}(t) \\ T_{S,Auf\langle 1 \rangle}(t) &= T_{S,Ab\langle N_{Axi} \rangle}(t) \end{aligned} \quad (Gl. 6.34)$$

Dabei ist  $T_{S,VL}$  die Soletemperatur am Ausgang der Testwärmepumpe. Die Abb. 6.41 zeigt das Schema für die Modellierung des Solemodells. Die ther-

mischen Widerstände  $R_S$  und  $R_E$  entsprechen jeweils den Inversen der Leitfähigkeiten  $L_S$  und  $L_E$ .

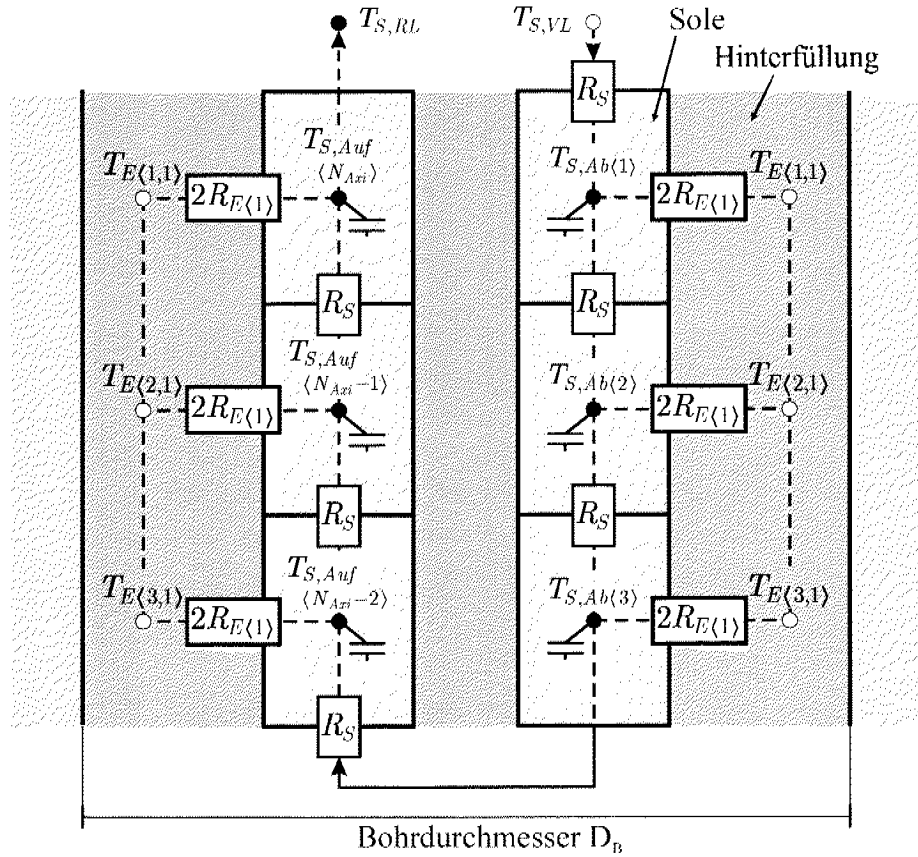


Abb. 6.41: Modellierung der Sole ( $N_{Axi} = 3$ ). Die Punkte mit weisser Füllung entsprechen den Randbedingungen von (Gl. 6.34) für die Auswertung von (Gl. 6.31)-(Gl. 6.32).

#### 6.4.3.4 Randbedingungen für den Sonden-Nahbereich

Die Kopplung des Modells des Erdnahbereichs der Sonde mit dem Modell der Sole wird anhand der Einstellung der Randbedingungen berücksichtigt. Für die Sole entsprechen diese den Erdtemperaturen bei der ersten Schicht  $T_{E\langle k,1 \rangle}$  (vgl. Abb. 6.41). Für das Modul der Erde im Nahbereich soll hingegen die Temperatur bei der Schicht 0  $T_{E\langle k,0 \rangle}$  bestimmt werden. Als Lösung wird die durchschnittliche Soletemperatur genommen:

$$T_{E\langle k,0 \rangle}(t) = \frac{(T_{S,Ab\langle k \rangle}(t) + T_{S,Auf\langle N_{Axi}-k-1 \rangle}(t))}{2}, \quad \text{für } 1 \leq k \leq N_{Axi}. \quad (\text{Gl. 6.35})$$

Die Temperaturverteilung am Rand des Erdnahbereichs bei der Entfernung  $r_{N_{Rad}}$  wird anhand der Trichter-Formel bestimmt. Diese stellt die Temperaturabsenkung bei einer konstanten spezifischen Entzugsleistung  $\dot{q}$  wie folgt dar:

$$\begin{aligned}\Delta T(r, t) &= \frac{\dot{q}}{4\pi \cdot \lambda_{Erde}} Tri(u(r, t)) \\ Tri(u(r, t)) &= \left[ -5.7772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right] \\ u(r, t) &= \frac{c_{p, Erde} \cdot \rho_{Erde}}{4 \cdot t \cdot \lambda_{Erde}} r^2.\end{aligned}\tag{Gl. 6.36}$$

Es wird jedoch angenommen, dass die Entzugsleistung wegen der verschiedenen durchschnittlichen Wärmepumpenlaufzeiten im Laufe des Jahres variiert. Mit Hilfe des Superpositionsprinzips kann die resultierende Temperaturdifferenz als Funktion der Summe verschiedener konstanter Entzugsleistungen dargestellt werden.

$$\begin{aligned}T_{E\langle k, N_{Rad} \rangle}(t) &= T_{E\langle k, N_{Rad} \rangle}(0) - \Delta T_{E\langle k \rangle}(t) \\ \Delta T_{E\langle k \rangle}(n \cdot \Delta t_{Trichter}) &= \sum_{j=1}^n \frac{Tri(u(r_{N_{Rad}}, j \cdot \Delta t_{Trichter}))}{4\pi \cdot \lambda_{Erde}} [\dot{q}_{\langle k \rangle}(n - j + 1) - \dot{q}_{\langle k \rangle}(n - j)] \\ \dot{q}_{\langle k \rangle}(j) &= \frac{\int_{(j-1) \cdot \Delta t_{Trichter}}^{j \cdot \Delta t_{Trichter}} (T_{E\langle k, 1 \rangle} - T_{E\langle k, 0 \rangle}) L_{E\langle 1 \rangle} dt}{\Delta t_{Trichter} \cdot dl}.\end{aligned}\tag{Gl. 6.37}$$

Dabei wird angenommen, dass die Entzugsleistung im Laufe der Woche ungefähr konstant bleibt, so kann  $\Delta t_{Trichter}$  gleich einer Woche gewählt werden.

---

## 7 Vergleich der Resultate

Die Heizungsregler für die Wärmepumpe wurden mittels der Emulationen am Prüfstand untersucht und verglichen. Die ersten Versuche wurden im Rahmen der dritten Phase des Projekts Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen [32] mit dem HIL-Testgerät durchgeführt. Es wurden die drei PBM-Reglervarianten und der konventionelle Zweipunkt-Regler getestet. Dabei wurde als Simulationsmodell für die HIL-Simulationen eine Gebäudeheizung mit Sole/Wasser-Wärmepumpe ohne Warmwasseraufbereitung gewählt. Anschliessend, im Rahmen der letzten Phase des Projekts [4] wurden die Emulationen mit dem adaptiven MPC-Regler und dem LKB-Regler am Wärmepumpenprüfstand erfolgreich durchgeführt. Für die Versuche wurde das Modell einer Kombianlage mit einer Erdwärmesonde als Wärmequelle verwendet.

Grundsätzlich werden bei jedem Versuch die gleichen Verläufe der Wetterbedingungen und des Warmwasserverbrauchs gewählt, damit die Regler miteinander verglichen werden können. Die Emulationsdauer beträgt 3 Wochen; zusätzlich wird vor der Emulation eine Testwoche durchgeführt, damit die Reglerparameter dem Gebäudemodell angepasst werden können. Während der dreiwöchigen Emulationen bleiben die Parameter des Reglers unverändert.

Hauptsächlich soll der Heizkomfort bzw. die abgegebene Wärmepumpenwärme im Vergleich zur verbrauchten elektrischen Energie und dem erzielten Niedertarifanteil verglichen werden. Dafür werden die Messdaten der Raumtemperatur und der Wärmeleistung, der Verbrauch der elektrischen Energie bzw. der Ein-/Ausschaltzeiten der Wärmepumpe erfasst. Wenn zusätzlich die Warmwasseraufbereitung emuliert wird, werden die Speichertemperaturen gemessen.

Dieses Kapitel zeigt die Hauptresultate der Untersuchungen in [32] und [4]. Die Resultate der Emulationen zeigen, dass das Konzept der Pulsbreitenmodulation vernünftig ist und dass im Laufe des Tages die Heizpulse gegenüber den konventionellen Regelungsstrategien besser verteilt werden können. Mit der Pulsbreitenmodulation können somit höhere Niedertarifanteile erreicht



werden. Zusätzlich ist der adaptive MPC-Regler in der Lage, die Gebäudeparameter automatisch zu erkennen, ohne dass diese vom Betreiber eingestellt oder korrigiert werden müssen.

Im Abschnitt 7.1 werden die Randbedingungen für die Emulationen beschrieben, d.h. die gewählten Wetterverläufe und die Anforderungen an die Wärmepumpenregler. Weiter werden in Abschnitt 7.2 die Resultate der HIL-Simulationen mit dem MPC-, dem EKB-, dem LKB- und dem konventionellen Zweipunkt-Regler gezeigt. In Abschnitt 7.3 werden schliesslich die Resultate der Emulation am Wärmepumpenprüfstand mit dem erweiterten adaptiven MPC- und dem erweiterten LKB-Regler für Kombianlagen gezeigt.

## 7.1 Randbedingungen für die Emulationen

Die Simulation mit dem HIL-Testgerät und die Emulation am Wärmepumpenprüfstand dauern drei Wochen. Der Verlauf der Aussenlufttemperatur und der Sonnenstrahlung für die ersten zwei Wochen sind synthetisch generiert, für die dritte Woche werden hingegen reale Messdaten verwendet (Abb. 7.1) Für die Testwoche werden einfach die Verläufe der ersten Emulationswoche gewählt.

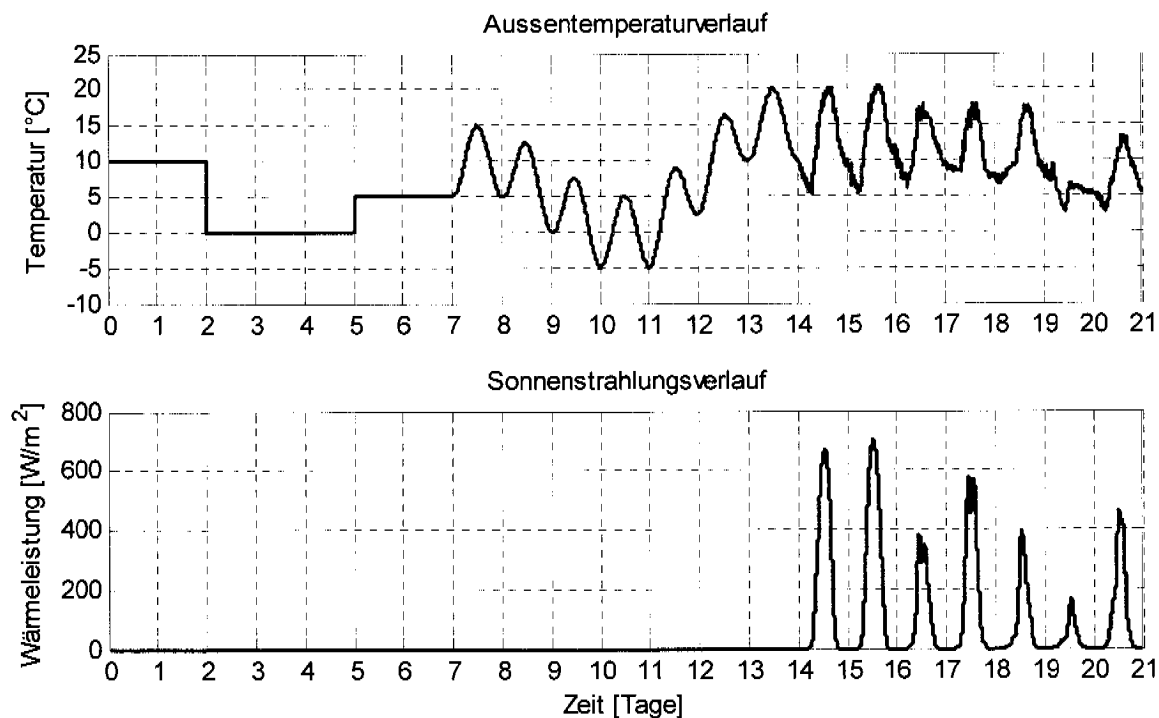


Abb. 7.1: Verlauf der Aussenlufttemperatur und Sonnenstrahlung für die Emulationen.

Als Verlauf des Warmwasserverbrauchs (für das Modell der Kombianlage bei den Emulationen am Wärmepumpenprüfstand) wird ein an einer realen Anlage gemessenes Entnahmeprofil verwendet und für die drei Emulationswochen wiederholt. Diese Messungen entsprechen den Verbrauchsdaten einer Familie mit 2 Erwachsenen und 3 kleinen Kindern [10].

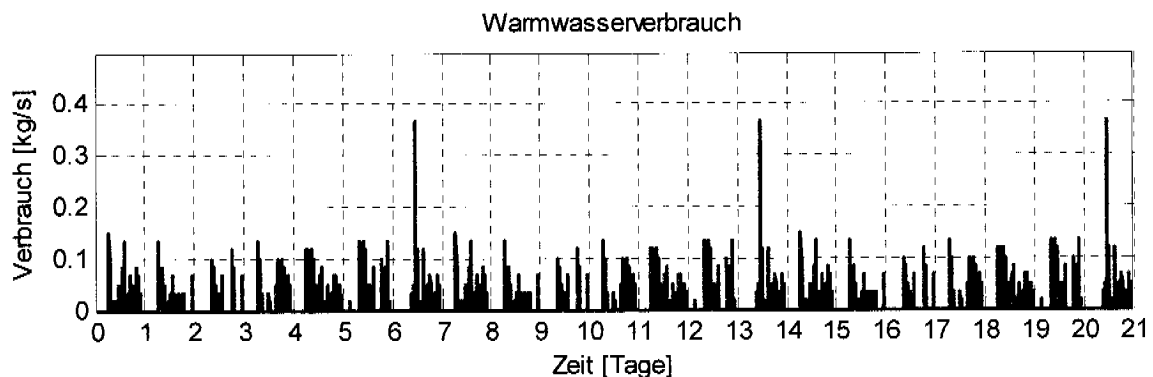


Abb. 7.2: Verlauf des Warmwasserverbrauchs für die Emulationen am Wärmepumpenprüfstand.

Weiter wird angenommen, dass die Energie nachts vom 22:00 bis 7:00 weniger kostet (Niedertariffenster) und dass von 11:00 bis 12:00 die Wärmepumpenheizung vom Elektrizitätswerk gesperrt wird.

Als Anforderungen an die Wärmepumpenregler soll einerseits eine Sollraumtemperatur von 21 °C möglichst gut gehalten werden und andererseits mindestens ein Niedertarifanteil von 70% erreicht werden. Bei der Emulation der Kombianlage soll zusätzlich jederzeit Warmwasser gewährleistet werden.

## 7.2 HIL-Simulation

Mittels der HIL-Simulationen (vgl. Abb. 6.1) wurde sowohl das PBM-Konzept anhand des energiekenmlinienbasierten, des laufzeitkenmlinienbasierten und des modellbasierten prädiktiven Reglers geprüft als auch der konventionelle Zweipunkt-Regler untersucht. Im folgenden Abschnitt werden die Resultate der Simulationen mit sämtlichen Reglern gezeigt.

Die gewählte Schaltung für die Simulationen entspricht nur einer Gebäudeheizung, welche mittels einer Sole/Wasser-Wärmepumpe betrieben wird. Die Simulationsmodelle sind folgendermassen aufgelistet:

- **Gebäudemodell:** Hausmodell dritter Ordnung mit einfachem Sonnenstrahlungsmodell. Gebäudeparameter aus Tabelle 2.1
- **Erdwärmesondenmodell:** Modell von Abschnitt 6.4.3, vgl. [18]
- **Wärmepumpenmodell:** Einfaches Modell zweiter Ordnung, validiert auf der Sole/Wasser-Wärmepumpe BW-108.1 am Wärmepumpenprüfstand

Die Wärmepumpenregler verfügen über folgende Signale:

- Aussenlufttemperatur:  $T_A$
- Vorlauf- und Rücklauftemperatur des Heizwassers:  $T_{W,VL}$  und  $T_{W,RL}$
- Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Sole:  $T_{S,VL}$  und  $T_{S,RL}$
- Rückmeldung des Wärmepumpenkompressors:  $u_{WP}$

### 7.2.1 Konventioneller Zweipunkt-Regler

Die Einstellungen des Zweipunkt-Reglers für die HIL-Simulationen (nach der Testwoche) sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Die Anfangseinstellung der Heizkurve war schwierig zu schätzen, da die abstrakte Heizkurve nicht explizit von der Energiekennlinie des Gebäudes abhängt. Die Anpassung der Kennlinie wurde während der Testwoche über die Einstellung „zu warm/zu kalt“ vorgenommen. Die Beschreibung des Reglerkonzepts befindet sich in Abschnitt 5.1.

Tabelle 7.1: Einstellparameter des witterungsgeführten Zweipunkt-Reglers

<b>Kennlinie:</b>	B:	24.4 [°C]
	s:	0.22 [°C / °C]
<b>Hysterese:</b>		+/- 2 [°C]
<b>Normalbetrieb:</b>	Zeit:	22:00–16:00
	Sollraumtemperatur:	21 [°C]
<b>Reduzierter Betrieb:</b>	Zeit:	16:00–22:00
	Sollraumtemperatur:	19 [°C]
<b>Sperrzeit:</b>		11:00–12:00

Der Raumtemperaturverlauf ist in Abb. 7.3 gezeigt. Der Sollwert wird ziemlich gut gehalten. Die Tagesschwankungen während der ersten zwei Wochen bleiben klein, da ein kurzer reduzierter Betrieb gewählt wurde.

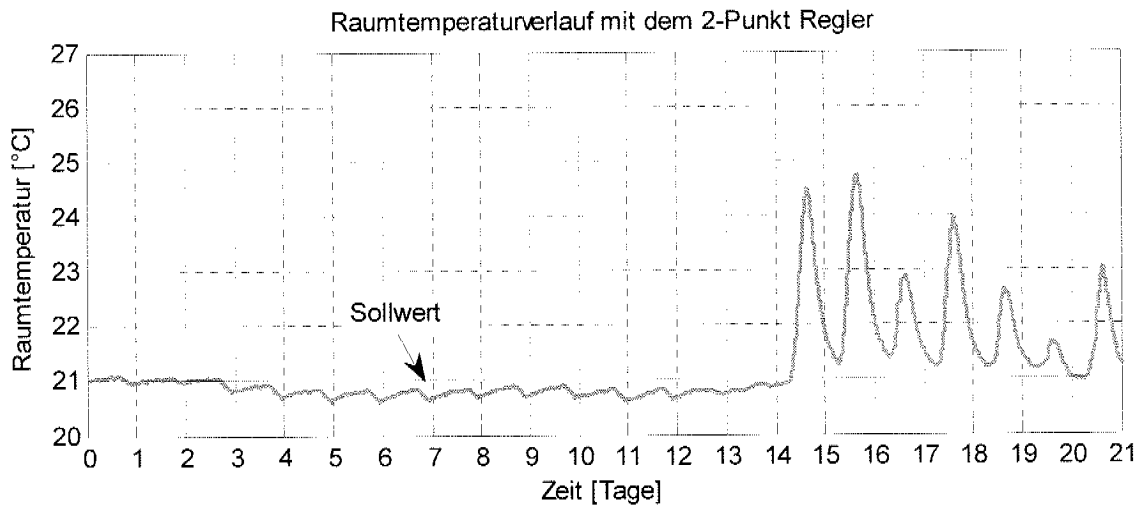


Abb. 7.3: Raumtemperaturverlauf mit dem Zweipunkt-Regler (HIL-Simulation).

