

**Forschungsprogramm  
Umgebungs- und Abwärme,  
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)**

# **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen**

**Phase 3: Vergleich der PBM-Regler  
auf dem dynamischen Prüfstand**

ausgearbeitet durch  
**Dr. Esfandiar Shafai, Mikael Bianchi**  
**Eidgenössische Technische Hochschule**  
**Institut für Mess- und Regeltechnik**  
**Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich**  
shafai@imrt.mavt.ethz.ch  
und  
**Hans Rudolf Gabathuler, Hans Mayer**  
**Gabathuler AG, Beratende Ingenieure**  
**Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen**  
gabathuler.ag@bluewin.ch

unter Mitarbeit von  
**Roger Frei, Jan Bruderer**  
**SATAG Thermotechnik AG, 9320 Arbon**  
und  
**Bruno Illi, Franz Sidler**  
**Siemens Building Technologies AG, 6301 Zug**

Im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

**Autoren:**

Dr. Esfandiar Shafai  
Mikael Bianchi  
Eidgenössische Technische  
Hochschule, Institut für  
Mess- und Regeltechnik  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
shafai@imrt.mavt.ethz.ch

Hans Rudolf Gabathuler  
Hans Mayer  
Gabathuler AG  
Beratende Ingenieure  
Kirchgasse 23  
8253 Diessenhofen  
gabathuler.ag@bluewin.ch

**Industriepartner:**

Roger Frei  
Jan Bruderer  
SATAG Thermotechnik AG  
Romanshornestrasse 36  
9320 Arbon

Bruno Illi  
Franz Sidler  
Siemens Building  
Technologies AG  
Gubelstrasse 22  
6301 Zug

**Begleitgruppe:**

Daniel Trüssel  
Kälte Wärme Technik AG  
3123 Belp

Dr. Thomas Afjei  
Fachhochschule beider Basel  
4132 Muttenz

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie  
3003 Bern

Forschungsprogramm  
Umgebungs- und Abwärme,  
Wärme-Kraft-Kopplung  
(UAW)

Leitung:

Dr. Martin Zogg und  
Dr. Thomas Kopp

[www.waermepumpe.ch/fe](http://www.waermepumpe.ch/fe)

# Zusammenfassung

In den ersten zwei Phasen des Projekts wurden drei Arten von PBM-Reglern (PBM: Pulsbreitenmodulation) entwickelt:

- Energiekennlinienbasierter PBM-Regler: Die Energiezufuhr erfolgt aufgrund der Energiekennlinie (24-Stunden-Mittelwert des Wärmebedarfs in Funktion der Aussentemperatur)
- Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler: Die Energiezufuhr erfolgt aufgrund der Laufzeitkennlinie (Energiekennlinie dividiert durch Heizleistung aus der Wärmepumpenkennlinie)
- Modellbasierter PBM-Regler: Die Energiezufuhr erfolgt aufgrund eines Modells der thermischen Trägheit des Gebäudes koordiniert mit dem zukünftigen Wettergeschehen (prädiktiver Regler).

Alle drei PBM-Regler konnten in der zweiten Phase des Projekts problemlos in handelsübliche Reglergeräte der Firmen SATAG Thermotechnik AG und Siemens Building Technologies AG implementiert und an einem Wohnhaus erfolgreich erprobt werden.

Das Hauptziel der vorliegenden dritten Phase des Projekts war es, die drei PBM-Regelkonzepte sowohl untereinander als auch mit der witterungsgeführten Rücklauf temperaturregelung bezüglich Komfort und Energieeffizienz am dynamischen Prüfstand des Instituts für Mess- und Regeltechnik der ETH-Zürich unter gleichen Randbedingungen detailliert zu vergleichen (Ranking).

Zu diesem Zweck musste zunächst für die real am Prüfstand vorhandene Sole-Wasser-Wärmepumpe sowohl ein fiktives Haus als auch eine fiktive Erdsonde emuliert (vorgetäuscht) werden. Hierfür wurden die thermische Trägheit des Hauses und das dynamische Verhalten der Erdsonde durch entsprechende Differentialgleichungen modelliert. In Echtzeit berechnen diese Simulationsmodelle die Sollwertverläufe für die Eintrittstemperaturen und die Volumenströme der Wärmepumpe. Eine hierarchisch strukturierte Regelung des Prüfstands sorgt dafür, dass diese Schnittstellengrößen der Wärmepumpe den simulierten Sollwertverläufen möglichst gut folgen.