Abb. 7.4 zeigt die Verteilung der Pulse für die HIL-Simulation. Der Regler verteilt die Pulse gleichmässig während des Tages und reagiert gut bei den Aussentemperatursprüngen in der ersten Woche.

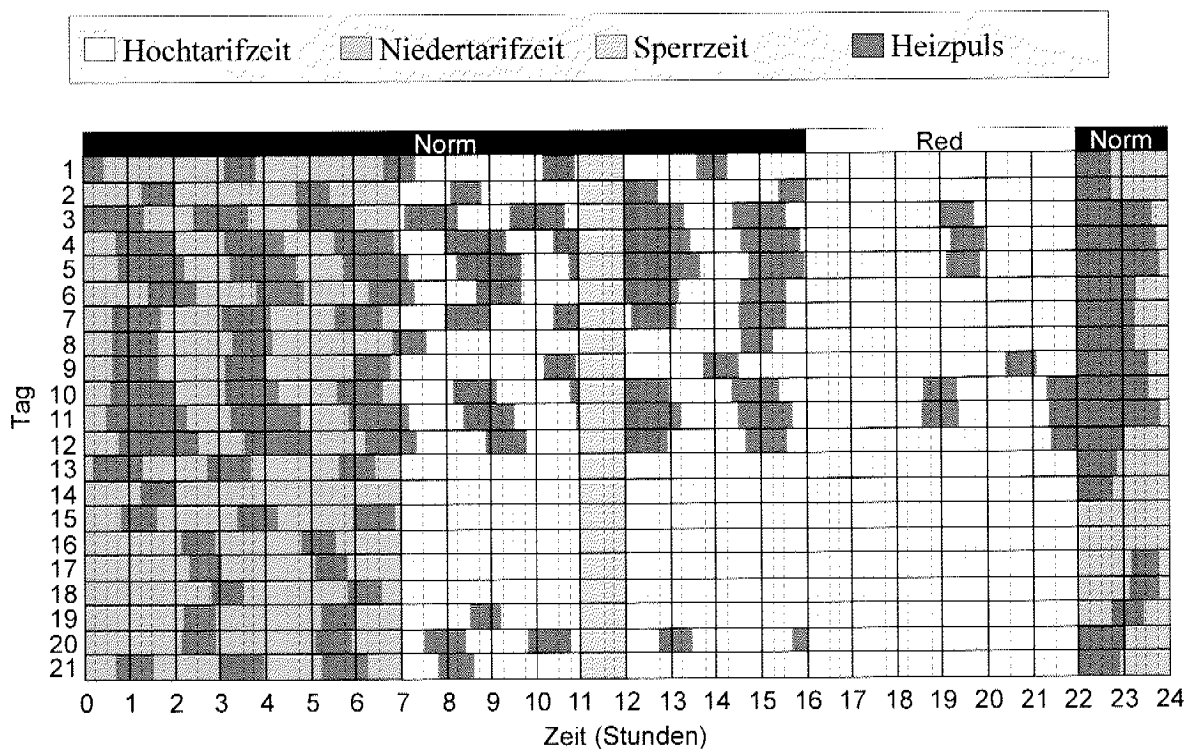


Abb. 7.4: Verteilung der Heizpulse mit dem Zweipunkt-Regler (HIL-Simulation)

Die Analyse der Soll-/Ist-Tagesenergie in Abb. 7.5 zeigt, dass der Zweipunkt-Regler während den ersten zwei Wochen im Mittel zu wenig Wärme liefert

(diese Daten sind in Übereinstimmung mit der tieferen Raumtemperatur in Abb. 7.3). Der Niedertarifanteil wird ziemlich schlecht gehalten. Während der dritten Woche erkennt der Regler die Sonnenstrahlung dank der Kopplung mit der Rücklauftemperatur und liefert weniger Heizenergie. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass diese Kopplung im einfachen Hausmodell dritter Ordnung zu stark ist (Modellierungsfehler, vgl. Abschnitt 7.2.5), somit wird dieser Regler in der dritten Simulationswoche unzulässig bevorzugt.

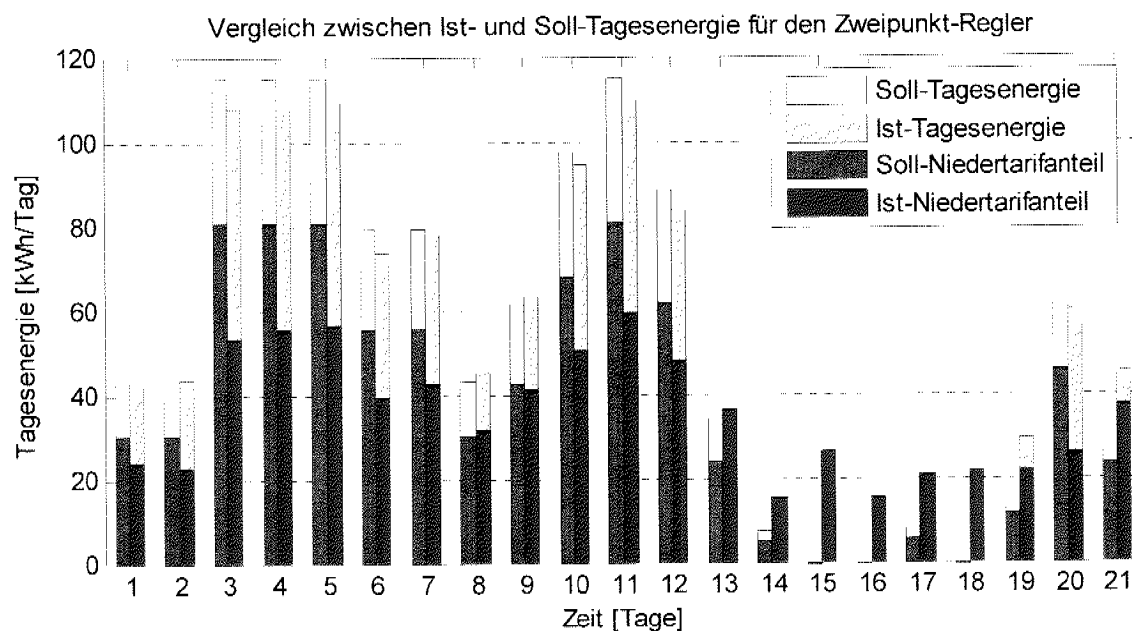


Abb. 7.5: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tagesenergie bzw. Niedertarifanteil mit dem Zweipunkt-Regler (HIL-Simulation).

### 7.2.2 Modellbasierter Prädiktiver Regler

Tabelle 7.2 zeigt die Regelparameter für die HIL-Simulation. Für die Einstellungen des Gebäudes wurden im MPC-Regler die Parameter in Tabelle 2.1 rechts (Hausmodell zweiter Ordnung) gewählt. Die Parameteridentifikation des Gebäudes im Regler war für diese Untersuchungen noch nicht aktiv.

Tabelle 7.2: Einstellparameter des Modellbasierten Prädiktiven Reglers

<b>Sollraumtemperatur:</b>	21 [°C]	<b>Niedertariffenster:</b>	22:00-7:00
<b>Tarifverhältnis:</b>	0.45	<b>Prädiktionshorizont:</b>	24 [h]
<b>Minimale Pulslänge:</b>	15 [Min]	<b>Pulsbreite:</b>	2 [h]
<b>Maximale Pausenlänge:</b>	10 [Min]	<b>Reglerabtastrzeit:</b>	1 [h]

Der Regler kann den Raumtemperatursollwert gut halten (Abb. 7.6). Die Einstellung der Gebäudeparameter im Regler war jedoch einfacher gegenüber dem Zweipunkt-Regler, wegen den Ähnlichkeiten zwischen Hausmodell dritter Ordnung (welches für die HIL-Simulationen verwendet wird) und dem Hausmodell zweiter Ordnung (welches im MPC-Regler implementiert ist).

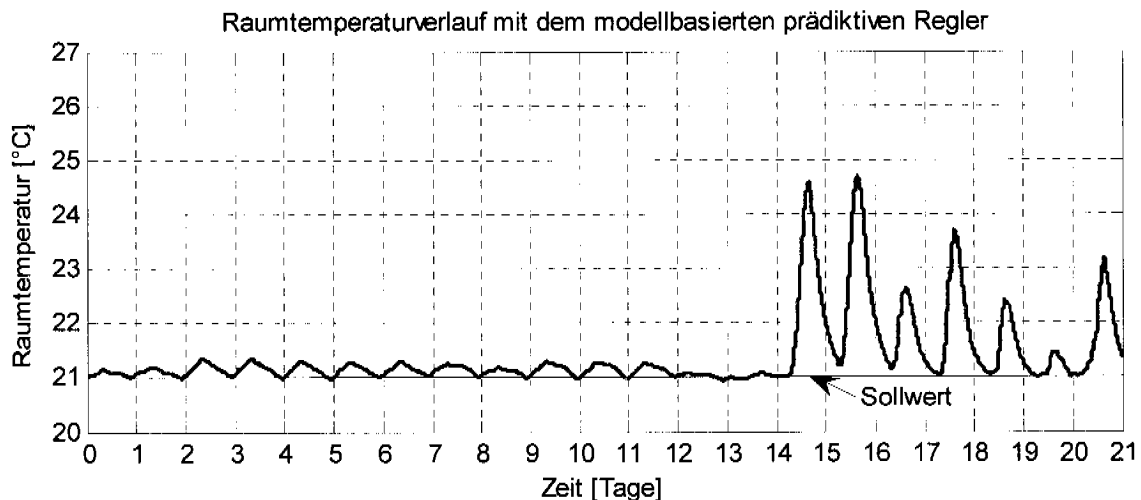


Abb. 7.6: Raumtemperaturverlauf mit dem MPC-Regler (HIL-Simulation).

Die Verteilung der Pulse während der drei Emulationswochen ist sinnvoll (Abb. 7.7); wegen der kleinen Pulsbreite sind jedoch die Heizpulse in der Hochtarifzeit manchmal ziemlich kurz.

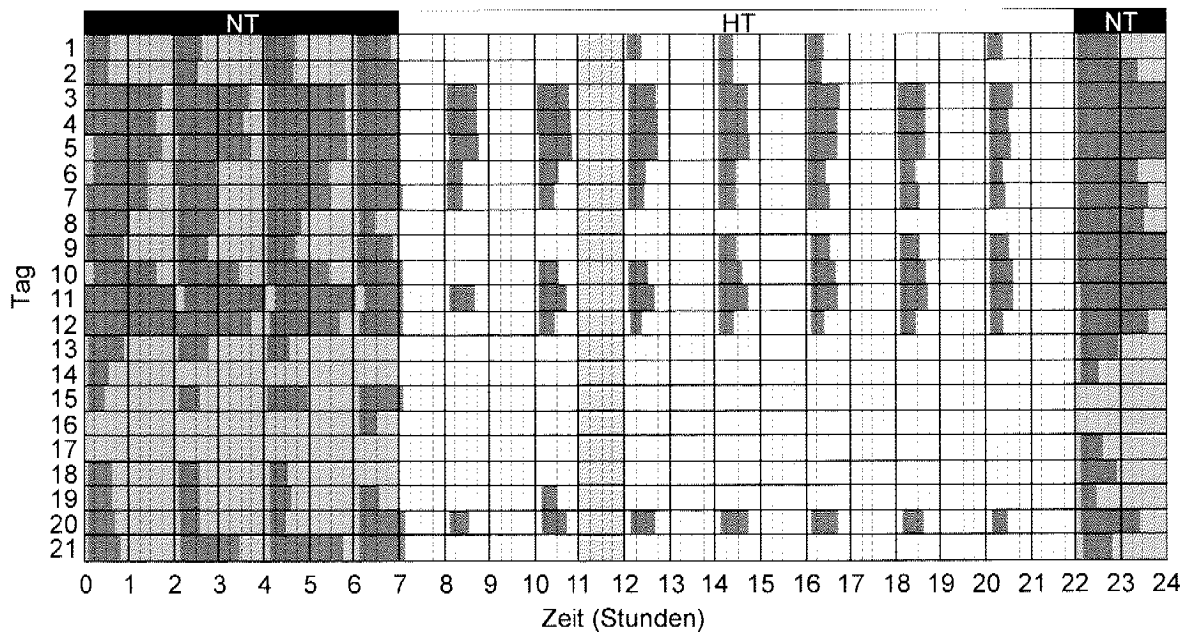


Abb. 7.7: Verteilung der Heizpulse mit dem MPC-Regler (HIL-Simulation)

Abb. 7.8 zeigt, dass der Regler die Sollenergie und den Niedertarifanteil fast jeden Tag gut halten kann. Die Sonnenstrahlung in der dritten Woche wird gut erkannt, aber wie beim Zweipunkt-Regler wird auch der MPC-Regler wegen der zu starken Kopplung der Heizwasserrücklauftemperatur mit der Sonnenstrahlung im einfachen Hausmodell dritter Ordnung unzulässig bevorzugt.

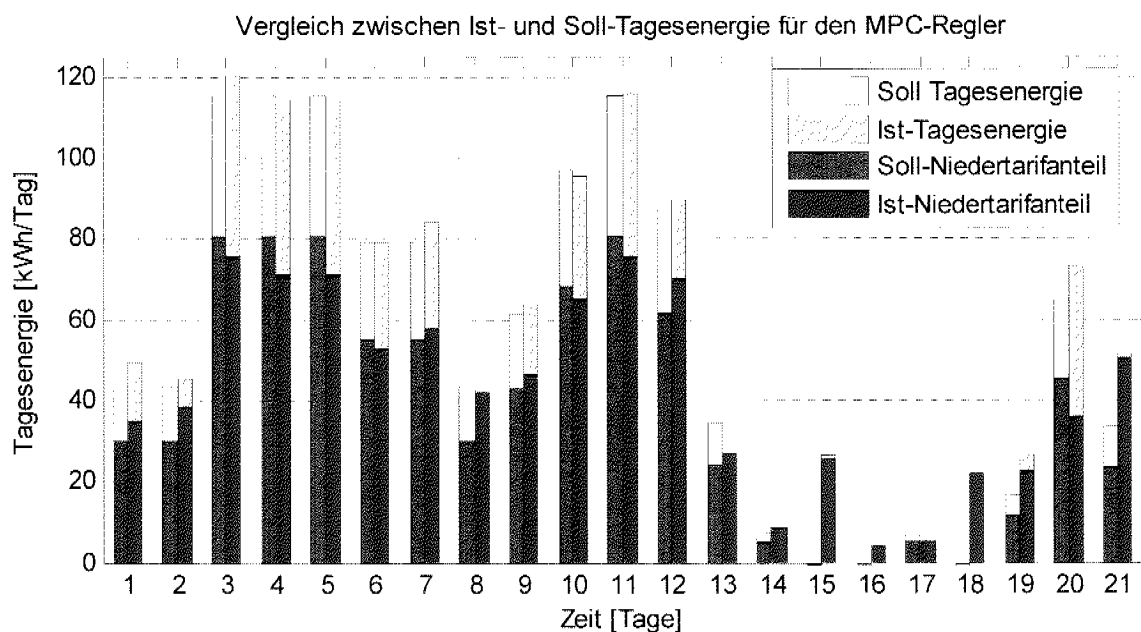


Abb. 7.8: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tagesenergie bzw. Niedertarifanteil mit dem MPC-Regler (HIL-Simulation).

### 7.2.3 Energiekennlinienbasierter Regler

Die Reglerparameter des energiekenlinienbasierten Reglers nach der Testwoche sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst. Die Energiekennlinie könnte anhand (Gl. 5.1) „a priori“ geschätzt werden. Die Erläuterung der Parameter befindet sich in Abschnitt 5.2.

Tabelle 7.3: Einstellparameter des energiekenlinienbasierten Reglers

<b>Energiekennlinie:</b>	B: 115 [kWh/Tag]	<b>Wunschlänge:</b>	60 [Min]
	s: 7.2 [kWh/(K.Tag)]	<b>Minimale Pausenlänge:</b>	15 [Min]
<b>Niedertarifanteil:</b>	70 [%]	<b>Minimale Pulslänge:</b>	15 [Min]

Die Abb. 7.9 zeigt, dass die Soll-Raumtemperatur zwar gehalten wird, die Streuung jedoch ziemlich gross ist. Eine genauere Untersuchung der Aufteilung der Pulse in Abb. 7.10 und der Soll-/Ist-Tagesenergie in Abb. 7.11 zeigt, dass das Verhalten des Reglers nicht korrekt ist und möglicherweise ein Programmierungsfehler im Regleralgorithmus vorliegt. Dieses Problem ist bei den Aussentemperatursprüngen in den Tagen 3 und 6 gut sichtbar. Da das Konzept des Reglers auf der Tagesenergie basiert, sollte der Ist-Wert der Tagesenergie in Abb. 7.11 immer mit dem Sollwert übereinstimmen. Zudem ist auch die Verteilung der Pulse am Tag 15 nicht sinnvoll.

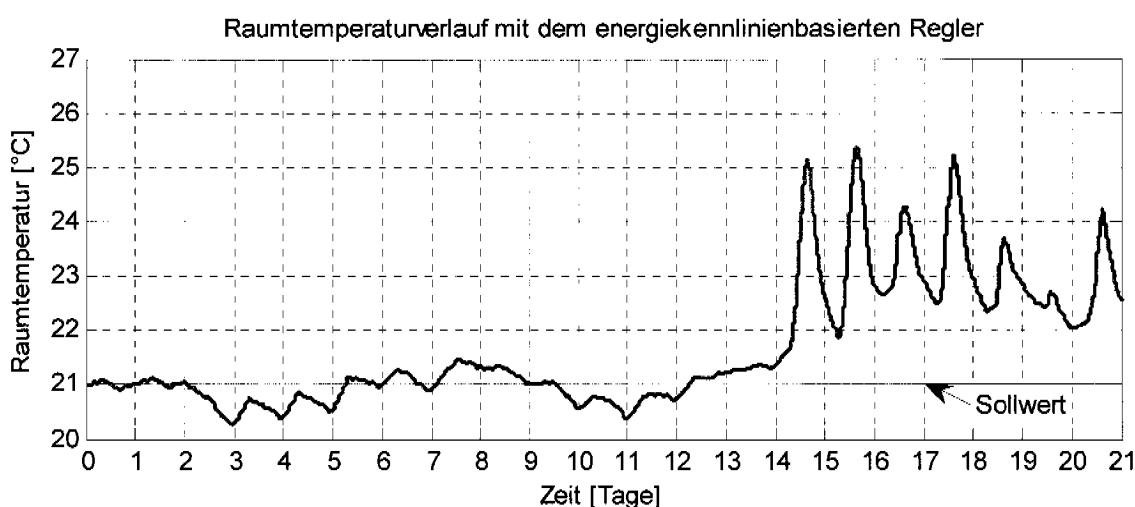


Abb. 7.9: Raumtemperaturverlauf mit dem EKB-Regler (HIL-Simulation).