Da sowohl die Prüfstandsregelung als auch die Haus- und Erdsonden-Emulation am Prüfstand im Rahmen der Phase 3 des Projekts realisiert werden mussten, wurde zu Beginn des Projekts entschieden, die Untersuchungen hauptsächlich in der HIL-Testumgebung (HIL: Hardware in the loop) durchzuführen. Bei dieser Testvariante wird – im Unterschied zur Untersuchung am Prüfstand – neben der Haus- und Erdsonden-Simulation zusätzlich die Wärmepumpe simuliert und die notwendigen Signale direkt dem Reglergerät mit der implementierten Reglervariante zur Verfügung gestellt. Diese Untersuchungen wurden erfolgreich durchgeführt.

Parallel dazu wurden sowohl die Prüfstandsregelung als auch die Emulationen des Hauses und der Erdwärmesonde erfolgreich am Prüfstand realisiert. Dadurch wurde es möglich, wenigstens noch den witterungsgeführten Rücklauf temperaturregler exemplarisch am Prüfstand mit der Gebäudeemulation zu untersuchen.

Aus den HIL-Untersuchungen können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der modellbasierte PBM-Regler schnitt sowohl bezüglich Niedertarifanteil als auch Energieverbrauch und Einhaltung des Raumtemperatursollwerts sehr gut ab. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass dieser Regler einen Beobachter verwendet, der die Raumtemperatur basierend auf Rücklauf temperatur schätzt und prädiktiv für die Regelung verwendet. Der Regler war insofern bevorzugt, als das verwendete Modell im Beobachter mit dem für die Untersuchungen ausgewählten Modell für die Gebäudeemulation (fiktiven Realität) praktisch übereinstimmte. Im realen Einsatz, falls das im Beobachter verwendete Modell das reale Gebäudeverhalten weniger gut beschreiben sollte, muss mit einer Verschlechterung des Regelverhaltens gerechnet werden.
- Der Zweipunkt-Regler wies ebenfalls ein gutes Regelverhalten und damit tiefen Heizenergieverbrauch auf. Aber bezüglich Niedertarifanteil schnitt er eindeutig am schlechtesten ab. Dieser Regler war insbesondere durch das einfache Gebäudemodell für die Simulation der «fiktiven Realität» bevorzugt. Das Modell zeigte vor allem bei Präsenz der Strahlung und abgestellter Wärmepumpe eine unrealistisch starke Kopplung zwischen der Rücklauf- und der Raumtemperatur.
- Der laufzeitkennlinienbasierte Regler schnitt bezüglich Niedertarifanteil sehr gut ab. Da jedoch die Laufzeitkennlinie und die «gemischte Aussentemperatur» noch nicht optimal eingestellt waren, wies er zeitweise nur ein mässig gutes Regelverhalten auf.
- Auf Grund der nachträglichen Analyse der aufgezeichneten Daten wird angenommen, dass beim energiekenlinienbasierten Regler ein Programmierfehler vorlag. Er wies deshalb häufig nicht das von ihm erwartete Regelverhalten auf.
- Aufgrund der genannten Umstände ist ein objektives Ranking leider nicht möglich.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden.  
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.

# Abstract

In the first two phases of the project, three versions of heating control strategies utilizing pulse-width modulation (PWM) were developed:

- PWM control based on the characteristic curve for the heating energy,
- PWM control based on the characteristic curve for the heating duration, and
- Model-predictive PWM-control.

Phase 2 of the project showed that it is not difficult to implement all three versions of the PWM algorithm in commercially available controllers of SATAG Thermotechnik AG and Siemens Building Technology AG and that they work successfully in a single-family house equipped with a heat pump heating system.

The main goal of Phase 3 of the project now was to make a representative comparison among the three versions of the PWM approaches and the conventionally available relay-type controller approach with respect to comfort, energy efficiency, and costs under the same conditions at the test bench of the Measurement and Control laboratory (ranking).

A prerequisite for the comparison was the emulation of a fictitious house as well as of a fictitious earth probe for the real brine-to-water heat pump installed at the test bench. For this purpose, a model of the thermal behavior of the house and a model of the earth probe were implemented in the computer of the test bench. In real-time, these models calculate the set-points for the input temperatures of the heat pump as well as the volumetric flows through the heat pump on the basis of the measured output temperatures of the heat pump and of selected weather data (outdoor temperature and radiation). A control system ensures that these set-points are tracked by the corresponding quantities at the test bench.