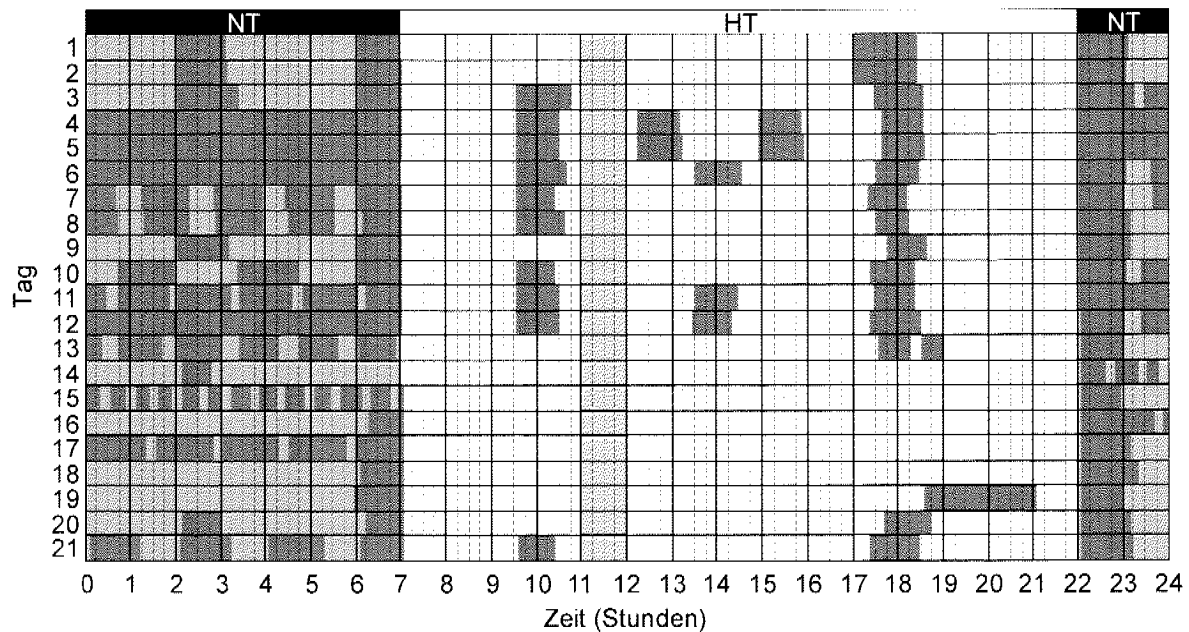


Abb. 7.10: Verteilung der Heizpulse mit dem EKB-Regler (HIL-Simulation)

Simulationen haben jedoch gezeigt, dass das Konzept des EKB-Reglers sinnvoll ist und dass die Resultate mit den anderen PBM-Konzepten vergleichbar sind. Der Niedertarifanteil wird trotz dem Implementierungsfehler vom Regler gut gehalten. Die Sonnenstrahlung kann mit diesem Konzept nicht erkannt werden, da die Rücklauftemperatur nicht rückgeführt wird.

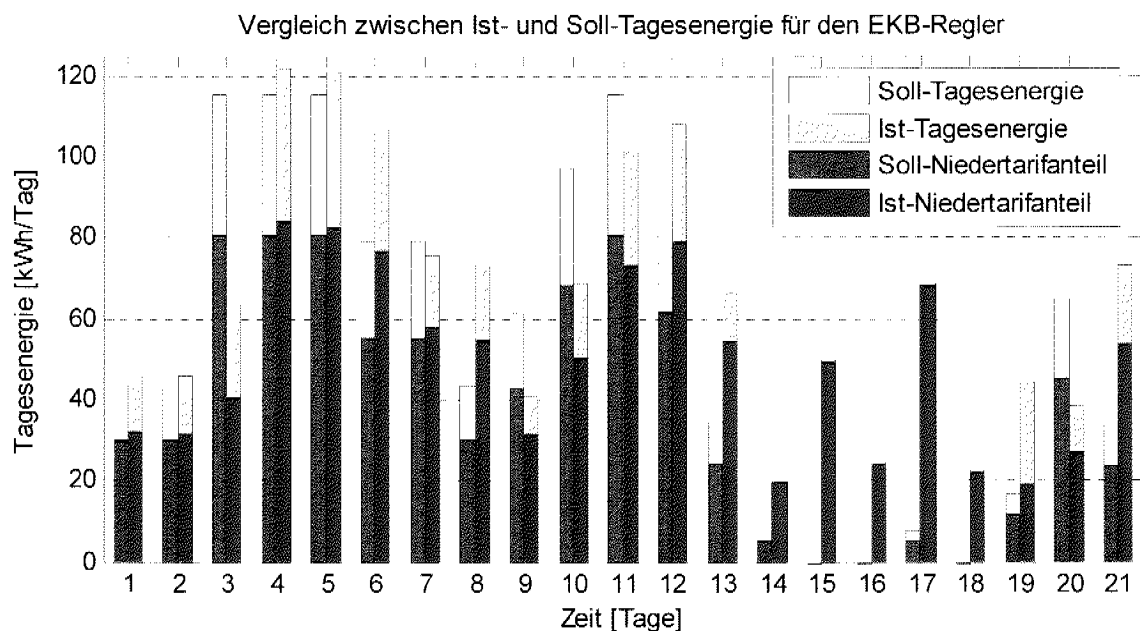


Abb. 7.11: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tagesenergie bzw. Niedertarifanteil mit dem EKB-Regler (HIL-Simulation).

### 7.2.4 Laufzeitkennlinienbasierter Regler

Die gewählten Parameter nach der Testwoche für den laufzeitkennlinienbasierten Regler sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Die Parameter für die Pulsbreitenmodulation sind hingegen in Tabelle 7.5 dargestellt. Die Erklärung der Parameter für den LKB-Regler befindet sich in Abschnitt 5.3.

Tabelle 7.4: Einstellparameter des laufzeitkennlinienbasierten Reglers

<i>Allgemeine Parameter</i>		<i>Laufzeitkennlinie (für <math>T_R=20^\circ\text{C}</math>)</i>	
<b>Sollraumtemperatur:</b>	21 [°C]	<b>Aussentemperatur</b>	<b>Laufzeit</b>
<b>Gebäudezeitkonstante:</b>	20 [h]	-5 [°C]	16:00 [h]
<b>Gedämpfte Aussentemperatur:</b>	25 [%]	15 [°C]	00:00 [h]

Tabelle 7.5: Einstellparameter des LKB-Reglers für die Pulsbreitenmodulation

<i>Fensterverteilung</i>			<i>Pulsbreitenmodulation</i>		
	<b>Beginn</b>	<b>Energieanteil</b>		<b>Minimal</b>	<b>Wunsch</b>
<b>F1</b>	07:00	7 [%]	<b>Pulslänge</b>	30 [Min]	60 [Min]
<b>F2</b>	11:00	15 [%]	<b>Pausenlänge</b>	15 [Min]	60 [Min]
<b>F3</b>	17:00	8 [%]			
<b>F4</b>	22:00	70 [%]			

Die Raumtemperatur folgt während der ersten Woche dem Sollwert gut, steigt aber leicht in den letzten zwei Wochen (Abb. 7.12).

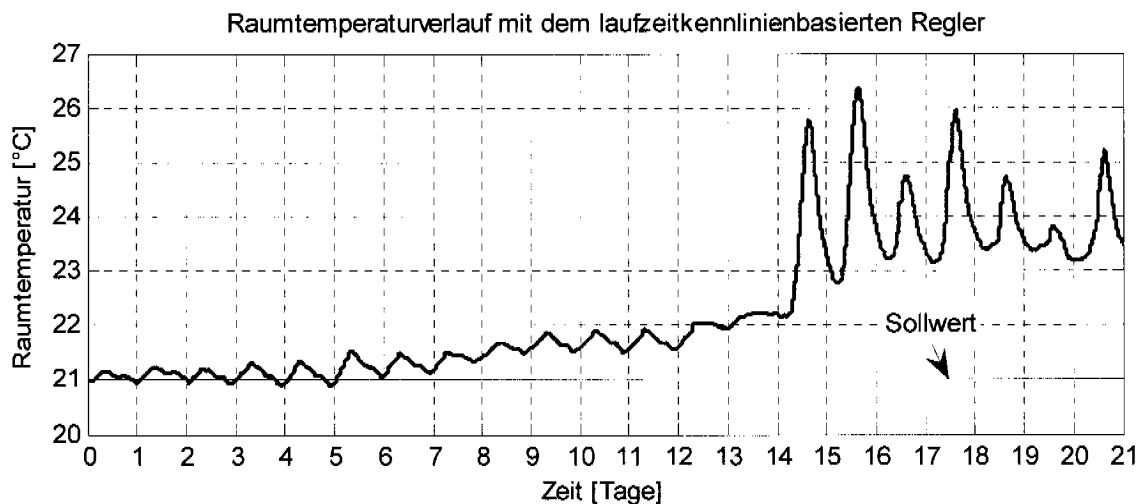


Abb. 7.12: Raumtemperaturverlauf mit dem LKB-Regler (HIL-Simulation).

Wie Abb. 7.13 zeigt, werden die Heizpulse sinnvoll während dem Tag verteilt. Wenn möglich, versucht der Regler die Wunschkurs- und Wunschkurslänge von 60 Minuten zu halten. Die Platzierung der Pulse erfolgt am Ende jedes Zeitfensters.

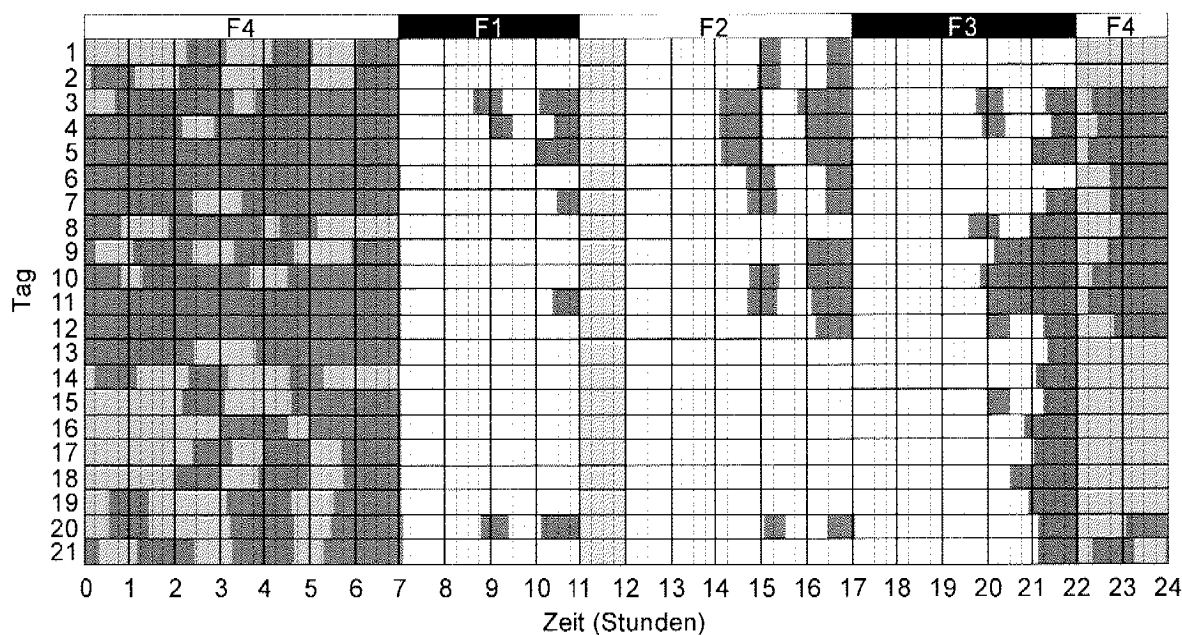


Abb. 7.13: Verteilung der Heizpulse mit dem LKB-Regler (HIL-Simulation)

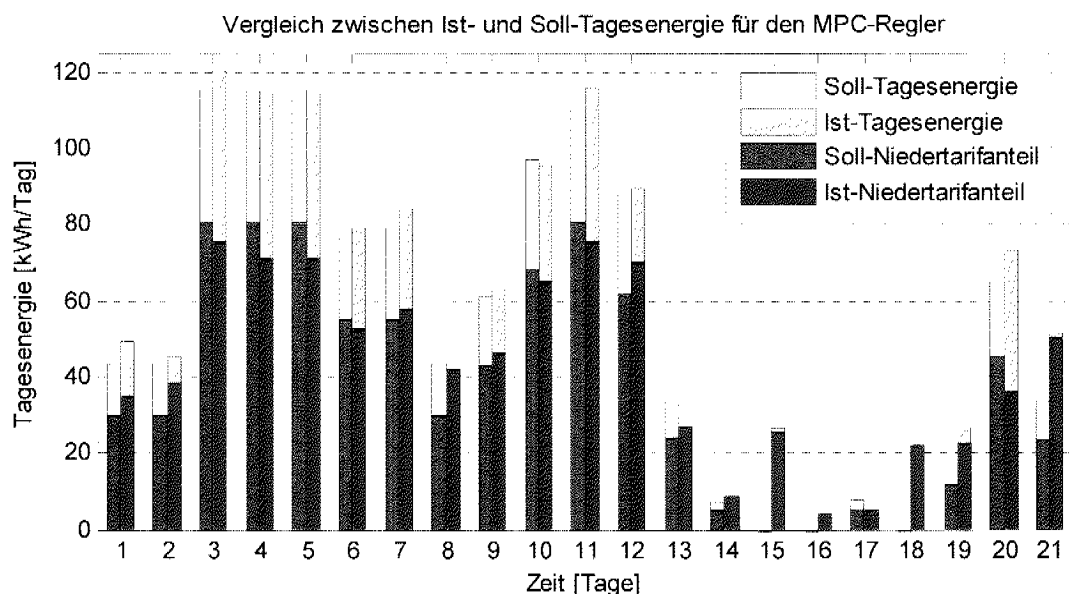


Abb. 7.14: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tagesenergie bzw. Niedertarifanteil mit dem LKB-Regler (HIL-Simulation).

In Übereinstimmung mit Abb. 7.12 zeigt Abb. 7.14, dass der Regler durchschnittlich zu viel Energie liefert. Wie beim EKB-Regler wird die Sonnenstrahlung in der dritten Emulationswoche nicht erkannt, da die Rücklauftemperatur nicht rückgeführt wird. Der Anteil Niedertarifenergie wird vom Regler im Mittel gut gehalten

### 7.2.5 Vergleich der Wärmepumpenregler

Im folgenden werden die Resultate der HIL-Simulationen mit den vier Reglervarianten zusammengefasst und verglichen. Die Verteilung der Raumtemperatur über die gesamte Simulationsdauer und für die einzelnen Wochen ist in Abb. 7.15 gezeigt. Die Sollraumtemperatur konnte von allen Reglervarianten gehalten werden.

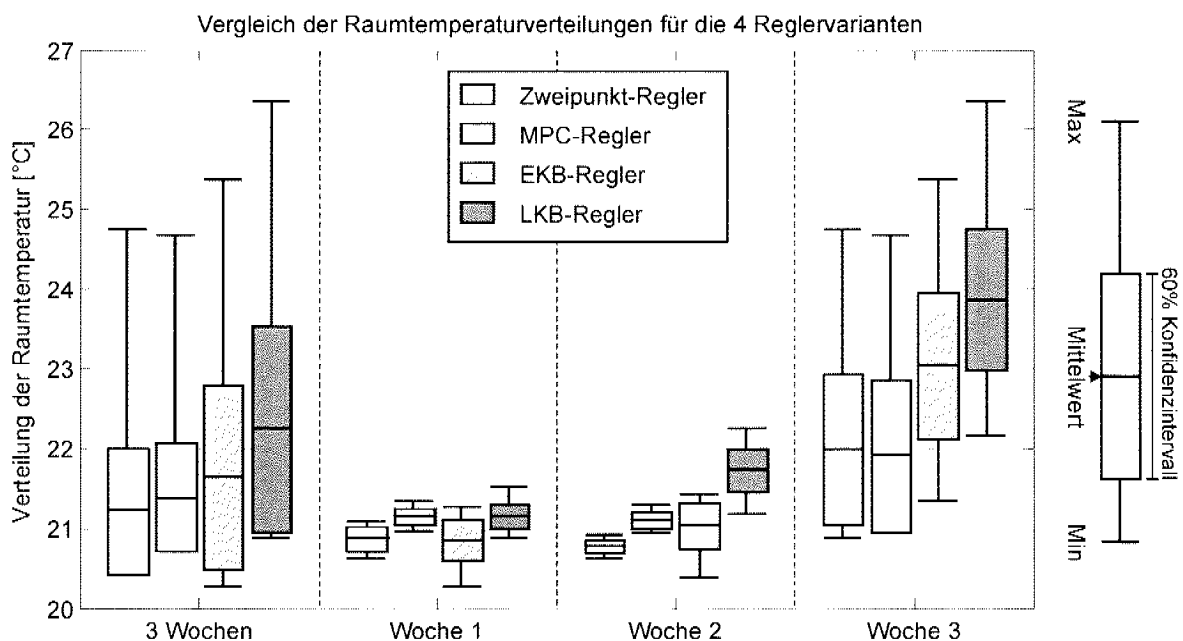


Abb. 7.15: Statistiken über die Raumtemperatur während jeweils der 3 Wochen und der einzelnen Wochen.

Sowohl der MPC-Regler als auch der Zweipunkt-Regler halten während der ersten zwei Wochen die Raumtemperatur am besten. Zudem ermöglicht bei diesen zwei Reglervarianten die Rückführung der Rücklauftemperatur die Erkennung der Sonnenstrahlung. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass das einfache Simulationsmodell dritter Ordnung die Sonnenstrahlungseffekte nicht korrekt reproduziert, sondern dass die Rücklauftemperatur zu stark mit

der Raumtemperatur gekoppelt ist. Die Abb. 7.16 links zeigt diese Situation für die dritte Simulationswoche. In den realen Messungen der Referenzanlage Winterthur-Seen ist diese Kopplung kaum erkennbar. Der Zweipunkt-Regler und der MPC-Regler sind deshalb unzulässig bevorzugt.

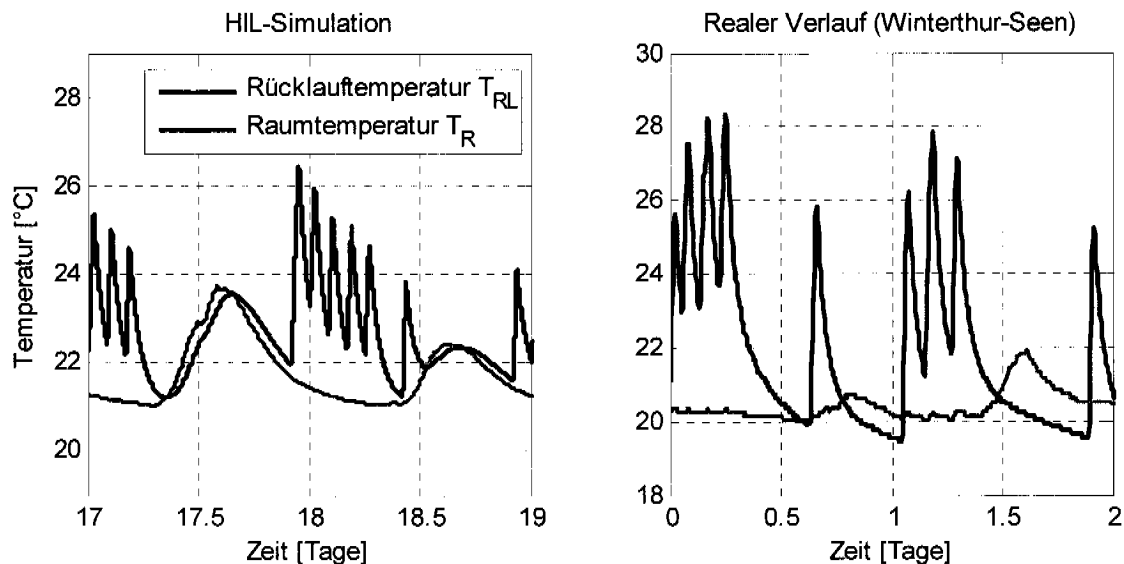


Abb. 7.16: Anomalie des Hausmodells dritter Ordnung. Links: Resultate der HIL-Simulationen mit dem Hausmodell dritter Ordnung. Die Kopplung zwischen Raumtemperatur und Rücklauftemperatur ist zu stark. Rechts: Realer Verlauf (Referenzanlage Winterthur-Seen, Messreihe aus [13]). Die Raumtemperatur ist mit der Rücklauftemperatur fast nicht gekoppelt.