Since the emulation of the house and the emulation of the earth probe also were subjects of Phase 3 of the project, the Project Group decided at the beginning of the project to make the comparison among the controllers mainly in the HIL test environment (HIL: hardware in the loop) in order to minimize any risk to the project. In this test environment – in contrast to the testing at the test bench – the heat pump as well is just simulated such that only the controller is available in hardware. These tests have been conducted successfully.

Parallel to these tests, the control system of the test bench as well as the emulation of the house and the earth probe were successfully implemented. It was thus possible to exemplify the validity of at least the relay-type controller at the test bench with emulation.

The HIL-tests lead to the following conclusions:

- The model-predictive PWM achieves very good results with respect to the low-tariff portion of the heating energy, the energy consumption, and to meeting the set-point of the room temperature. This is due to the fact that the controller uses an observer for estimating the room temperature based on the return flow temperature, which in turn is used in the prediction algorithm of the controller. The controller indeed had the advantage that the model used in the observer was quite similar to the one used to simulate the fictitious reality (house emulation). In the real application, if the model used in the observer differs considerably from the real behavior of the house, a degradation of the control performance is to be expected.
- The relay-type controller also showed a good control performance and consequently a low heating energy consumption. However, with respect to the low tariff heating energy portion, it came off worst. This controller was given preference by the simplified model of the fictitious house. Mainly in the presence of radiation and in the “off” periods of the heat pump this model showed an unrealistically high correlation between return flow temperature and the room temperature.
- The PWM controller based on the characteristic curve for the heating duration achieved a very good result with respect to the low-tariff portion of the heating energy. The performance of this controller at times was moderate, because the characteristic curve and the mix of the outdoor temperature («gemischte Aussentemperatur») in the controller have not yet been optimally adjusted.
- An ex post facto analysis of the acquired data leads to the conclusions that there must be a mistake in the implementation of the PWM-controller based on the characteristic curve for the heating energy since it rarely showed the control performance that could have been expected.
- These circumstances preclude an objective ranking of the PWM controllers.

This work is carried out by order of the Swiss Federal Office of Energy.

The author of this work is exclusively responsible for its content and the conclusions drawn.

# Inhaltsverzeichnis

1	Überblick.....	6
1.1	Ziel der Arbeit.....	6
1.2	Lösungsweg .....	6
1.3	Hauptergebnisse .....	7
2	Dynamischer Wärmepumpenprüfstand .....	9
2.1	Prüfstands Aufbau .....	10
2.2	Prüfstandsregelung für die Emulation .....	11
2.3	Emulation am dynamischen Wärmepumpenprüfstand .....	13
	2.3.1 Das Gebäudemodell für die Emulation .....	14
	2.3.2 Das Erdsondenmodell für die Emulation.....	16
3	Resultate der Untersuchungen .....	20
3.1	Witterungsgeführter Rücklauf-temperatur-Regler (SATAG) .....	21
3.2	Energiekennlinienbasierter PBM-Regler (SATAG).....	24
3.3	Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler (SIEMENS) .....	26
3.4	Modellbasierter PBM-Regler (SATAG).....	28
4	Diskussion der Resultate.....	30
4.1	Fragestellung .....	30
4.2	Vorgehen.....	31
4.3	Vergleich.....	31
	4.3.1 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 1+2 .....	32
	4.3.2 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens, Woche 1+2.....	33
	4.3.3 Rücklauf-temperaturregler von Satag, Woche 1+2 .....	34
	4.3.4 Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 1+2.....	35
	4.3.5 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3 .....	36
	4.3.6 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens, Woche 3.....	37
	4.3.7 Rücklauf-temperaturregler von Satag, Woche 3.....	38
	4.3.8 Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3 .....	39
	4.3.9 Woher kommen die exakten Informationen über die Raumtemperatur? .....	40
	4.3.10 ... und wie verhält es sich beim Rücklauf-temperaturregler? .....	41
	4.3.11 Folgt die Rücklauf-temperatur wirklich so perfekt der Raumtemperatur?.....	42
4.4	Antworten auf Fragestellung.....	43
5	Zusammenarbeit.....	45
5.1	Nationale Zusammenarbeit .....	45
5.2	Internationale Zusammenarbeit .....	45
6	Ausblick .....	45
7	Symbolliste .....	46
7.1	Allgemeine Abkürzungen .....	46
7.2	Symbole zum Kapitel 2.1 und 2.2 (Prüfstand).....	47
7.3	Symbole zum Kapitel 2.3.1 (Gebäudemodell).....	48
7.4	Symbole zum Kapitel 2.3.2 (Erdwärmesonde).....	49
7.5	Symbole zum Kapitel 4 (Reglereinstellungen).....	49
8	Literaturverzeichnis .....	50