Das linke Bild in Abb. 7.17 zeigt den Vergleich des erreichten Niedertarifanteils mit den untersuchten Reglern. Alle drei pulsbreitenmodulationsbasierten Regler können den gewünschten Niedertarifanteil von 70 % gut erreichen. Hingegen ist der durchschnittliche Anteil der Niedertarifenergie beim Zweipunkt-Regler tiefer. Die gelieferte Wärme im rechten Bild von Abb. 7.17 widerspiegelt die durchschnittlich erreichte Raumtemperatur. Eine Untersuchung über die Arbeitszahl der Wärmepumpe ist mit den HIL-Simulationen nicht sinnvoll, da die Wärmepumpe nicht real, sondern Teil des Simulationsmodells ist (vgl. Abb. 6.1).

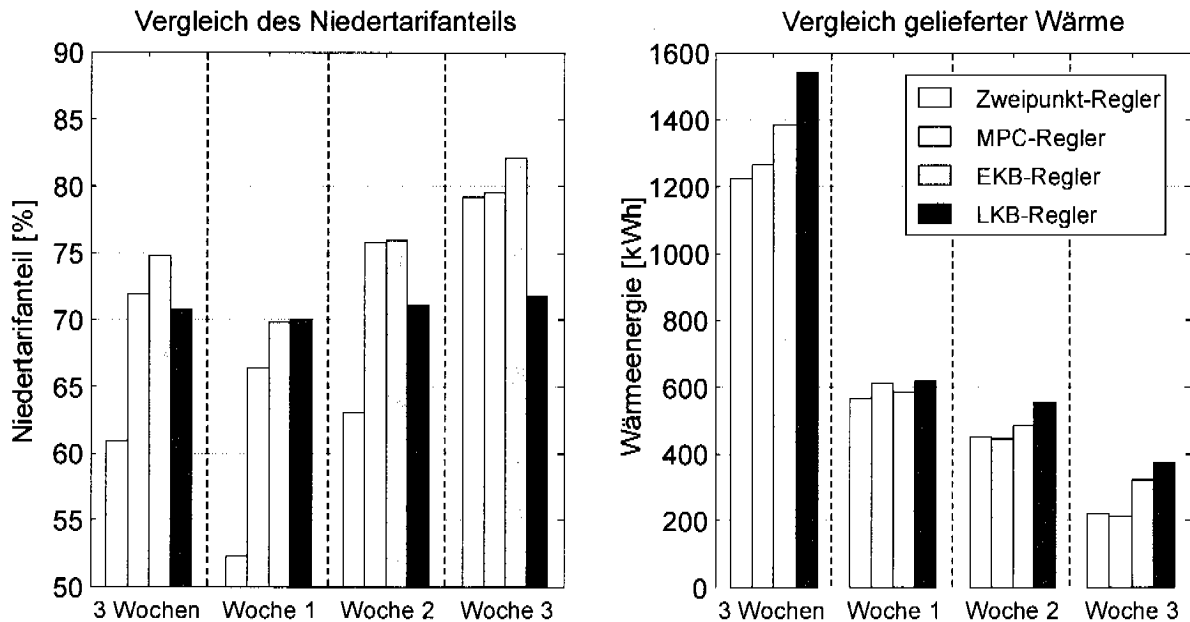


Abb. 7.17: Vergleich des Niedertarifanteils (Bild links) und der gelieferten Wärmeenergie (Bild rechts) für die vier Reglervarianten.

## 7.3 Emulation am Prüfstand

Im folgenden Abschnitt werden die Resultate der Emulationen mit dem erweiterten adaptiven MPC-Regler und dem erweiterten laufzeitkennlinienbasierten Regler gezeigt.

Die gewählte Schaltung für die Emulationen entspricht einer Kombianlage, welche mittels der Sole/Wasser-Wärmepumpe am Prüfstand betrieben wird. Die gewählten Simulationsmodelle sind folgendermassen aufgelistet:

- **Gebäudemodell:** CARNOT-Hausmodell der Referenzanlage Winterthur-Seen im Abschnitt 6.4.1. Modelliert sind zwei Räume und ein Wärmeabgabesystem mit 2/3 Fussbodenheizung und 1/3 Heizkörperheizung
- **Speichermodell:** CARNOT-Speichermodell von Abschnitt 6.4.2. Dieses entspricht einem 400 l-Speicher mit externem Plattenwärmetauscher.
- **Erdwärmesondenmodell:** Modell von Abschnitt 6.4.3, vgl. [18].

Die Wärmepumpenregler verfügen über folgende Signale:

- Aussenlufttemperatur:  $T_A$
- Vorlauf- und Rücklauf-temperatur des Wassers:  $T_{W,VL}$  und  $T_{W,RL}$
- Vorlauf- und Rücklauf-temperatur der Sole:  $T_{S,VL}$  und  $T_{S,RL}$
- Rückmeldung des Wärmepumpenkompressors:  $u_{WP}$
- Raumtemperatur (nur MPC-Regler):  $T_R$
- Warmwassertemperatur auf 2/3 der Speicherhöhe:  $T_{WW,2/3}$

### 7.3.1 Erweiterter Adaptiver Modellbasierter Prädiktiver Regler

Der Hauptvorteil dieser Reglervariante ist, dass die Gebäudeparameter nicht mehr vorgegeben werden müssen, sondern automatisch identifiziert werden. Der MPC-Algorithmus braucht somit nur noch die Niedertarifzeiten bzw. Sperrzeiten und eine grobe Schätzung des Gebäudetyps, um die Optimierung durchzuführen. Die gewählten Reglereinstellungen für die Gebäudeheizung sind in Tabelle 7.6 zusammengefasst. Der Rest der Einstellparameter ist gleich wie in Tabelle 7.2. Von 6:00 bis 7:00 wird normalerweise der Speicher geladen, deshalb wird diese Zeit für die Gebäudeheizung gesperrt.

Tabelle 7.6: Einstellparameter für die Gebäudeheizung mit dem Modellbasierten Prädiktiven Regler.

<b>Niedertarifzeit:</b>	22:00-7:00	<b>Prädiktionshorizont:</b>	24 [h]
<b>Sperrzeit:</b>	11:00-12:00: EW-Sperre 6:00-7:00: Speicherladung	<b>Pulsbreite:</b>	3 [h]
		<b>Reglerabtastzeit:</b>	1 [h]

Für die Online-Parameteridentifikation werden noch die Anfangsschätzungen der Parameterwerte und -unsicherheiten benötigt. Die gewählten Einstellungen für die Emulation sind in Tabelle 7.7 gezeigt.

Tabelle 7.7: Anfangsschätzung der Werte und der Standardabweichung der vier Gebäudeparameter für den Parameteridentifikations-Algorithmus (mit dem Hausmodell zweiter Ordnung als Randbedingung).

Parameter	Anfangswert	Anfangs-Standardabweichung
$\hat{V}_H$	2 [m <sup>3</sup> ]	0.1 [m <sup>3</sup> ]
$\hat{\kappa}_{WR}$	1800 [W/K]	60 [W/K]
$\hat{\kappa}_G$	400 [W/K]	15 [W/K]
$\hat{\tau}_G$	240 [h]	0.2 [h]

Die entsprechende Anfangs-Verteilungsdichtefunktion der Parameter ist in Abb. 7.18 dargestellt.

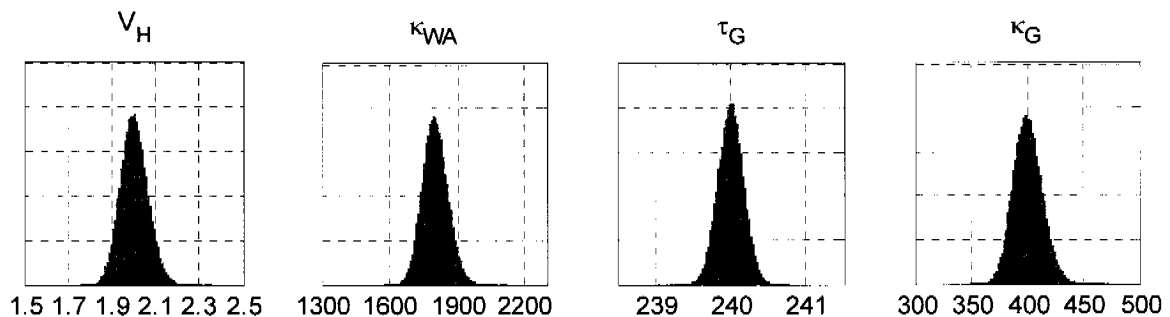


Abb. 7.18: Gewählte Verteilungsdichtefunktionen der Anfangsparameter.

Die gewählten Einstellungen für das Einschaltkriterium der Warmwasseraufbereitung sind in Tabelle 7.8 zusammengefasst. Dabei wird die Speicherladung am Ende der Niedertarifzeit bevorzugt. Die Einschalttemperatur wird während der Nacht gesenkt, so dass der Heizpuls möglichst zum Ende der Niedertarifzeit verschoben wird.

Tabelle 7.8: Einschaltkriterium (Temperatur auf 2/3 der Speicherhöhe) für die Speicherheizung mit dem modellbasierten prädiktiven Regler.

Modus	Zeitintervall	Einschalttemperatur
0: Sperrzeit	10:00–12:00	–
1: Speicherladung nicht erwünscht	22:00–04:00	35 °C
2: Normaler Betrieb	04:00–06:00 07:00–10:00 12:00–22:00	40 °C
3: „Erzwungene“ Ladung	06:00–07:00	49 °C



Gemäss der Untersuchungen in Abschnitt 4.2.2 wird folgendes Ausschaltkriterium für die Speicherladung gewählt:

**Ausschaltkriterium:** Maximale Vorlauftemperatur:  $T_{W,VL} = 53.5^{\circ}\text{C}$ ,

so wird eine Hochdruckstörung mit einem guten Sicherheitsfaktor vermieden.

Die Emulation der Raumtemperatur auf der Süd- und Nordseite des Hausmodells ist in Abb. 7.19 dargestellt. Als Vergleich ist auch die geschätzte Raumtemperatur dargestellt, welche vom Kalman-Filter im Parameteridentifikationsalgorithmus berechnet wird.

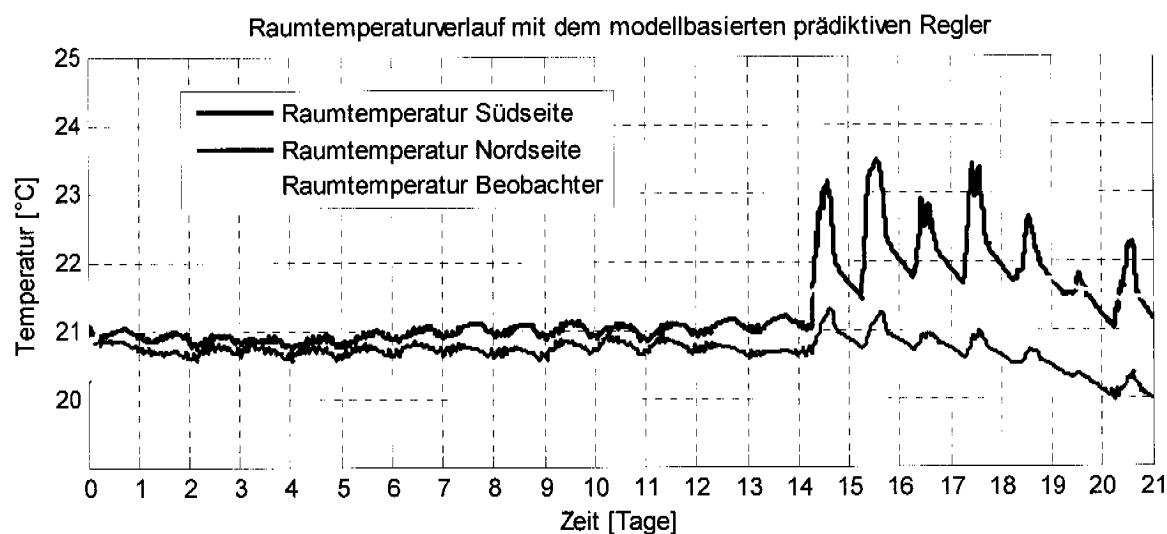


Abb. 7.19: Raumtemperaturverlauf auf der Süd- und Nordseite mit dem MPC-Regler und Vergleich mit der beobachteten Raumtemperatur (Emulation am Prüfstand).

Die Raumtemperatur während der zwei ersten Wochen wird vom Regler gut gehalten und in der dritten Woche wird zusätzlich die Sonnenstrahlung detektiert. Die Erkennung der Sonnenstrahlung ist auch dank der Rückführung der Raumtemperatur im Regler möglich. Der Beobachter kann jedoch der starken Schwingung der Raumtemperatur nicht folgen, sondern berücksichtigt die mittleren Energiegewinne. Die Resultate der Parameteridentifikation in Abb. 7.20 zeigen, dass die vier Parameter schon nach der ersten Woche korrekt geschätzt werden. In der dritten Woche steigt jedoch der Wert der geschätzten Gebäudezeitkonstante, da die schnellen Transienten der Sonnenstrahlung nicht reproduziert werden können. Der mittlere Sonnenenergiegewinn wird aber als Senkung der statischen Kennlinie berücksichtigt.

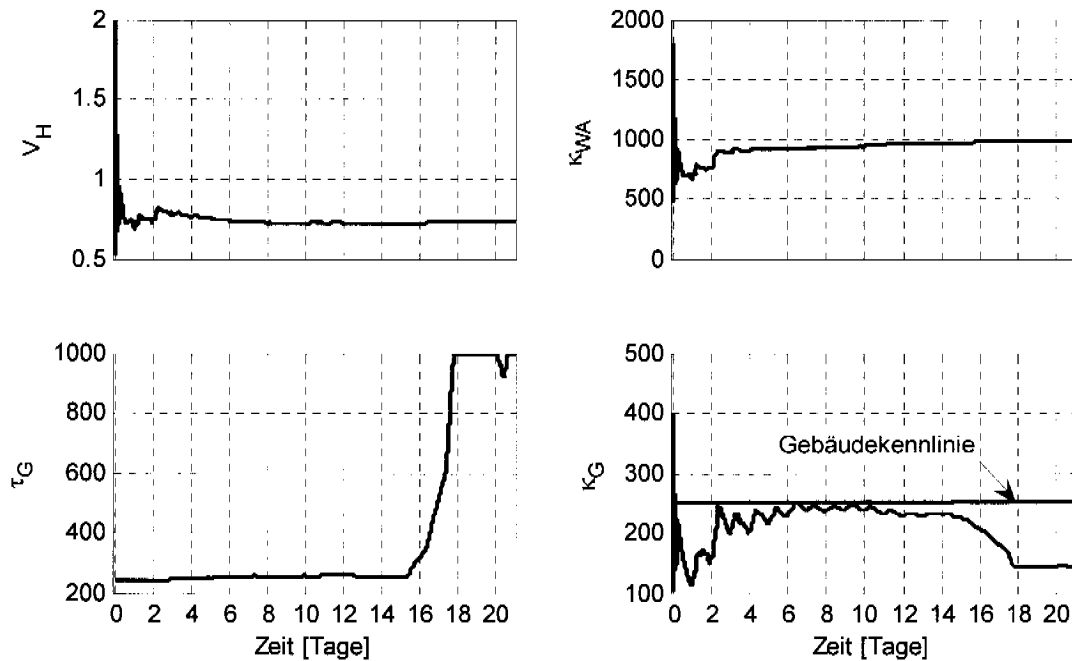


Abb. 7.20: Online-Parameteridentifikation der vier Gebäudeparameter im Hausmodell zweiter Ordnung für den MPC-Regler (Emulation am Prüfstand). Blaue Linie: statische Kennlinie des Gebäudes ohne Berücksichtigung des Sonnenenergiegewinnes.

Weiter sind in Abb. 7.21 die Verteilungen der Warmwassertemperaturen für die gesamte Emulation dargestellt. Das linke Bild zeigt die Verteilung auf 2/3 der Speicherhöhe, wo der Fühler für den Regler plaziert ist. Das rechte Bild zeigt hingegen die Verteilung am Ausgang des Speichers. Die Temperatur bleibt während der drei Wochen immer höher als 45°C.

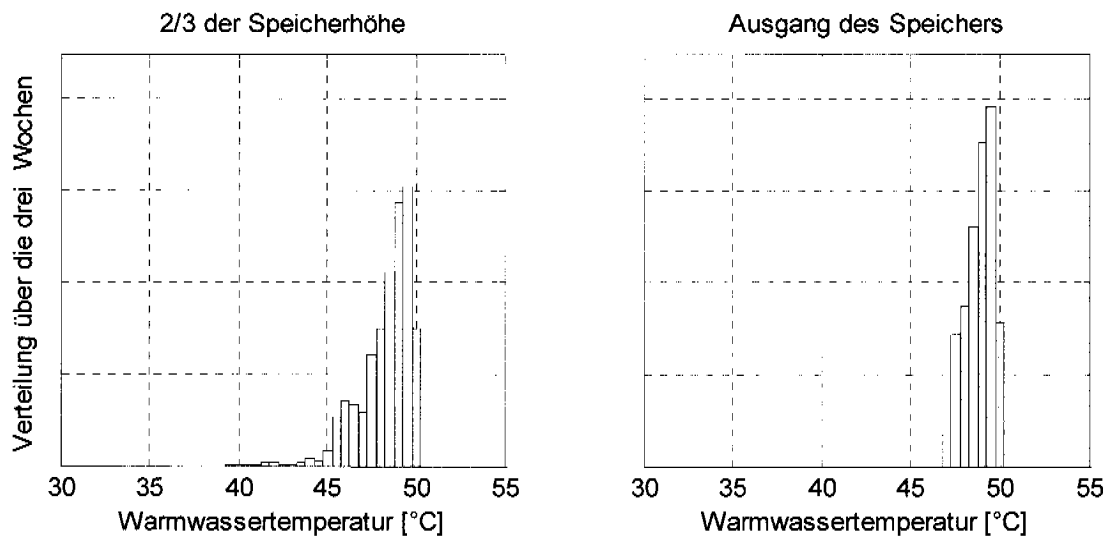


Abb. 7.21: Temperaturverteilung des Warmwassers für die gesamte Emulationsdauer auf 2/3 der Speicherhöhe (Bild links) und am Ausgang des Speichers (Bild rechts) mit dem MPC-Regler.

Die Heizpulse werden hauptsächlich in den Niedertarifzeiten platziert. Zudem wird die Speicherladung fast immer während der Zwangsladungszeiten von 6:00 bis 7:00 durchgeführt. Die Tage, an denen mehr Warmwasser verbraucht wird (freitags, samstags und sonntags), wird der Speicher zusätzlich auch nachmittags geheizt.

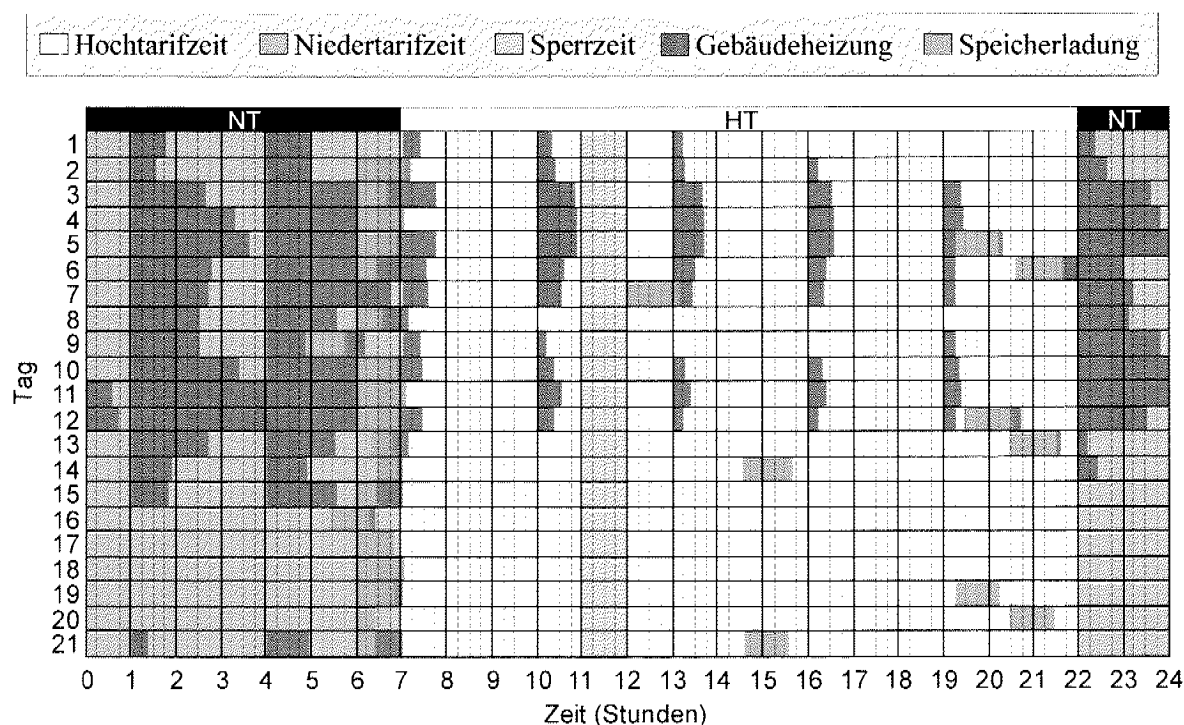


Abb. 7.22: Verteilung der Heizpulse mit dem MPC-Regler (Emulation am Prüfstand)

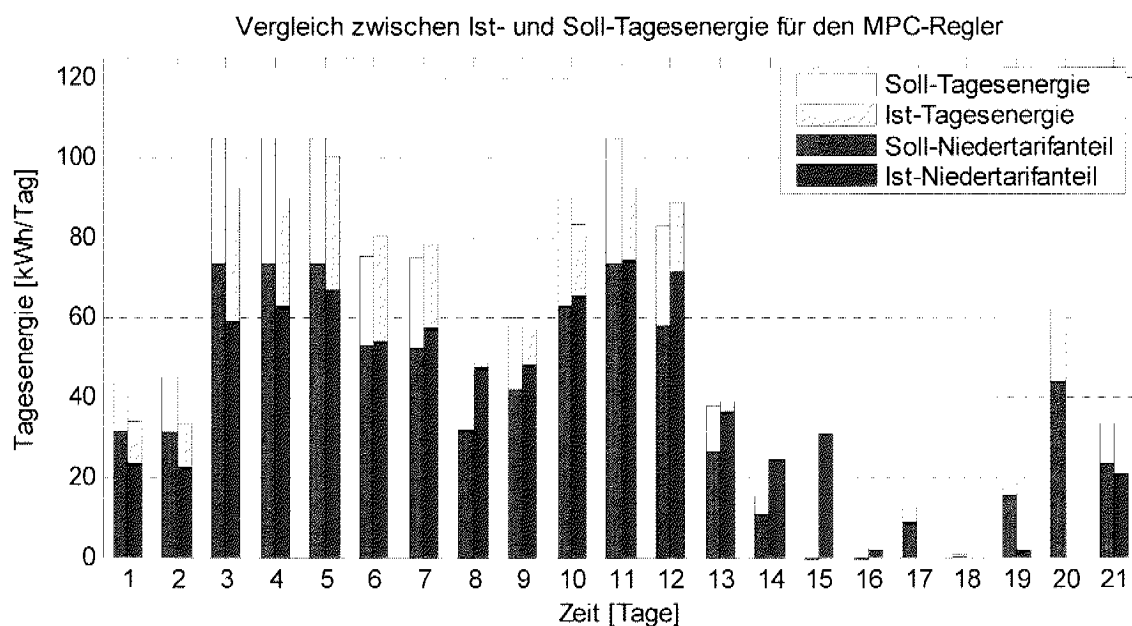


Abb. 7.23: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tagesenergie bzw. Niedertarifanteil mit dem MPC-Regler (Emulation am Prüfstand).

Der Vergleich des effektiven Tagesenergiebedarfs des Gebäudes mit der gelieferten Wärmeenergie in Abb. 7.23 zeigt, dass der adaptive MPC-Regler im Schnitt weniger Energie geliefert hat. Dieses Resultat wird auch vom Raumtemperaturverlauf in Abb. 7.19 bestätigt.

### 7.3.2 Erweiterter Laufzeitkennlinienbasierter Regler

Für die Emulationen mit dem laufzeitkennlinienbasierten Regler wurden die gleichen Parameter wie in Tabelle 7.4 links und Tabelle 7.5 gewählt. Die Laufzeitkennlinie wurde noch anhand der Testwoche dem neuen Gebäudemodell angepasst. Die Parameter für die dreiwöchige Emulation sind in Tabelle 7.9 aufgeführt.

Tabelle 7.9: Einstellparameter des laufzeitkennlinienbasierten Reglers

#### *Laufzeitkennlinie (für $T_R=20^\circ\text{C}$ )*

Aussentemperatur	Laufzeit
-5 [°C]	12:20 [h]
15 [°C]	00:00 [h]

Die Warmwasseraufbereitung wird nur zu gewissen Zeiten freigegeben. Die Einstellungen der Zeitfenster für die Emulation sind in Tabelle 7.10 links zusammengefasst. Als Ein- und Ausschalttemperatur für die Warmwasseraufbereitung wird die Temperatur des Warmwassers auf 2/3 der Speicherhöhe verwendet. Die Einstellungen der Solltemperaturen sind in Tabelle 7.10 rechts gezeigt.

Tabelle 7.10: Einstellparameter des LKB-Reglers für die Warmwasseraufbereitung

#### *Zeitfenster für die Warmwasseraufbereitung*

	Beginn [Zeit]	Ende [Zeit]
Phase 1	00:00	02:00
Phase 2	07:00	11:00
Phase 3	14:00	20:00
Zwangsladung:	00:00	—

#### *Solltemperatur auf 2/3 der Speicherhöhe*

Ausschalttemperatur	50 °C
Einschalttemperatur	45 °C

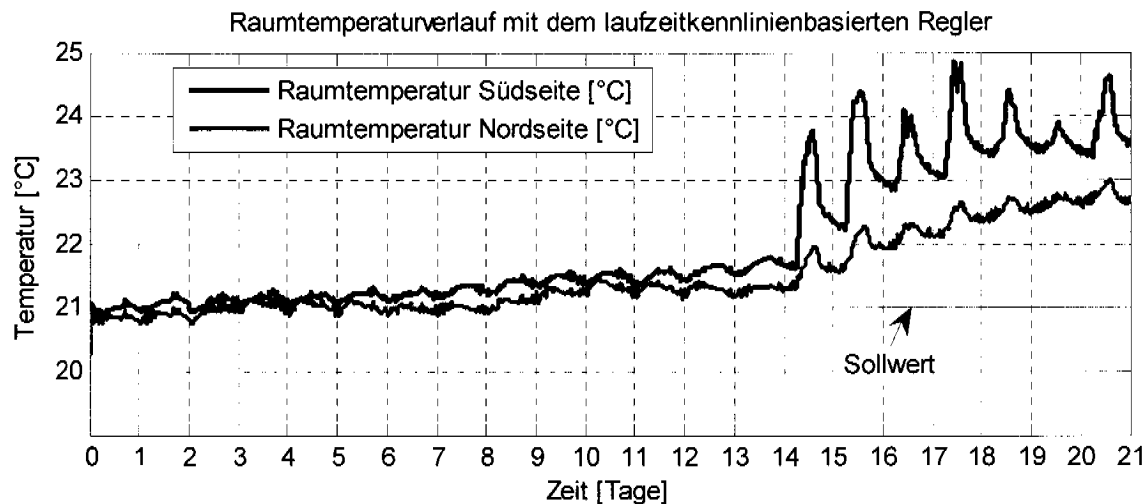


Abb. 7.24: Raumtemperaturverlauf mit dem LKB-Regler (Emulation am Prüfstand).

Der Raumlufthtemperaturverlauf für die drei Emulationswochen ist in Abb. 7.24 dargestellt. Der Sollwert von 21 °C konnte in den ersten zwei Wochen vom LKB-Regler ziemlich gut gehalten werden. In der dritten Woche wurde die Sonnenstrahlung nicht erkannt, da der Regler den Wärmebedarf nur basierend auf der Aussentemperatur berechnet. Die Sonnenstrahlungseffekte können jedoch grundsätzlich mit Hilfe eines Sonnenintensitätsfühlers erfasst und durch den Regler berücksichtigt werden. Bei den Emulationsversuchen steht aber diese Messgröße nicht zur Verfügung.

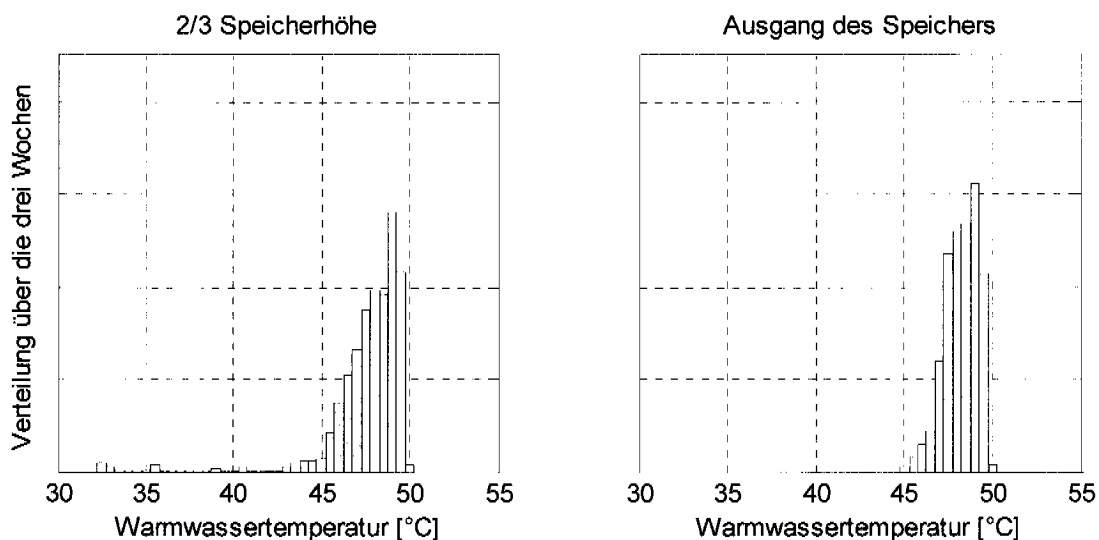


Abb. 7.25: Temperaturverteilung des Warmwassers für die gesamte Emulationsdauer auf 2/3 der Speicherhöhe (Bild links) und am Ausgang des Speichers (Bild rechts) mit dem LKB-Regler.

Wie Abb. 7.25 zeigt, kann auch der LKB-Regler während der ganzen Emulationsdauer Warmwasser gewährleisten. Die Spreizung der Verteilung der Warmwassertemperatur auf 2/3 der Speicherhöhe ist jedoch grösser als beim MPC-Regler, da die Warmwasseraufbereitung mehrmals am Tag gesperrt wird (vgl. Tabelle 7.10 links)

Die Verteilung der Heizpulse ist in Abb. 7.26 gezeigt. Der Speicher wird sowohl jeden Tag ab 00:00 Uhr während der Zwangsladung als auch zusätzlich freitags und sonntags geheizt, wenn der Warmwasserverbrauch höher ist. Die Heizpulse für die Gebäudeheizung sind sinnvoll verteilt und werden am Ende der Zeitfenster gefahren.

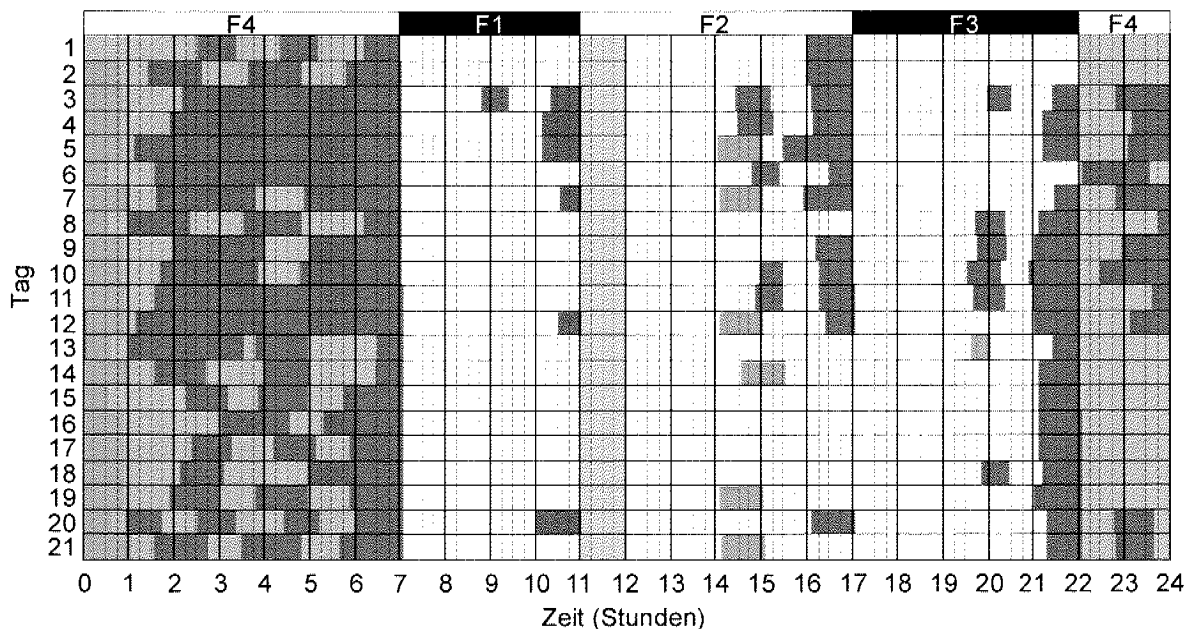


Abb. 7.26: Verteilung der Heizpulse mit dem LKB-Regler (Emulation am Prüfstand)

Die ersten zwei Wochen liefert der Regler ungefähr die richtige Wärmemenge. Da die Sonnenstrahlung vom LKB-Regler nicht erkannt wird, wird jedoch in der dritten Woche im Mittel zu viel Wärme geliefert.

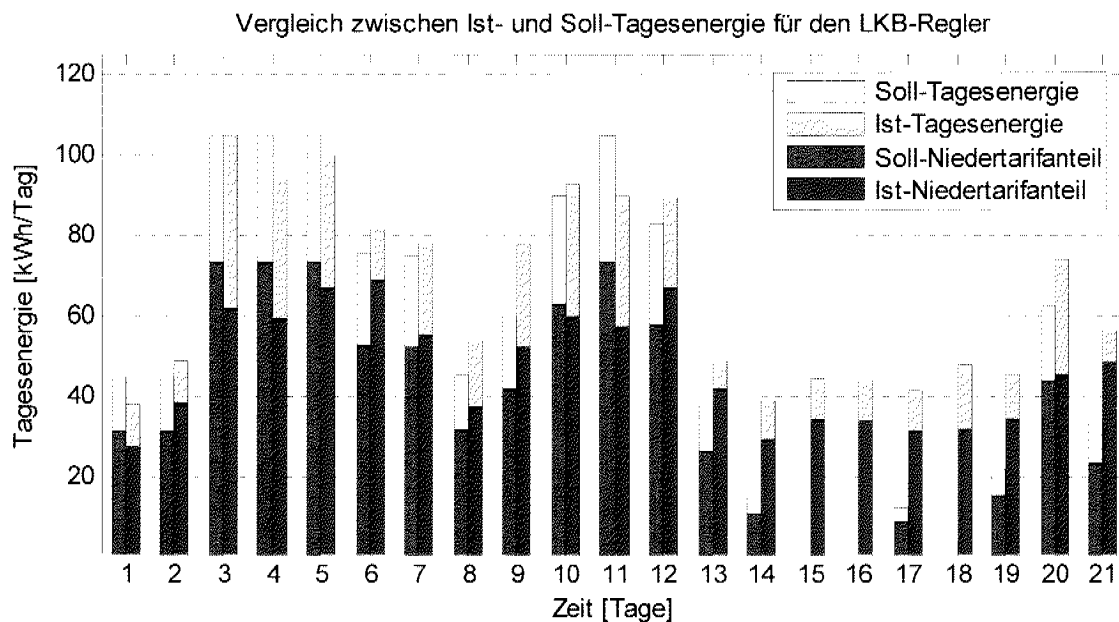


Abb. 7.27: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tagesenergie bzw. Niedertarifanteil mit dem LKB-Regler (Emulation am Prüfstand).

### 7.3.3 Vergleich der Wärmepumpenregler

In diesem Abschnitt wird der erweiterte laufzeitkennlinienbasierte Regler mit dem erweiterten adaptiven modellbasierten prädiktiven Regler verglichen. Sowohl die Sollraumtemperatur von 21 °C als auch der Soll-Niedertarifanteil von 70 % konnte von beiden Reglern gut gehalten werden.

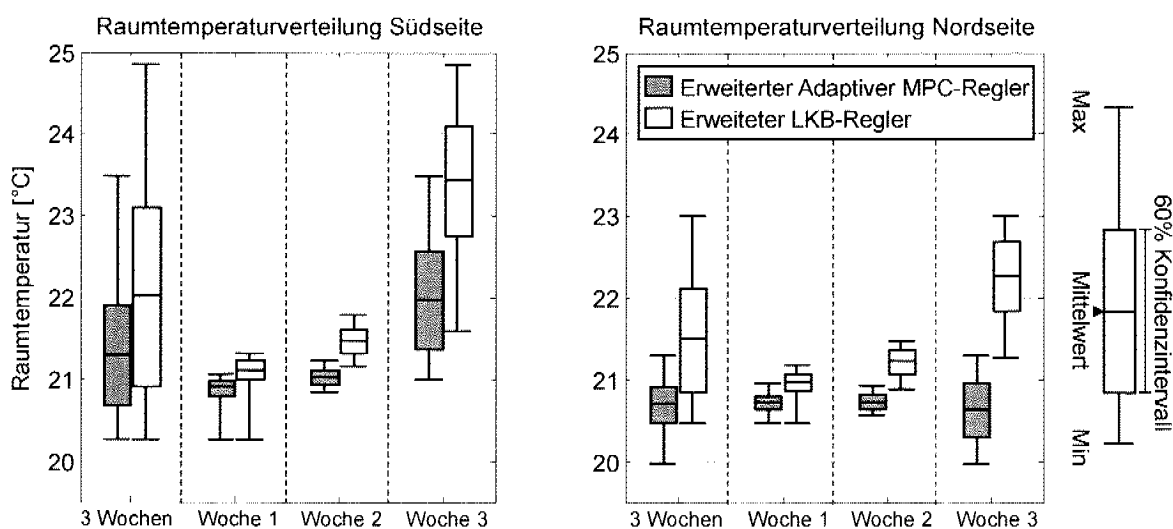


Abb. 7.28: Statistiken über die Raumtemperatur während jeweils der 3 Wochen und der einzelnen Wochen. Bild links: Raumtemperaturverteilungen für den Raum auf der Südseite. Bild rechts: Raumtemperaturverteilungen für den Raum auf der Nordseite.

Die Verteilungen der Raumtemperatur für die einzelnen Wochen bzw. die ganze Emulationsdauer auf der Südseite und Nordseite sind in Abb. 7.28 gezeigt. Da der MPC-Regler über die Raumtemperatur verfügt, kann er zudem die Sonnenstrahlung erkennen und abgleichen.

Der Vergleich der gelieferten Wärme und der verbrauchten elektrischen Energie ist im linken Bild von Abb. 7.29 gezeigt. Wie auch in Abb. 7.28 zu sehen ist, liefert der MPC-Regler im Mittel weniger Wärme im Haus, deshalb ist auch die Arbeitszahl mit dem MPC-Regler etwas höher (rechtes Bild in Abb. 7.29). Die Arbeitszahl der Wärmepumpe für die Speicherladung ist wegen den höheren Vorlauftemperaturen kleiner als für die Gebäudeheizung. Der LKB-Regler erreicht eine bessere Arbeitszahl, da der Speicher weniger oft geladen wird. Als Konsequenz sind jedoch die Temperaturen am Ausgang des Speichers im Mittel etwas tiefer (vgl. Abb. 7.21 mit Abb. 7.25).