# 1 Überblick

## 1.1 Ziel der Arbeit

Dieses Projekt verfolgt von der Phase 1 an das Ziel (vgl. [1]), intelligente Regelstrategien für Kleinwärmepumpenanlagen zu entwickeln und zu erproben, die den konventionellen Witterungsgeführten Zweipunktregler auf Rücklauftemperatur ersetzen können. Durch ihre Intelligenz (Einbezug von Wettergeschehen, Tarifstruktur der Elektrizitätswerke, Gebäudeträgheit, etc.) und Benutzerfreundlichkeit sollen sie allfällige Fehlbedienungen durch den Benutzer reduzieren und damit letztlich energiesparend wirken.

Im Rahmen der Phase 2 des Projektes (vgl. [2]) wurden drei neue Regelstrategien (energiekennlinienbasierte, laufzeitkennlinienbasierte und modellbasierte prädiktive Pulsbreitenmodulation) in handelsübliche Reglergeräte der beiden Industriepartner, SATAG Thermotechnik AG und Siemens Building Technology (Europa) AG programmiert und erfolgreich auf einer Referenzanlage erprobt.

Das Hauptziel des Projekts in der Phase 3 ist der faire Vergleich der entwickelten Regelstrategien an einem Prüfstand, der durch die Haus- und Quellenemulation bei allen Regelstrategien reproduzierbar die gleichen Randbedingungen für die Wärmepumpe erzeugen kann.

## 1.2 Lösungsweg

Die Schwierigkeit beim Vergleich der in der Phase 2 des Projekts implementierten Regelstrategien auf einer Referenzanlage liegt darin, dass die Regler zeitlich nur sequentiell zum Einsatz kommen können. Dies bedeutet, dass die Randbedingungen wie der Aussenlufttemperaturverlauf, die Sonnenstrahlung und das Benutzerverhalten nicht bei allen Reglern identisch sind. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde im Labor des Instituts für Mess- und Regeltechnik der ETHZ ein dynamischer Sole/Wasser-Wärmepumpenprüfstand aufgebaut, der sowohl die Emulation der thermischen Trägheit eines beliebigen (fiktiven) Hauses als auch die Emulation des transienten Verhaltens der Quelle (Solekreislauf) ermöglicht. Dadurch wird es möglich sowohl auf der Seite der Last als auch auf der Quellenseite reproduzierbar die gleichen Randbedingungen dem Regler und der zu untersuchenden Wärmepumpe vorzutauschen.

Die Meilensteine des Projekts in der dritten Phase waren:

**Prüfstandsregelung:** Es handelt sich hier um die Tanktemperaturregelung von zwei Sole-Behältern und zwei Wasser-Behältern sowie deren Mischungstemperaturregelungen.

**Emulation:** Es handelt sich hier um die Implementation von Simulationsmodellen für ein Haus und eine Quelle (Erdwärmesonde), die Sollwerte für die Prüfstandsregelung generieren.

**Schnittstellen für HIL-Simulation:** Bei der HIL-Simulation (HIL: Hardware in the loop) handelt es sich um eine Alternativlösung zur Emulation am Prüfstand für den Vergleich der Regelstrategien. Diese Schnittstellen erlauben die Verbindung der Reglergeräte mit den Simulationsprogrammen im Prüfstandsrechner.

**Durchführung der Untersuchungen:** Es beinhaltet die Vereinbarung der Randbedingungen der Untersuchungen (Testdauer pro Reglervariante, Aussenlufttemperaturverlauf, Strahlung, etc.), die Modifikation der Regleralgorithmen, die Einstellung der Regler und die Datenaufzeichnung.

**Vergleich der Reglervarianten:** Es beinhaltet die Datenaufbereitung, die Datenauswertung und die Diskussion der Resultate.

### 1.3 Hauptergebnisse

Die ersten zwei im Kapitel 1.2 genannten Meilensteine konnten erfolgreich erreicht werden (vgl. die beiden Kapitel 2.2 und 2.3). Dies jedoch aufgrund der Schwierigkeiten bei der Realisierung der Prüfstandsregelung relativ spät, so dass die Untersuchungen und der Reglervergleich hauptsächlich in der Testumgebung mit der HIL-Simulation (HIL: hardware-in-the-loop) durchgeführt werden konnten (vgl. Kapitel 3). Für den Vergleich der Reglerverhalten ist diese Variante gleichwertig zur Emulationsvariante. Der einzige Nachteil ist nur, dass die Wärmepumpe simuliert wird und real nicht vorhanden ist. Der witterungsgeführte Rücklauf temperaturregler konnte als einziger Regler auch am dynamischen Wärmepumpenprüfstand mit der Gebäudeemulation untersucht werden.