Mit Energiekosten von 0.18 CHF/kWh während der Hochtarifzeit und 0.05 CHF/kWh während der Niedertarifzeit könnten für die drei Emulationswochen im Vergleich zu konventionellen Reglern mit einem Niedertarifanteil von 50 % 5 bis 10 CHF gespart werden. Abb. 7.30 zeigt den erreichten Niedertarifanteil und die theoretischen Kosten für die drei Emulationswochen mit beiden Reglern.

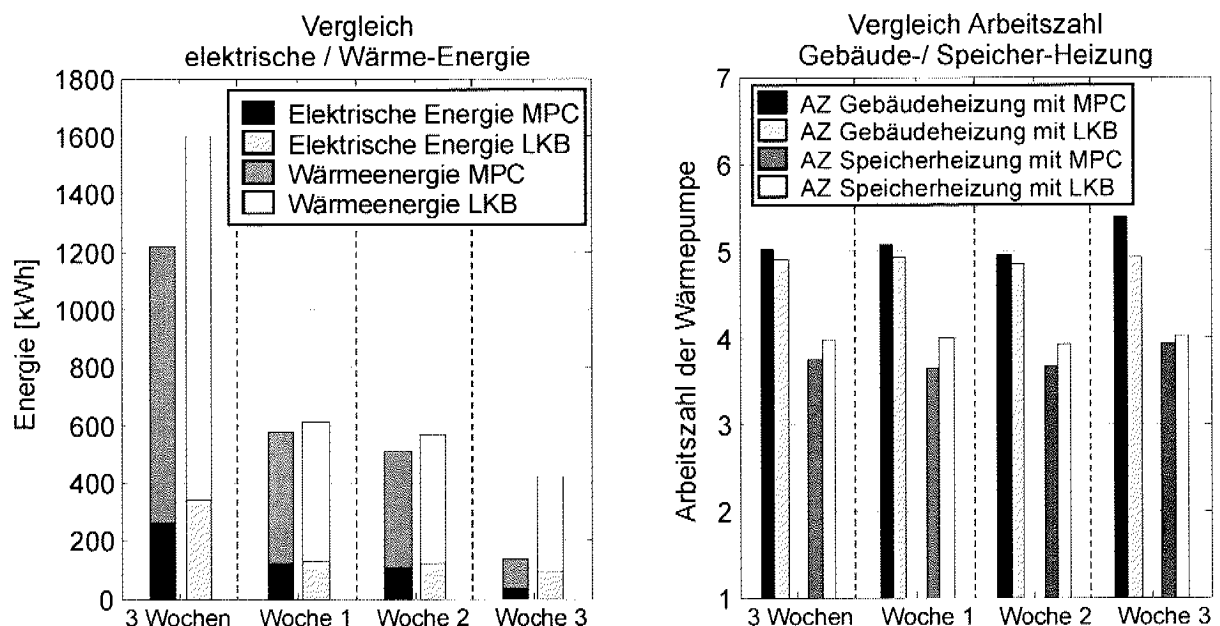


Abb. 7.29: Links: Verbrauchte elektrische Energie und gelieferte Wärme von der Testwärmepumpe während der Emulation am Prüfstand mit dem MPC- und dem LKB-Regler. Rechts: Arbeitszahl der Wärmepumpe für die Gebäudeheizung und die Speicherheizung.



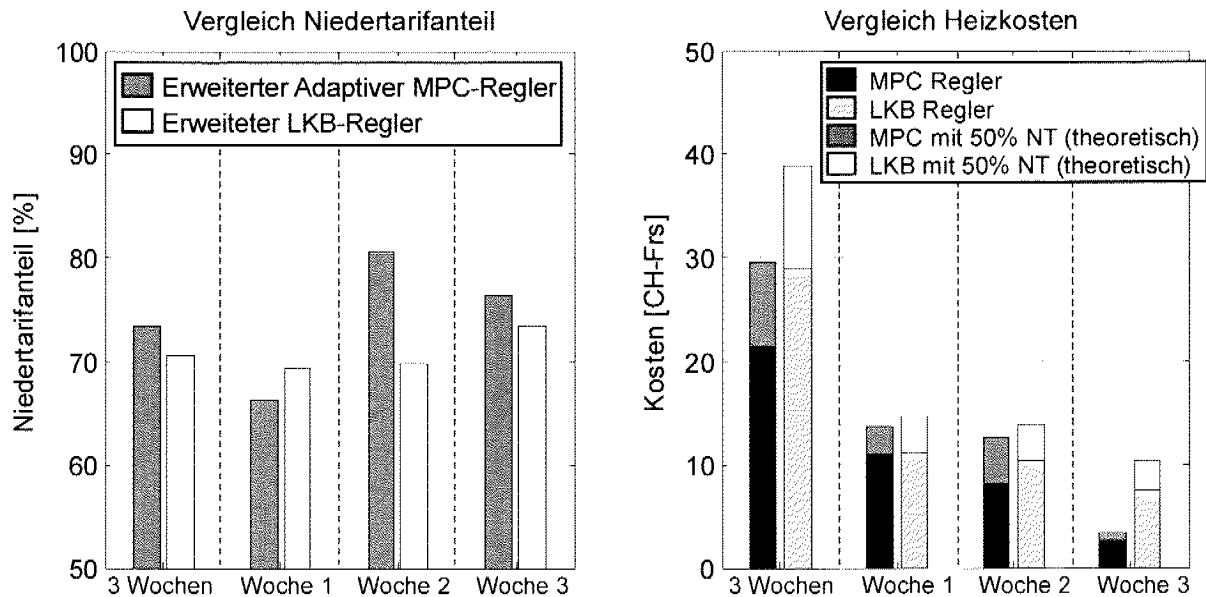


Abb. 7.30: Links: Niedertarifanteil der verbrauchten elektrischen Energie während der Emulation am Prüfstand mit dem MPC- und dem LKB-Regler. Rechts: Simulierte Heizkosten und Vergleich mit den theoretischen Kosten mit nur 50 % Niedertarifanteil.

## 7.4 Diskussion

Die Hauptergebnisse dieser Studie und die Hauptvorteile der PBM-Regelungsstrategie gegenüber herkömmlichen Reglern sind in den folgenden Punkten zusammengefasst:

- **Kosteneinsparung von 10-20 %:** Die PBM-Regelungsstrategie ermöglicht eine gezielte Plazierung der Heizpulse und deckt den Tagesenergiebedarf des Gebäudes. Der Anteil von 70 %-80 % der Heizenergie kann somit ohne Einbusse des Raumtemperatur-Komforts in die Niedertarifzeit verlegt werden (gegenüber 40 %-60 % bei den konventionellen Regelungsstrategien ohne Zeitprogramm). Bei einem Jahresenergieverbrauch von 5'000 kWh können somit bei den erwähnten Preisen 50 bis 100 CHF gespart werden.
- **Längere mittlere Laufzeiten der Heizpulse:** Die gewünschte und die minimale Pulslänge bzw. Pausenlänge können beliebig eingestellt werden. Somit bleibt die Wärmepumpe immer genügend lang eingeschaltet bzw. ausgeschaltet und der COP wird optimiert.

- **Tiefe Wartungskosten und einfache Bedienung:** Nach der Implementierung in einem Reglergerät sind keine Nacheinstellungen mehr nötig, so dass praktisch keine Wartungskosten zu erwarten sind. Die Bedienung für die Einstellung der Reglerparameter ist gleich wie oder sogar einfacher als bei den konventionellen Reglern.
- **Kombination der Regelung der Gebäudeheizung und der Warmwasseraufbereitung für Kombianlagen:** Die erweiterten PBM-Regler können sowohl die Warmwasseraufbereitung als auch die Gebäudeheizung koordiniert steuern.

Der MPC-Regler bietet zusätzlich folgende Vorteile:

- **Selbstregulierende Gebäudekennlinie und Gebäudeparameter:** Nach der Installation der Wärmepumpe und nach der ungefähren Angabe des Gebäudetyps stellt sich die Energiekennlinie des Gebäudes automatisch ein. Der teure Einsatz eines Heizungstechnikers wegen zusätzlichen Regleranpassungen kann somit eingespart werden.
- **Optimierung des COP bezüglich des Tages:** Die Vorhersage der Wärmepumpenleistungszahl im MPC-Algorithmus basierend auf Wetterprognose ermöglicht eine optimale Verteilung der Heizpulse, so dass der Verbrauch von elektrischer Energie weiter minimiert wird.
- **Frühzeitige Reaktion des Reglers bei einem Wetterumschlag dank der Wetterprognose von MeteoSchweiz.** Der MPC-Regler verfügt über eine Schnittstelle mit dem Server von MeteoSchweiz, so dass die neusten Vorhersagedaten vom Regler genutzt werden können, um eine optimale Verteilung der Heizpulse zu bestimmen. Ein Wetterumschlag kann bis auf einen Tag im voraus im Regler berücksichtigt werden.
- **Erkennung der Sonnenstrahlung:** Die Rückführung der Raumtemperatur im Regler ermöglicht eine Erkennung der mittleren Sonnenstrahlung. Die erkannte Sonnenstrahlung wird als ein Absenken der Gebäudekennlinie aufgefasst und wird vom Regler dementsprechend in der Berechnung des Wärmebedarfs berücksichtigt.

Seite Leer /  
Blank leaf

## A Das Carnot-Blockset

Das CARNOT-Blockset ist ein Tool, um in Simulink komplexe physikalische Modelle zu erstellen und zu simulieren. Jedes Objekt wird als Baustein modelliert, welcher mit anderen Objekten anhand spezieller CARNOT-Vektoren gekoppelt ist. Die CARNOT-Vektoren enthalten alle wichtigen Informationen, um die Interaktion zwischen den Bausteinen zu ermöglichen.

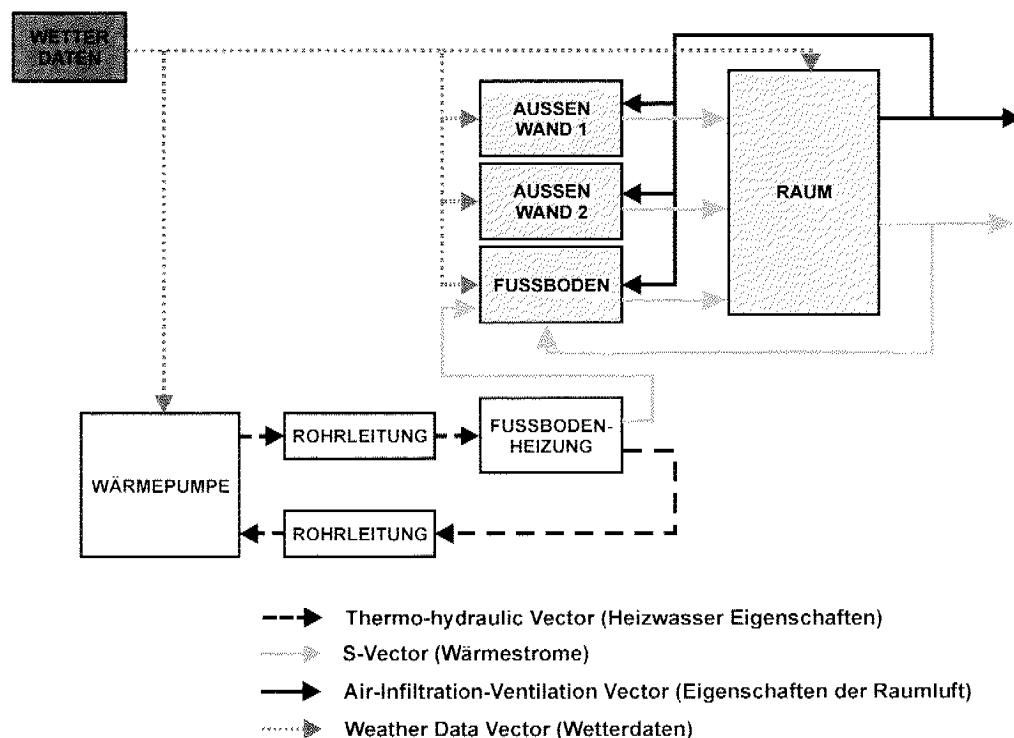


Abbildung 7.1: Schema des Konzeptes des CARNOT-Blocksets für ein Beispiel einer Gebäudeheizung.

Die Abbildung 7.1 zeigt ein Beispiel einer Gebäudeheizung. Jeder Baustein enthält ein physikalisches Modell des Objekts. Die Objekte interagieren untereinander anhand verschiedener Vektoren. Zum Beispiel werden der Raumblock vom Wetter und die Temperaturen von den Innenoberflächen der Wände und des Fußbodens beeinflusst.

Die CARNOT-Vektoren für das Simulationsmodell der Kombianlage sind:

- **Thermohydraulic Vector [THV]:** Der THV-Vektor enthält alle Eigenschaften einer Flüssigkeit (wie Heizwasser oder Warmwasser). Die wichtigsten Elemente des THV-Vektors sind:
  - Temperatur
  - Massenstrom
  - Dichte, spezifische Kapazität, Druck
- **Building Vector [S]:** Der S-Vektor beschreibt den Wärmestrom-Austausch zwischen den Bausteinen. Die Wärmeströme werden nach Typ unterteilt:
  - Konvektive Wärmeleistung
  - Radiative Wärmeleistung
  - Sonnenstrahlungs-Leistung
  - Allgemeine Wärmegewinne
- **Air Infiltration Vector [AIV]:** Informationen über die Raumlufte. Dieser Vektor wird verwendet, um die Raumlufte mit den Wänden und dem Fussboden zu koppeln.
  - Konvektive Raumtemperatur
  - Radiative Raumtemperatur
  - Empfindliche Raumtemperatur
  - Druck
- **Weather Data Vektor:** Dieser Vektor beschreibt das Wettergeschehen. Die wichtigsten Elemente für das Simulationsmodell sind:
  - Aussenlufttemperatur
  - Temperatur des Luftraums
  - Direkte Sonnenstrahlung
  - Diffuse Sonnenstrahlung
  - Sonnenposition

Der Raum-Baustein ist für die Berechnung der Raumtemperatur zuständig. Hier werden alle Wärmeströme (durch die Wände, Fussboden, Radiatoren usw.) aufsummiert und die Energiebilanz wird berechnet. Für das Lösen der

Energiebilanz werden der radiative und der konvektive Anteil des Wärmeaustauschs zwischen dem Raum und den nebenstehenden Objekten separat betrachtet. Anschliessend wird eine die radiative bzw. konvektive Raumtemperatur berechnet. Die empfindliche Temperatur (was der Mensch oder der Sensor fühlt) besteht aus der gewichteten Summe der radiativen und konvektiven Temperaturen. Für die Berechnung der konvektiven Temperatur wird einfach die Wärmebilanz für die Raumlufthmasse berechnet. Die radiative Temperatur besteht hingegen aus der gewichteten Summe der Oberflächentemperaturen aller Objekte, welche vom Raum „gesehen“ werden.

Die Wand-, Dach- und Fussboden-Blöcke sind mit dem Beukenmodell implementiert. Das Objekt wird in Schichten unterteilt und für jede Schicht wird die Wärmestrombilanz bzw. die Temperatur berechnet. Für die Berechnung der Sonnenstrahlungseffekte wird sowohl die Intensität der Strahlung als auch die Orientierung der Wand und die Position der Sonne berücksichtigt. Eine Schicht mit einer internen Wärmequelle (z.B. für den Fall einer Fussbodenheizung) wird aktive Schicht genannt.

In der Fussbodenheizung wird die Wärme vom Heizwasser in den Fussboden übertragen. Die Wärmeleistung zwischen Heizwasser und Boden wird mit einer Wärmebilanz bestimmt. Das Heizwasser im Fussboden wird als Speicher mit einer konstanten Temperatur modelliert. Die vom Heizwasser gelieferte Wärmeleistung wird als interne Wärmequelle in die aktive Schicht des Fussbodenblocks gebracht.

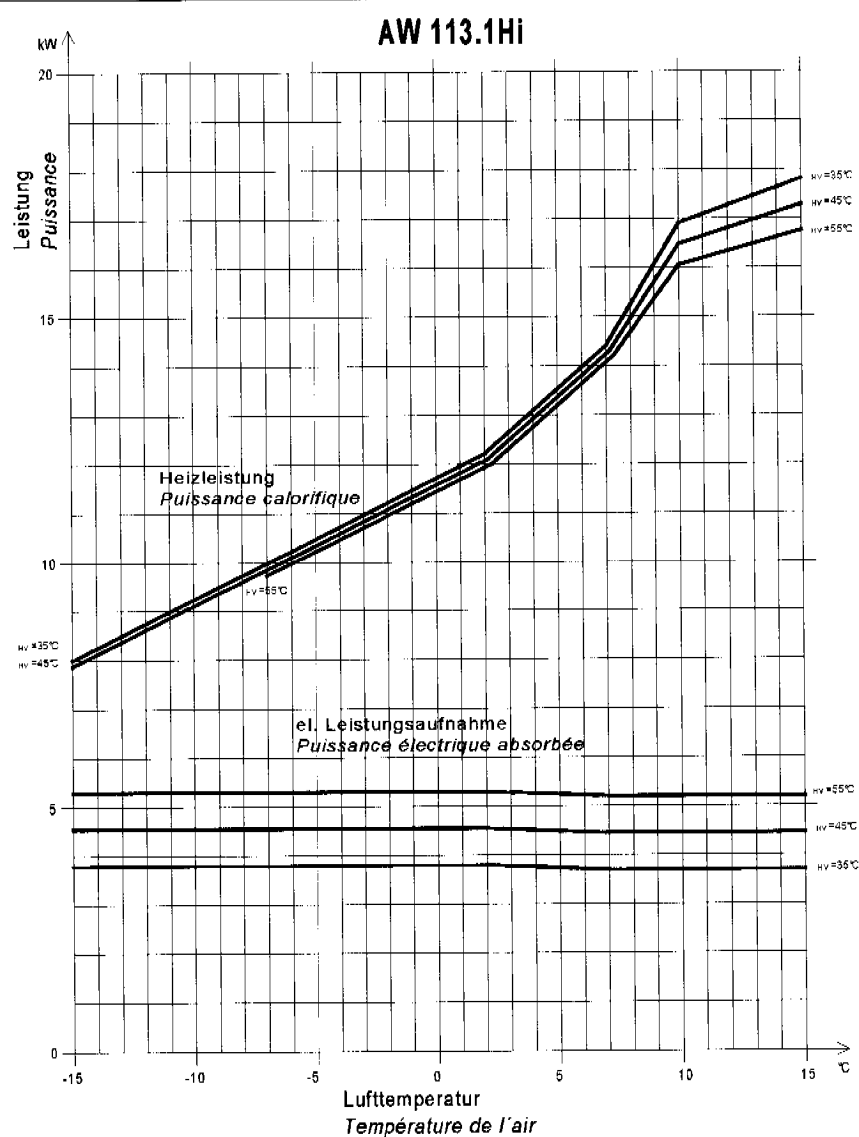
Im Speichermodell (für die Simulation der Warmwasseraufbereitung) wird das Wasser in Schichten unterteilt. Ähnlich dem Wandmodell wird für jede Schicht die Wassertemperatur anhand einer Wärmestrombilanz berechnet. Dazu werden die Interaktionen zwischen Schichten (Wärmeleitung und Massenströme) wie die Wärmeverluste nach aussen berücksichtigt.