Jeder Regler wurde während drei Wochen untersucht. Als Randbedingung für die Untersuchungen wurde der Verlauf der Aussenlufttemperatur und Strahlung bei den ersten zwei Wochen synthetisch generiert, während bei der dritten Woche reale Messdaten verwendet wurden (vgl. Abbildung 13).

Die Reglereinstellungen, die Raumtemperaturverläufe und die entsprechenden Verteilungen der Heizpulse (Wärmepakete) für die drei Testwochen sind im Kapitel 3 (Tabelle 2 bis Tabelle 5 und Abbildung 14 bis Abbildung 23) vorgestellt. Die erfassten Daten sind in Form von Balkendiagrammen in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt, die nachfolgend kommentiert werden. Eine detaillierte Diskussion der Resultate wird jedoch im Kapitel 4 durchgeführt.

Das Ziel der Regler war die Sollwerte möglichst gut zu halten und die elektrische Energie gleichzeitig zu minimieren. Offensichtlich kann nicht beides unabhängig voneinander erreicht werden, z.B. hängt der Raumtemperaturverlauf von der verbrauchten Energie und dem Niedertarifanteil ab. In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die wichtigsten Statistiken dargestellt. In diesen Abbildungen werden die Regler sowohl für die ganze Versuchsperiode von drei Wochen als auch für die einzelnen Wochen miteinander verglichen.

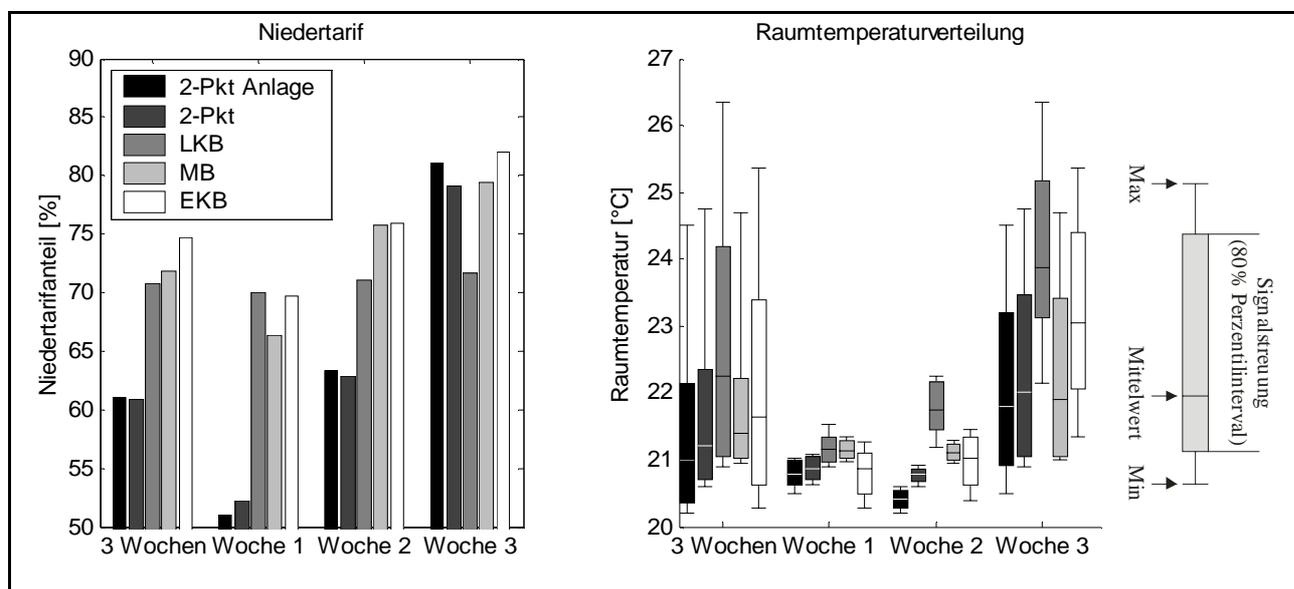


Abbildung 1: Links: Niedertarifanteil während der 3 Wochen und der einzelnen Wochen. Rechts: Statistiken über die Raumtemperatur während der 3 Wochen und der einzelnen Wochen. (2-Pkt Anlage bzw. 2-Pkt: Der witterungsgeführte Rücklauf temperaturregler am Prüfstand mit Gebäudeemulation bzw. in der HIL-Testumgebung, LKB: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler in der HIL-Testumgebung, MB: Modellbasierter PBM-Regler in der HIL-Testumgebung, EKB: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler in der HIL-Testumgebung)