Seite Leer /  
Blank leaf

## B Wärmepumpenkennlinie

### B.1 Luft/Wasser-Wärmepumpe AW 113.1

<b>WÄRMEPUMPEN</b> LUFT / WASSER Technische Daten	<b>POMPES À CHALEUR</b> AIR / EAU Données techniques	<b>11.113.3</b> Rev.: b Seite 2 / 2
--	---	---




Toleranz Leistungswerte 5%  
Technische Änderungen vorbehalten

Tolérance des puissances 5%  
Sous réserve de modifications techniques

Viessmann (Schweiz) AG Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik Postfach 196 CH-9320 Arbon	Typ: AW113 CD60 3004 333	15.11.04 AW113_b udt T.H.H.
--	--------------------------	-----------------------------------



<b>WÄRMEPUMPEN</b> LUFT / WASSER Technische Daten	<b>POMPES À CHALEUR</b> AIR / EAU Données techniques	11.113.3 Rev.:b Seite 1 / 2
--	---	-----------------------------------

Leistungsdaten in kW weitere Betriebspunkte siehe Diagramm Seite 2	Puissances en kW autres points de fonctionnement : voir diagramme page 2	 <b>AW113.1</b> silber/blau		
Betriebspunkt	Point de fonctionnement [°C]	A2 / W35	A-5 / W45	A-8 / W45
Heizleistung	Puissance de chauffage [kW]	12.2 <sup>(1)</sup>	10.4	9.8
Kälteleistung (Umweltwärme)	Puissance frigorifique (Energie de l'environnement) [kW]	8.40	5.85	5.25
el. Aufnahmeleistung	Puissance électrique absorbée [kW]	3.80 <sup>(2)</sup>	4.55	4.55
COP (Leistungszahl)	COP (Coefficient de performance)	3.21	2.27	2.13

Elektrische Daten	Données électriques	Einheit / Unité	Wert / Valeur
Nennspannung / Frequenz	Tension nominale / fréquence	V / Hz	3 x 400 / 50
Betriebsstrom max.	Courant de fonctionnement max	A	10
Anlaufstrom	Courant de démarrage	A	23 <sup>(3)</sup>
Blockierstrom LRA	Courant à rotor bloqué LRA	A	59.5
Absicherung in der Zuleitung	Fusible (à action retardée) sur conducteur	A	16 träge

Wärmeabgabe	Distribution de chaleur	Einheit / Unité	Wert / Valeur
Heizwasserdurchsatz	Débit eau de chauffage	l/h	1200
Heizwasseranschluss	Raccordement eau de chauffage	Zoll / pouces	1
Druckverlust Kondensator	Perte de charge au condenseur	mbar	40
Vorlauftemperatur max.	Température de départ max	°C	45 (A-15)
		°C	55 (A-5)

Wärmegewinnung	Source de chaleur	Einheit / Unité	Wert / Valeur
Ventilatorleistung	Puissance abs. ventilateur	W	220
Luftmenge	Débit d'air	m³/h	3500
max. zul. Druckverlust Zuluft- + Abluftkanal	Perte de pression adm. à l'aspiration et au refoulement	Pa	30
Lufttemperatur min.	Temp. air min.	°C	-15
Lufttemperatur max.	Temp. air max.	°C	+35
Abtauleistung	Puissance de dégivrage	W	ca. 4000
Anteil Abtauzeit von Laufzeit	Part du temp. de fonctionnement pour le dégivrage	%	7 - 17

Wärmepumpe	Pompe à chaleur	Einheit / Unité	Wert / Valeur
Abmessungen (Höhe x Breite x Tiefe)	Dimensions (hauteur x larg. x prof.)	mm	1470 / 1200 / 760
Geräusch (Freifeld 5m)	Niveau sonore	dB	45
Kompressoren vollhermetisch	Compresseurs hermétiques	Stk. / pces.	1
Arbeitsmittelfüllung R407C	Quantité de fluide frigorigène R407C	kg	4.4
Gewicht	Poids	kg	260

<sup>(1)</sup> Nenn-Heizleistung nach EN 255<sup>(1)</sup> Puissance de chauffage nominale selon norme EN 255<sup>(2)</sup> el. Nennleistung P<sub>NT</sub><sup>(2)</sup> Puissance électrique nominale P<sub>NT</sub><sup>(3)</sup> mit elektronischem Anlaufstrombegrenzer<sup>(3)</sup> avec limiteur de courant de démarrage électrique

Toleranz Leistungswerte 5%  
Technische Änderungen vorbehalten

Tolérance des puissances 5%  
Sous réserve de modifications techniques

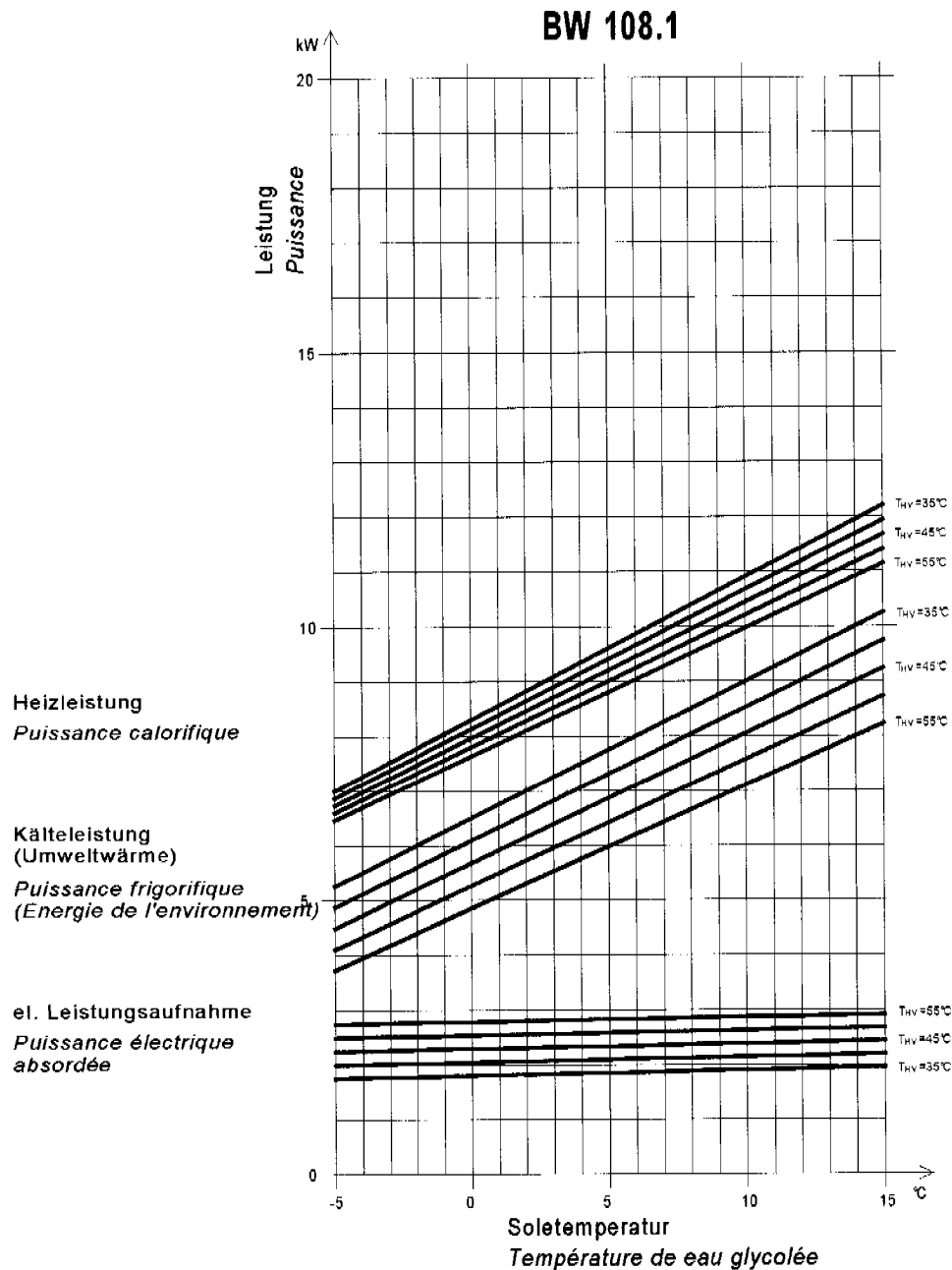
Viessmann (Schweiz) AG Geschäftsbereich SATAG Thermochnik Postfach 196 CH-9320 Arbon	Typ: AW113 CD60 3004 333	15.11.04 AW113_b.cdt H.Hohl
--	--------------------------	-----------------------------------

## B.2 Sole/Wasser-Wärmepumpe BW 108.1

**WÄRMEPUMPEN** SOLE / WASSER  
Technische Daten

**POMPES À CHALEUR** EAU GLYCOLÉE/EAU  
Données techniques

**12.108.3**  
Rev.: a  
Seite 2 / 2



Toleranz Leistungswerte 5%  
Technische Änderungen vorbehalten

Tolérance des puissances 5%  
Sous réserve de modifications techniques

Viessmann (Schweiz) AG  
Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik  
Postfach 196 CH-9320 Arbon

**BW 108 CD60 3004 320**

06.10.04  
BW108\_a.o.d.  
M. Bartholdi

<b>WÄRMEPUMPEN</b> SOLE / WASSER <b>Technische Daten</b>	<b>POMPES À CHALEUR</b> EAU GLYCOLÉE/EAU <b>Données techniques</b>	<b>12.108.3</b> Rev.: a Seite 1 / 2
---	---	---

<b>Leistungsdaten in kW</b> weitere Betriebspunkte siehe Diagramm Seite 2	<b>Puissances en kW</b> autres points de fonctionnement : voir diagramme page 2	<b>Natura</b> silber/blau <b>BW108.1</b>		
Betriebspunkt	Point de fonctionnement [°C]	B0 / W35	B2 / W45	B2 / W55
Heizleistung	Puissance de chauffage [kW]	8.3 <sup>(1)</sup>	8.5	8.1
Kälteleistung (Umweltwärme)	Puissance frigorifique (Energie de l'environnement) [kW]	6.50	6.25	5.30
el. Aufnahmeleistung	Puissance électrique absorbée [kW]	1.80 <sup>(2)</sup>	2.25	2.75
<b>COP (Leistungszahl)</b>	<b>COP (Coefficient de performance)</b>	4.61	3.77	2.95

<b>Elektrische Daten</b>	<b>Données électriques</b>	<b>Einheit / Unité</b>	<b>Wert / Valeur</b>
Nennspannung / Frequenz	Tension nominale / fréquence	V / Hz	3 x 400 / 50
Betriebsstrom max.	Courant de fonctionnement max	A	6.6
Anlaufstrom	Courant de démarrage	A	14 <sup>(3)</sup>
Blockierstrom LRA	Courant à rotor bloqué LRA	A	43.5
Absicherung in der Zuleitung	Fusible (à action retardée) sur conducteur	A	16 träge

<b>Wärmeabgabe</b>	<b>Distribution de chaleur</b>	<b>Einheit / Unité</b>	<b>Wert / Valeur</b>
Heizwasserdurchsatz	Débit eau de chauffage	l/h	700
Heizwasseranschluss	Raccordement eau de chauffage	Zoll / pouces	1
Druckverlust Kondensator	Perte de charge au condenseur	mbar	40
Vorlauftemperatur max.	Température de départ max	°C	55

<b>Wärmegewinnung</b>	<b>Source de chaleur</b>	<b>Einheit / Unité</b>	<b>Wert / Valeur</b>
Sole-Durchsatz	Débit de eau glycolée	l/h	2100
Sole-Anschluss	Raccordement eau glycolée	Zoll / pouces	1
Druckverlust Verdampfer	Perte de charge à l'évaporateur	mbar	90
max. Sole-Eintrittstemperatur (bei höherer Temp. Mischer vorschalten)	Temp. max d'entrée eau glycolée (pour temp. sup. ouvrir vanne mélangeuse)	°C	25
min. Sole-Eintrittstemperatur	Temp. min. entrée eau glycolée	°C	-5
Frostschutzkonzentration (Aethylenglykol)	Concentration d'antigel (éthylène- glycol)		
- für Erdwärmesonden	- pr. sondes géothermiques verticales	%	23
- für Flachregister	- pour registre terrestre horizontal	%	33

<b>Wärmepumpe</b>	<b>Pompe à chaleur</b>	<b>Einheit / Unité</b>	<b>Wert / Valeur</b>
Abmessungen (Höhe x Breite x Tiefe)	Dimensions (hauteur x larg. x prof.)	mm	945 / 600 / 650
Kompressoren vollhermetisch	Compresseurs hermétiques	Stk. / pces.	1
Arbeitsmittelfüllung <b>R407c</b>	Quantité de fluide frigorigène <b>R407c</b>	kg	2.2
Gewicht	Poids	kg	120
Schall-Leistung (Distanz-unabhängig)	Puissance acoustique (indépendante de distance)	dBA	50

<sup>(1)</sup> Nenn-Heizleistung nach EN 255<sup>(1)</sup> Puissance de chauffage nominale selon norme EN 255<sup>(2)</sup> el. Nennleistung  $P_{NT}$ <sup>(2)</sup> Puissance électrique nominale  $P_{NT}$ <sup>(3)</sup> mit elektronischem  
Anlaufstrombegrenzer<sup>(3)</sup> avec limiteur de courant de démarrage électronique

Toleranz Leistungswerte 5%

Tolérance des puissances 5%

Technische Änderungen vorbehalten

Sous réserve de modifications techniques

Viessmann (Schweiz) AG Geschäftsbereich SATAG Thermotechnik Postfach 196 CH-9320 Arbon	<b>BW 108 CD60 3004 320</b>	05.10.04 BW108 a.o.d. M. Bartholdi
--	-----------------------------	--

## Symbolliste

### *Allgemeine Abkürzungen*

aLMo	Alpine Model
ARW	Antireset-Windup
ARX	Controlled Autoregressive
ARMAX	Controlled Autoregressive with Moving Average
BFE	Bundesamt für Energie
BW	Brine/Water
CARNOT	Conventional And Renewable eNergy systems OpTimization Blockset
COP	Coefficient of Performance
EKF	Extended Kalman-Filter
ELS	Extended Least Squares
EW	Sperre der Wärmepumpenheizung vom Elektrizitätswerk
FHBB	Fachhochschule beider Basel
HIL	Hardware in the Loop
HST	Heisser Soletank
HT	Hochtarifzeit
HWP	Hilfswärmepumpe
HWT	Heisser Wassertank
KD	Kondensator
KF	Kalman-Filter
KST	Kalter Soletank
KWT	Kalter Wassertank
LQ	Linear Quadratisch (Gütekriterium)
LQ-MPC	Model prädiktive Regler mit linearem quadratischem Gütekriterium
LR	Lineare Regression
LS	Least Squares
KW	Kaltwasser

MAP	Maximum a posteriori Schätzung
Mi	Mischventil
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
ML	Maximum Likelihood
MPC	Model Predictive Control
NT	Niedertarifzeit
OE	Output Error
PB	Pulsbreite
PBM	Pulsbreitenmodulation
PE	Prediction Error
PEM	Prediction Error Method
PID	Regler mit Verstärkungs- (P), Integrator- (I) und Differentiatoranteil (D)
PLR	Pseudolinear Regression
PPI	Prädiktiver PI-Regler
RL	Rücklauf
RLS	Recursive Least Squares
RPEM	Recursive Prediction Error Method
RML	Recursive Maximum Likelihood
TWP	Testwärmepumpe
VD	Verdampfer
VL	Vorlauf
WP	Wärmepumpe
WT	Wärmetauscher
WW	Warmwasser (warmes Trinkwasser)

**Symbole**

$A_{IO}(\theta, q^{-1}) \in \mathbb{R}^{ny \times ny}$	Polynomialmatrizen für die Input-Output Darstellung (vgl. (Gl. 3.4))
$B_{IO}(\theta, q^{-1}) \in \mathbb{R}^{ny \times nu}$	
$C_{IO}(\theta, q^{-1}) \in \mathbb{R}^{ny \times ny}$	
$A_B$	Gesamtfläche des Fussbodens [m <sup>2</sup> ]
$c_B$	Mittlere spezifische Wärmekapazität des Fussbodens [J/(kg · K)]
$C_{E(i)}$	Wärmekapazität der Erde in der Schicht i (Erdsondenmodell) [J/K]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg · K)]
$c_{p,S}$	Spezifische Wärmekapazität der Sole [J/(kg · K)]
$c_{p,W}$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers [J/(kg · K)]
$D(\theta, x(t)) \in \mathbb{R}^{ny \times n\theta}$	Definition in (Gl. 3.69)
$dl$	Schichtdicke im Erdsondenmodell [m]
$D_B$	Durchmesser der Bohrung der Erdwärmesonde [m]
$D_r$	Durchmesser eines Rohrs der Erdwärmesonde [m]
$e(t) \in \mathbb{R}^{ny \times 1}$	Weisses Rauschen
$f_{HWP}$	Stellsignal für die Hilfswärmepumpe (Frequenz)
$F(\theta) \in \mathbb{R}^{nx \times nx}$	Systemmatrizen des zeitdiskreten Zustandsraummodells
$G_u(\theta) \in \mathbb{R}^{nx \times nu}$	
$G_v(\theta) \in \mathbb{R}^{nx \times nu}$	
$H(\theta) \in \mathbb{R}^{ny \times nx}$	
$G_{IO}(\theta, q^{-1}) \in \mathbb{R}^{ny \times nu}$	Übertragungsmatrizen für die Input-Output Darstellung
$H_{IO}(\theta, q^{-1}) \in \mathbb{R}^{ny \times ny}$	
$G_s(s)$	Zeitkontinuierliche Übertragungsfunktion des Gebäudes
$G_s(z)$	Zeitdiskrete Übertragungsfunktion des Gebäudes
$Hess(\theta) \in \mathbb{R}^{n\theta \times n\theta}$	Hesssche Matrix
$I$	Identitätsmatrix
$K(t) \in \mathbb{R}^{nx \times ny}$	Kalman Verstärkungsmatrix
$L(t) \in \mathbb{R}^{nX \times ny}$	Verstärkungsmatrix für $X$ im rekursiven Algorithmus

$L_{E\{i\}}$	Thermische Leitfähigkeit der Erde in der Schicht $i$ (Erdsondenmodell) [W/K]
$L_x(t) \in \mathbb{R}^{n_x \times n_y}$	Verstärkungsmatrix für $x$ im rekursiven Algorithmus
$L_\theta(t) \in \mathbb{R}^{n_\theta \times n_y}$	Verstärkungsmatrix für $\theta$ im rekursiven Algorithmus
$L_{Sonde}$	Länge der Erdwärmesonde [m]
$L_1(q^{-1}, \theta) \in \mathbb{R}^{n_y \times n_y}$	Übertragungsmatrizen des optimalen Prädiktors (Input-Output Darstellung, (Gl. 3.14))
$L_1(q^{-1}, \theta) \in \mathbb{R}^{n_y \times n_u}$	
$Lik(\theta) \in \mathbb{R}^{n_\theta \times n_\theta}$	Likelihood Funktion
$M(\theta, x, u) \in \mathbb{R}^{n_x \times n_\theta}$	Definition in (Gl. 3.69)
$m_B$	Masse des Fussbodens [kg]
$\dot{m}_S$	Massenstrom durch die Wärmepumpe auf der Soleseite [kg/s]
$\dot{m}_W$	Massenstrom durch die Wärmepumpe auf der Heizwasserseite [kg/s]
$N$	Anzahl Daten
$na$	Ordnung der Polynomialmatrix $A_{IO}$ (Gl. 3.4)
$N_{Axi}$	Anzahl Knoten in axialer Richtung für das Erdsondenmodell.
$N_{Rad}$	Anzahl Knoten in radialer Richtung für das Erdsondenmodell.
$nb$	Ordnung der Polynomialmatrix $B_{IO}$ (Gl. 3.4)
$nc$	Ordnung der Polynomialmatrix $C_{IO}$ (Gl. 3.4)
$nr$	Anzahl Komponenten im Regressor ( $nr = na + nb$ )
$n\theta$	Anzahl Parameter
$nu$	Anzahl Eingangsgrößen
$Nu$	Nusseltzahl
$nx$	Anzahl Zustandsgrößen
$ny$	Anzahl Ausgangsgrößen
$p(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
$p(x y)$	Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
$P(t) \in \mathbb{R}^{n_\theta \times n_\theta}$	Schätzung der Kovarianzmatrix des Parametervektors $\hat{\theta}$ (vgl. $\Sigma_3$ )
$Pr$	Prandtlzahl
$P_{WP}$	Elektrische Leistung der Wärmepumpe [W]
$Q \in \mathbb{R}^{n_y \times n_y}$	Schätzung der Kovarianzmatrix der Residuen [W]
$q^{-1}$	Shift-Operator ( $q^{-1} \cdot u = u(t-1)$ )