Der laufzeitkennlinienbasierte Regler hält den gewünschten Niedertarifanteil von 70 % am besten ein, während die anderen Regler bei der Energieverteilung sensibler auf den Aussen-temperaturverlauf reagieren. Der modellbasierte Regler hält mit 71.8% den Niedertarifanteil über drei Wochen auch relativ gut ein. Die Raumtemperaturstreuung bleibt für alle Regler (mit Ausnahme der energie-kennlinienbasierten PBM-Regler) während der ersten Woche genügend klein. In der zweiten Woche weist der laufzeitkennlinienbasierte Regler ebenfalls grössere Raumtemperaturstreuung auf, zudem steigt der Mittelwert der Raumtemperatur bei diesem Regler um ein halbes Grad. Sowohl der modellbasierte Regler als auch der Zweipunkt-Regler konnten in den ersten beiden Wochen den Mittelwert der Raumtemperatur am besten halten. Sie konnten auch in der dritten Woche im Vergleich zu den anderen beiden Reglern den Mittelwert gut halten.

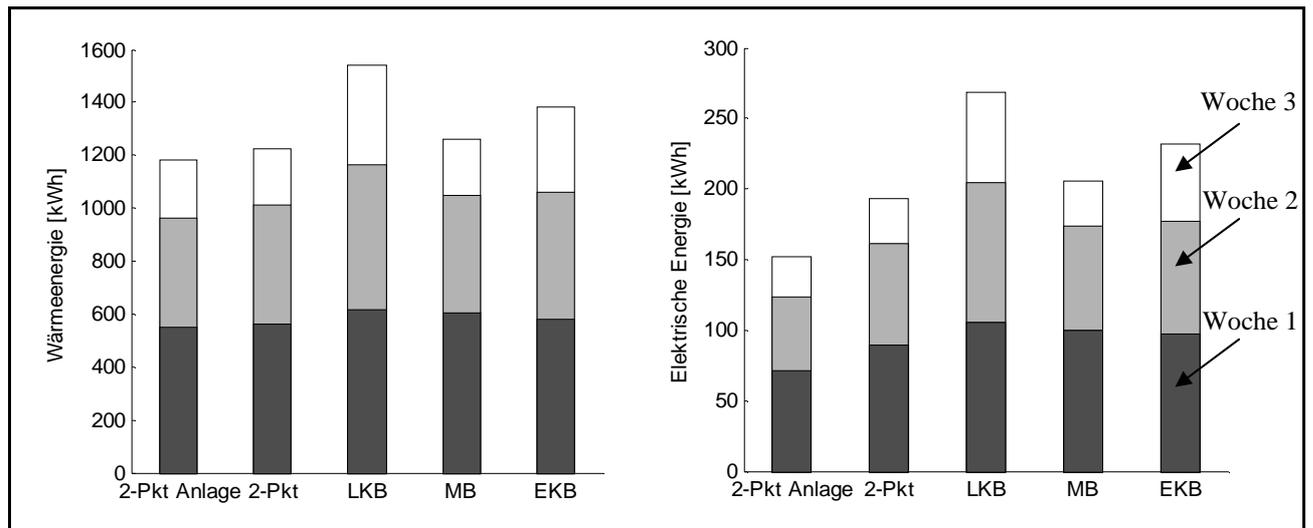


Abbildung 2: Links: gelieferte Wärmemenge. Rechts: verbrauchte elektrische Energie (2-Pkt Anlage bzw. 2-Pkt: Der witterungsgeführte Rücklauf temperaturregler am Prüfstand mit Gebäudeemulation bzw. in der HIL-Testumgebung, LKB: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler in der HIL-Testumgebung, MB: Modellbasierter PBM-Regler in der HIL-Testumgebung, EKB: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler in der HIL-Testumgebung)

Die gelieferte Wärmeenergie sowie die aufgewendete elektrische Energie (approximiert durch das Wärmepumpenkennfeld) wirkt direkt auf dem Raumtemperaturmittelwert. Es fällt auf, dass der laufzeitkennlinienbasierte PBM-Regler am meisten Energie aufgewendet hat, was auch zu einem höheren Raumtemperaturmittelwert geführt hat. Der Zweipunktregler hat am wenigsten Energie aufgewendet, was zu einem tieferen Raumtemperaturmittelwert (tiefer als der Sollwert) geführt hat.