$\dot{Q}_{HS,Soll}$	Soll-Wärmeströme für die entsprechenden Tanks HS, HW, KS und KW [ W ]
$\dot{Q}_{HW,Soll}$	
$\dot{Q}_{KS,Soll}$	
$\dot{Q}_{KW,Soll}$	
$\dot{Q}_{HS,Stör}$	Gemessene Stör- (nicht regelbare) Wärmeströme in den entsprechenden Tanks HS, HW, KS und KW [ W ]
$\dot{Q}_{HW,Stör}$	
$\dot{Q}_{KS,Stör}$	
$\dot{Q}_{KW,Stör}$	
$\dot{Q}_{HWP,Aus}$	Wärmestrom am Ausgang der Hilfswärmepumpe [ W ]
$\dot{Q}_{HWP,Ein}$	Wärmestrom am Eingang der Hilfswärmepumpe [ W ]
$\dot{Q}_{Bed}$	Momentaner Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes [ W ]
$\dot{Q}_{S,m}$	Wärmestrom vom HS-Tank in den KS-Tank wegen der Tankflüssigkeitsmischung mit Mi5 [ W ]
$\dot{Q}_{Stat}$	Mittlere statische Wärmegewinne im Raum [ W ]
$\dot{Q}_{Tank,Soll}$	$\dot{Q}_{HS,Soll}$ , $\dot{Q}_{HW,Soll}$ , $\dot{Q}_{KS,Soll}$ oder $\dot{Q}_{KW,Soll}$ [ W ]
$\dot{Q}_{Tank,Stör}$	$\dot{Q}_{HS,Stör}$ , $\dot{Q}_{KS,Stör}$ , $\dot{Q}_{HW,Stör}$ oder $\dot{Q}_{KW,Stör}$ [ W ]
$\dot{Q}_{TWP,Aus}$	Wärmestrom am Ausgang der Testwärmepumpe [ W ]
$\dot{Q}_{TWP,Ein}$	Wärmestrom am Eingang der Testwärmepumpe [ W ]
$\dot{Q}_{WB}$	Wärmestrom des Heizwassers in den Fussboden [ W ]
$\dot{Q}_{WP}$	Wärmepumpenwärmestrom [ W ]
$\dot{Q}_{WT}$	Wärmetauscherwärmestrom [ W ]
$\dot{Q}_{WT,Soll}$	Sollwärmestrom für den Wärmetauscher [ W ]
$\dot{Q}_{W,m}$	Wärmestrom vom HW-Tank in den KW-Tank wegen der Tankflüssigkeitsmischung mit Mi4 [ W ]
$r(t) \in \mathbb{R}^{ny \times 1}$	Ausgangsrauschen (Zustandsraummodell, (Gl. 3.7))
$Re$	Reynoldszahl
$R_{E\langle i \rangle}$	Thermischer Widerstand der Erde in der Schicht i (Erdsondenmodell) [ K/W ]
$r_i$	Radius der i-ten Schicht im Erdsondenmodell [ m ]
$R_k \in \mathbb{R}$	Gewichtungsfaktor des MPC-Problems zum Zeitpunkt k
$R_r(\theta) \in \mathbb{R}^{ny \times ny}$	Kovarianzmatrix des Ausgangsrauschens (Gl. 3.7)



$R_S$	Thermischer Widerstand der Sole (Erdsondenmodell) [K/W]
$R_{vr}(\theta) \in \mathbb{R}^{nx \times ny}$	Kreuzkovarianzmatrix zwischen Prozessrauschen und Ausgangsrauschen (Gl. 3.7)
$R_v(\theta) \in \mathbb{R}^{nx \times nx}$	Kovarianzmatrix des Prozessrauschens (Gl. 3.7)
$rz_i$	Radius des Massenschwerpunktes der i-ten Schicht im Erdsondenmodell [m]
$Tarif_k$	Heizkosten zum Zeitpunkt k [CHF/KWh]
$T_A(t)$	Aussenlufttemperatur [K]
$T_B(t)$	Temperatur des Fussbodens [K]
$\hat{T}_B(t)$	Schätzung der Fussbodentemperatur [K]
$T_{E\langle k,i \rangle}$	Temperatur der Erde im Sondennahbereich in den Koordinaten $\langle k, i \rangle$ (i: radiale Richtung, k: axiale Richtung) [K]
$T_{KS}$	Temperatur im KS-Tank [K]
$T_{KW}$	Temperatur im KW-Tank [K]
$T_{HS}$	Temperatur im HS-Tank [K]
$T_{HW}$	Temperatur im HW-Tank [K]
$T_{Prim, Ein}$	Temperatur am Eingang der Primärseite des Wärmetauschers [K]
$T_{Prim, Aus}$	Temperatur am Ausgang der Primärseite des Wärmetauschers [K]
$T_R(t)$	Raumlufthtemperatur [K]
$\hat{T}_R(t)$	Schätzung der Raumlufthtemperatur [K]
$Tri$	Trichter-Formel
$T_{RL}(t)$	Temperatur des Heizwassers am Eintritt der Wärmepumpe [K]
$\hat{T}_{RL}(t)$	Schätzung der Heizwasserrücklaufthtemperatur [K]
$T_{R, Konv}$	Konvektive Raumthtemperatur [K]
$T_{R, Rad}$	Radiative Raumthtemperatur [K]
$T_{Sek, Ein}$	Temperatur am Eingang der Sekundärseite des Wärmetauschers [K]
$T_{Sek, Aus}$	Temperatur am Ausgang der Sekundärseite des Wärmetauschers [K]
$T_{S, Ab}$	Temperatur der hinunterfliessenden Sole (Erdsonde) [K]
$T_{S, Auf}$	Temperatur der hinaufströmenden Sole (Erdsonde) [K]
$T_{S, m}$	Solethtemperatur nach der Mischung mit Mi5 [K]
$T_{S, RL}$	Temperatur der Sole am Eingang der Wärmepumpe [K]

$T_{S,VL}$	Temperatur der Sole am Ausgang der Wärmepumpe [K]
$T_{Tank}$	$T_{KS}$ , $T_{KW}$ , $T_{HS}$ oder $T_{HW}$ [K]
$T_{VL}(t)$	Temperatur des Heizwassers am Austritt der Wärmepumpe [K]
$T_{W,m}$	Heizwassertemperatur nach der Mischung mit Mi4 [K]
$T_{WW,2/3}$	Warmwassertemperatur auf 2/3 der Speicherhöhe [K]
$t_{PB}$	Pulsbreite für die Pulsbreitenmodulation mit dem MPC-Regler [s]
$t_S$	Abtastzeit [s]
$t_{S,MPC}$	Abtastzeit des MPC-Reglers [s]
$u(t) \in \mathbb{R}^{nu \times 1}$	Eingangssignal
$u_{Mi}$	Stellsignal für das Mischventil
$u_{WP}$	Ein-/ Ausschaltsignal der Wärmepumpe
$U_k \in \mathbb{R}^{nx \times nx}$	Lösung der Riccati-Differentialgleichung für das MPC-Problem
$v(t) \in \mathbb{R}^{nx \times 1}$	Prozessrauschen (Zustandsraummodell, (Gl. 3.7))
$v_S$	Mischverhältnis Mi5 (der Soleseite der Anlage)
$v_W$	Mischverhältnis Mi4 (der Heizwasserseite der Anlage)
$V_t(\theta) \in \mathbb{R}$	Skalare Verlustfunktion zum Zeitpunkt t
$V_G$	Volumen der geheizten Räumen im Gebäude [m <sup>3</sup> ]
$V_H$	Volumen des Heizwassers im Fussboden [m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_W$	Volumenstrom des Heizwassers [m <sup>3</sup> /s]
$w_k \in \mathbb{R}^{nx \times 1}$	Führungsgrösse des MPC-Problems
$W(t) \in \mathbb{R}^{nx \times n\theta}$	Definition in (Gl. 3.69)
$x(t) \in \mathbb{R}^{nx \times 1}$	Zustandsvektor
$X(t) \in \mathbb{R}^{nX \times 1}$	Erweiterter Zustandsvektor
$y(t) \in \mathbb{R}^{ny \times 1}$	Ausgangsvektor
$\alpha_{Sole}$	Wärmeübergangskoeffizient der Sole [W/(K · m <sup>2</sup> )]
$\delta_{l\tau}$	Kronecker-Delta
$\Delta \dot{Q}_{HWP}(T)$	Wärmestromdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Hilfswärmepumpe in Funktion der Temperatur am Eingang des Verdampfers
$\Delta T_{Stat}$	Stationäre Temperaturdifferenz zwischen Raum und Aussenluft ohne Heizung [K]

$\Phi(t) \in \mathbb{R}^{nr \cdot ny \times ny}$	Regressor (Multiple-Output Systeme)
$\varphi(t) \in \mathbb{R}^{nr \cdot ny \times 1}$	Regressor (Single-Output Systeme)
$\eta(t) \in \mathbb{R}^{1 \times n\theta}$	Ableitung bezüglich des Parametervektors (Gl. 3.64)
$\theta \in \mathbb{R}^{n\theta \times 1}$	Parametervektor
$\hat{\theta} \in \mathbb{R}^{n\theta \times 1}$	Schätzung des Parametervektors
$\kappa_B$	Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Boden und Raum [ W/K ]
$\kappa_i(t, \theta) \in \mathbb{R}^{nx \times ny}$	Ableitung der Kalman-Verstärkungsmatrix bezüglich $\theta_i$
$\kappa_G$	Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Raum und Aussenluft [ W/K ]
$\kappa_{WB}$	Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Heizwasser und Boden (Hausmodell dritter Ordnung) [ W/K ]
$\kappa_{WR}$	Spezifischer Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Heizwasser und Raum (Hausmodell zweiter Ordnung) [ W/K ]
$\lambda$	Vergissfaktor
$\lambda_{Erde}$	Temperaturleitfähigkeit der Erde [ W / ( K · m ) ]
$\lambda_{Füll}$	Temperaturleitfähigkeit der Hinterfüllung [ W / ( K · m ) ]
$\Lambda(\theta) \in \mathbb{R}^{ny \times ny}$	Schätzung der Kovarianzmatrix der Residuen (vgl. $Q$ )
$\mu(t) \in \mathbb{R}^{1 \times n\theta}$	Ableitung bezüglich des Parametervektors (Gl. 3.64)
$\sigma_i(t+1, \theta)$	Ableitung von $\Sigma_1(t+1 t)$ bezüglich $\theta_i$
$\Sigma \in \mathbb{R}^{nX \times nX}$	Kovarianzmatrix des Schätzfehlers von $X$
$\Sigma_1 \in \mathbb{R}^{nx \times nx}$	Kovarianzmatrix des Schätzfehlers von $x$
$\Sigma_2 \in \mathbb{R}^{nx \times n\theta}$	Kreuzkovarianzmatrix zwischen den Schätzfehlern von $\theta$ und $x$
$\Sigma_3 \in \mathbb{R}^{n\theta \times n\theta}$	Kovarianzmatrix des Schätzfehlers von $\theta$
$\varpi_i(t, \theta) \in \mathbb{R}^{ny \times ny}$	Ableitung von $\Lambda(\theta)$ bezüglich $\theta_i$
$\rho_W$	Wasserdichte [ kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_G$	Trägheit des Gebäudes [ s ]
$\psi(t) \in \mathbb{R}^{ny \times n\theta}$	Ableitung des Schätzfehlers $\varepsilon(t, \theta)$ bezüglich des Parametervektors

***Funktionen***

<code>det(.)</code>	Determinante einer Matrix
<code>ln(.)</code>	Natürlicher Logarithmus
<code>max(.)</code>	Maximum einer Funktion
<code>min(.)</code>	Minimum einer Funktion
<code>Mitt(.)</code>	Mittelwert
<code>Mitt<sub>ΔT</sub>(.)</code>	Fenstermittelung über die Zeitspanne $\Delta T$
<code>spur(.)</code>	Spur (Summe der Diagonalelemente einer Matrix)
<code>vcc(.)</code>	Alle Elemente der Matrix werden in einem Vektor dargestellt.
$\otimes$	Kronecker-Produkt

Seite Leer /  
Blank leaf

## Literaturverzeichnis

- [1] *Mandate to CEN and CENELEC for the elaboration and adoption of measurement standards for household appliances: water-heaters, hot water storage appliances and water heating systems*, CEN/TC 113N, Vol. 380, 2002.
- [2] Afjei, T., Schonhardt, U., Wemhöner, C., Erb, M., Gabathuler, H.R., Mayer, H., Zweifel, G., Achermann, M., von Euw, R. und Stöckli, U.: *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 2: Grundlagen und Computersimulationen*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), 2002.
- [3] Baumgartner, T., Mayer, H. und Szodoky, G.: *Wärmepumpen; Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen*, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1993.
- [4] Bianchi, M., Shafai, E., Gabathuler, H.R. und Mayer, H.: *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 4: Erweiterung der PBM-Regler für Kombianlagen*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2005.
- [5] Bianchi, M., Shafai, E. und Geering, H.P.: *Comparing new control concepts for heat pump heating systems on a test bench with the capability of house and earth probe emulation*, 8th International Energy Agency Heat Pump (IEHP) Conference, Las Vegas, NV, 2005.
- [6] Cetrefli, C. und Kurtcuoglu, V.: *Adaptive LQ-MPC Regelung einer Hausheizung mit Wärmepumpe*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2002.
- [7] Chu, Q.P., Mulder, J.A. und van Woerkom P.T.L.M.: *Modified Recursive Maximum Likelihood Adaptive Filter for Nonlinear Aircraft Flight-Path Reconstruction*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics 19 (6) (1996).
- [8] deMorsier G.: *The Alpine Model (aLMo) in Switzerland*, 23rd EWGLAM / 8th SRNWP, Cracow, Poland, 2002.

- [9] Fanger, P.O.: *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*, Krieger, Malabar, FL, 1982.
- [10] Gabathuler, H.R. und Mayer, H.: *Messdaten von sieben Wärmepumpenanlagen in der Schweiz*, Bundesamt für Energie, Bern, 2004.
- [11] Gabathuler, H.R., Mayer, H. und Afjei T.: *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen. Teil 1: STASCH-Planungshilfen*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2002.
- [12] Gabathuler, H.R., Mayer, H., Shafai, E. und Wimmer, R.: *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 1*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 1999.
- [13] Gabathuler, H.R., Mayern H., Shafai, E. und Wimmer R.: *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 2: Implementierung in handelsüblichen Regler und Erprobung in einem Wohnhaus*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2002.
- [14] Geering, H.P., *Regelungstechnik, Mathematische Grundlagen, Entwurfsmethoden, Beispiele*, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [15] Geering, H.P. und Shafai, E.: *Regelungstechnik II*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2004.
- [16] Goodwin, G.C. und Payne, L.R.: *Dynamic system identification experiment design and data analysis*, Academic Press, New York, NY, 1977.
- [17] Gupta, N.K. und Mehra, R.K.: *Computational Aspects of Maximum Likelihood Estimation and Reduction in Sensitivity Function Calculations*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 19 (6), 774-783, 1974.
- [18] Huber, A. und Schuler. O.: *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden, Schlussbericht*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 1997.
- [19] Lackner, J.: *Modellierung, Dimensionierung und Regelung eines dynamischen Wärmepumpenprüfstandes*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2000.
- [20] Ljung, L.: *Asymptotic Behavior of the Extended Kalman Filter as a Parameter Estimator for Linear Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 24 (1), 36-50, 1979.

- [21] Ljung, L.: *System identification: theory for the user*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- [22] Ljung, L. und Söderström, T.: *Theory and Practice of Recursive Identification*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- [23] Math Works Inc.: *Optimization Toolbox for use with MATLAB User's guide*, Third printing 3.0.4, The MathWorks Inc., Natick, MA., 2006.
- [24] Moore, J.B. und Weiss, H.: *Recursive Prediction Error Methods for Adaptive Estimation*, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 9 (4), 197-205, 1979.
- [25] Morari, M., Lee, J.H. und Garcia, C.E.: *Model Predictive Control*, ETH, Zürich, 1998.
- [26] Oberti, S.: *Regelung eines dynamischen Wärmepumpenprüfstandes zwecks Quellen- und Gebäudeemulation*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2003.
- [27] Poulidakos, D.: *Thermodynamik I und II*, Institut für Energietechnik, ETH Zürich.
- [28] Rupp, D.: *On-Line Identification of a Building Model*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2003.
- [29] Schwarz, H.R. und Waldvogel, J.: *Numerische Mathematik mit 119 Figuren, 158 Beispielen und 118 Aufgaben*, 4. überarbeitete. und erweiterte Auflage, Teubner, Stuttgart, 1997.
- [30] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches: *Legionellen in Trinkwasserinstallationen. Was muss beachtet werden?*, SVGW, Zürich, 2001.
- [31] Shafai, E.: *Adaptive Regelung: Teil I <Parameteridentifikation>*, Institut für Mess- und Regeltechnik, Zürich, 2003.
- [32] Shafai, E., Bianchi, M., Gabathuler, H.R. und Mayer, H.: *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen. Phase 3: Vergleich der PBM-Regler auf dem dynamischen Prüfstand*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2003.
- [33] Shafai, E., Ginsburg, S., Wimmer, R. und Zogg, D.: *Validation of a model for a residential heat pump system based on short-period measurements*, 6th International Energy Agency Heat Pump (IEHP) Conference, Berlin, 1999.



- [34] Shafai, E., Wimmer, R. und Geering, H.P.: *A New Control Approach for Heat Pump Heating Systems*, 7th International Energy Agency Heat Pump (IEHP) Conference, Beijing, 2002.
- [35] Söderström, T. und Stoica, P.G.: *System identification*, Prentice Hall, New York, NY, 1989.
- [36] Solar-Institut Juelich: *CARNOT-Blockset. Version 1.0. User's guide*, Solar-Institut Juelich and ExpertControl, Juelich, Germany, 1999.
- [37] Stahel, W.A.: *Statistische Datenanalyse eine Einführung für Naturwissenschaftler*, 4. verbesserte Auflage, Vieweg, Braunschweig, 2002.
- [38] Tullio-Altan, F.: *Arriva la Pimpa*, Auflage mit CD-Rom, Panini Franco Cosimo, 2005
- [39] Wimmer, R.W.: *Regelung einer Wärmepumpenanlage mit Model Predictive Control*, IMRT Press, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2004.
- [40] Wimmer, R.W., Shafai, E. und Geering, H.P.: *Model Predictive Control for Heat Pump Heating Systems*, Proceedings of the IASTED International Conference on Control and Applications, Alberta, Canada, 2001.
- [41] Zogg, D.: *Fault diagnosis for heat pump systems*, IMRT Press, Institut für Mess- und Regeltechnik, Zürich, 2002.
- [42] Zogg, D. und Shafai, E.: *Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Phase 5: Test der Fehlerdiagnosesysteme an Prüfständen und mit Simulationen. Schlussbericht*, Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2001.
- [43] Zutter R.: *Erweiterung des Wärmepumpenprüfstandes für die Warmwasseraufbereitung*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich, 2001.
- [44] Zutter, R.: *Modellierung einer Hausheizung mit Warmwasseraufbereitung für die Emulation am Wärmepumpenprüfstand*, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH, Zürich 2005.

## Lebenslauf

### *Daten zur Person*

Name	Mikael Andreas Bianchi
Geburtsdatum	15. August 1978
Geburtsort	Locarno TI, Schweiz

### *Ausbildung*

1984-1989	Primarschule in Aurigeno, Schweiz
1989-1993	Sekundarschule in Cevio, Schweiz
1993-1997	Gymnasium in Locarno, Schweiz
1997	Matura, Typus C
1997-2002	Studium in Maschinenbau und Verfahrenstechnik, ETH Zürich
2002	Diplom als Dipl. Masch.-Ing. ETH
2002-2006	Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich

### *Kontakt*

mikael.bianchi@alumni.ethz.ch