Der Grund dafür, dass der Zweipunkt-Regler am dynamischen Prüfstand weniger elektrische Energie verbraucht als in der HIL-Simulation, ist auf die falsche Schätzung der Wärmemenge zurückzuführen, die zu kürzeren Pulslängen geführt hat (vgl. Kapitel 3.1, Abbildung 15).

Zusammenfassend könnte behauptet werden, dass nur die beiden Reglervarianten (modellbasierter Regler und Zweipunkt-Regler), die über Rücklauf temperaturregler verfügen im „Ranking“ den beiden anderen Reglervarianten (energie- und laufzeitkennlinienbasierter Regler) überlegen wären. Diese Aussage ist jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da sie offenbar durch das vereinfachte Simulationsmodell des Gebäudes stark bevorzugt waren (vgl. Kapitel 4, insbesondere Kapitel 4.4). Ausserdem scheint es, dass der energie-kennlinienbasierte PBM-Regler nicht ganz korrekt implementiert wurde. Somit ist leider ein objektives Ranking nicht möglich.

## 2 Dynamischer Wärmepumpenprüfstand

Im Labor des Instituts für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich wurde im Rahmen des BFE-Projekts „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen (Phase 5)“ (vgl. [6]) ein Prüfstand für dynamische Untersuchungen an industriellen Sole/Wasser-Wärmepumpen aufgebaut (Abbildung 3). Durch eine geeignete Regelung des Prüfstands lassen sich realistische Temperaturtransienten und Durchflusstransienten an den Eingängen der Testwärmepumpe generieren (Emulieren). Die entsprechenden Sollwertverläufe für die Regelung werden dabei in Echtzeit durch Simulation eines Modells für das Gebäude und eines Modells für die Erdsonde berechnet. Die Implementierung dieser beiden Modelle für die Emulation und die Realisierung der Prüfstandsregelung waren ein Bestandteil des Projekts und werden in diesem Kapitel beschrieben.



Abbildung 3: Der dynamische Sole/Wasser-Wärmepumpenprüfstand des Instituts für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich

## 2.1 Prüfstands Aufbau

Das Hydraulikschema des Sole/Wasser-Wärmepumpenprüfstands ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Prüfstand besteht im wesentlichen aus vier Tanks mit je 50 l Volumeninhalt, zwei auf der Soleseite und zwei auf der Wasserseite.

Pro Tank gibt es einen Wärmetauscher (WT1, WT2, WT4 und WT5), der den Tank thermisch mit einem entsprechenden Medium (30°C auf der Solesseite und 14 °C auf der Wasserseite) verbindet. Um die Temperaturspreizung der beiden Seiten unabhängig von der Testwärmepumpe einstellen zu können, befindet sich eine Hilfswärmepumpe zwischen dem kalten Soletank und dem warmen Wassertank. Ein weiterer Wärmetauscher (WT3) koppelt thermisch die beiden Seiten, um wieder Wärme von der Wasserseite zur Solesseite zurückzuführen. An jedem Wärmetauscher kann der Wärmestrom mit Hilfe eines Dreiwegventils eingestellt werden (vgl. Abbildung 4).

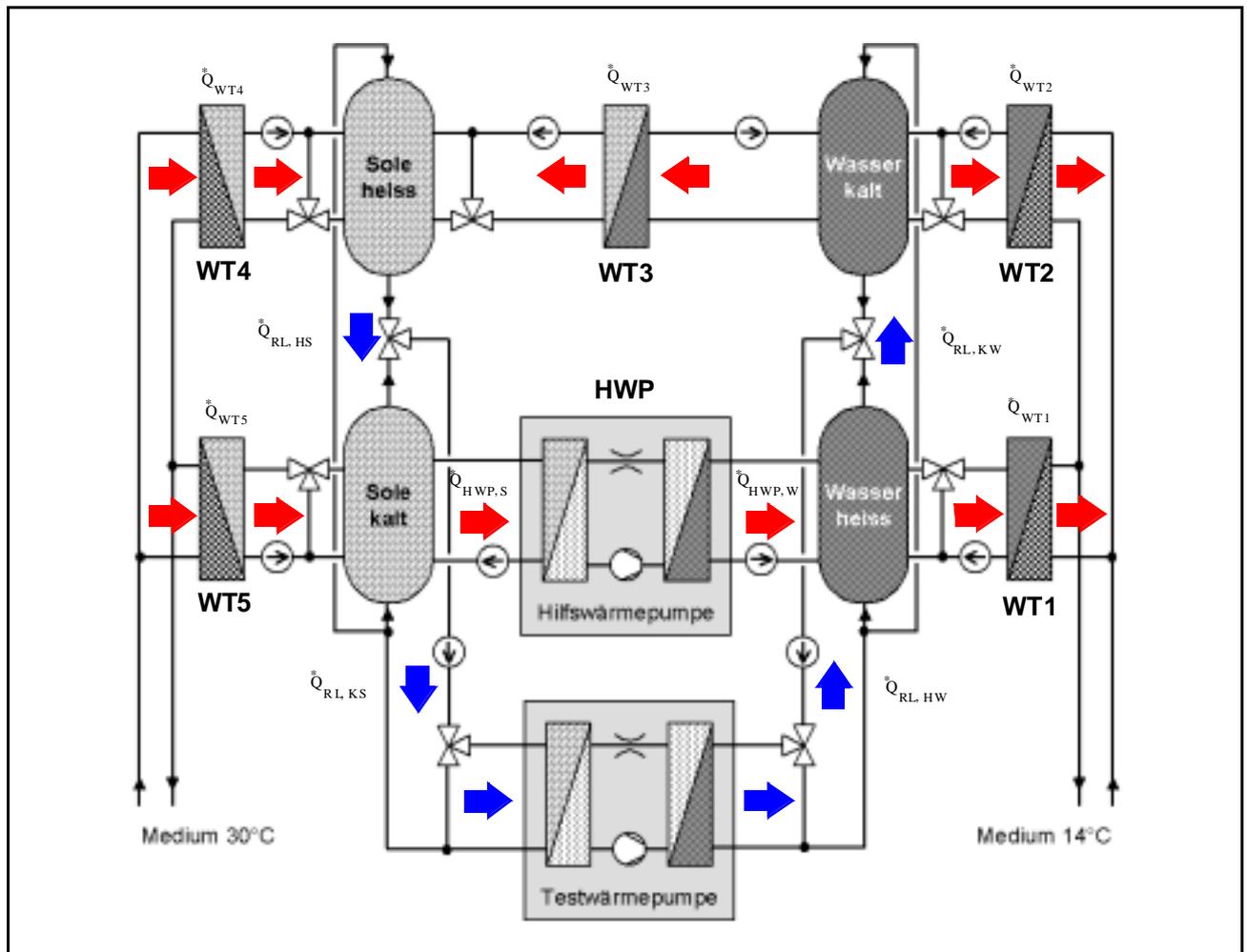


Abbildung 4: Hydraulikschema des dynamischen Sole/Wasser-Wärmepumpenprüfstands

Die Emulation wird bei diesem Hydraulikschema dadurch realisiert, indem die Rücklauftemperaturen auf der Sole- und Wasserseite jeweils über Dreiwegventile so abgemischt werden, dass sie den vorgegebenen Sollverläufen folgen. Zu diesem Zweck werden die beiden zugehörigen Tanks (heiss und kalt) jeweils um  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$  über bzw. unter den Sollwertverläufen der Rücklauftemperaturen geregelt. Als Testwärmepumpe, für die ein Haus und eine Erdwärmesonde am Prüfstand emuliert wird, steht am Prüfstand eine BW 108.1 der Firma SATAG Thermotechnik AG zur Verfügung.

## 2.2 Prüfstandsregelung für die Emulation

In Abbildung 3 ist das Regelungskonzept der Gesamtanlage für die Realisierung der Emulation am Prüfstand dargestellt. Im Block «Sollwertgenerator» werden (durch die numerische Integration der Differentialgleichungen der entsprechenden Modelle für das Haus und die Quelle) die Sollverläufe für die Wasser- und Solerücklauftemperatur ( $\vartheta_{W,RL,soll}$  und  $\vartheta_{S,RL,soll}$ ) berechnet. Daraus werden dann die Sollverläufe für die Tanktemperaturen bestimmt, indem für die beiden Seiten die Temperatur des warmen Tanks  $2\text{ °C}$  darüber und die Temperatur des kalten Tanks  $2\text{ °C}$  darunter gewählt werden.

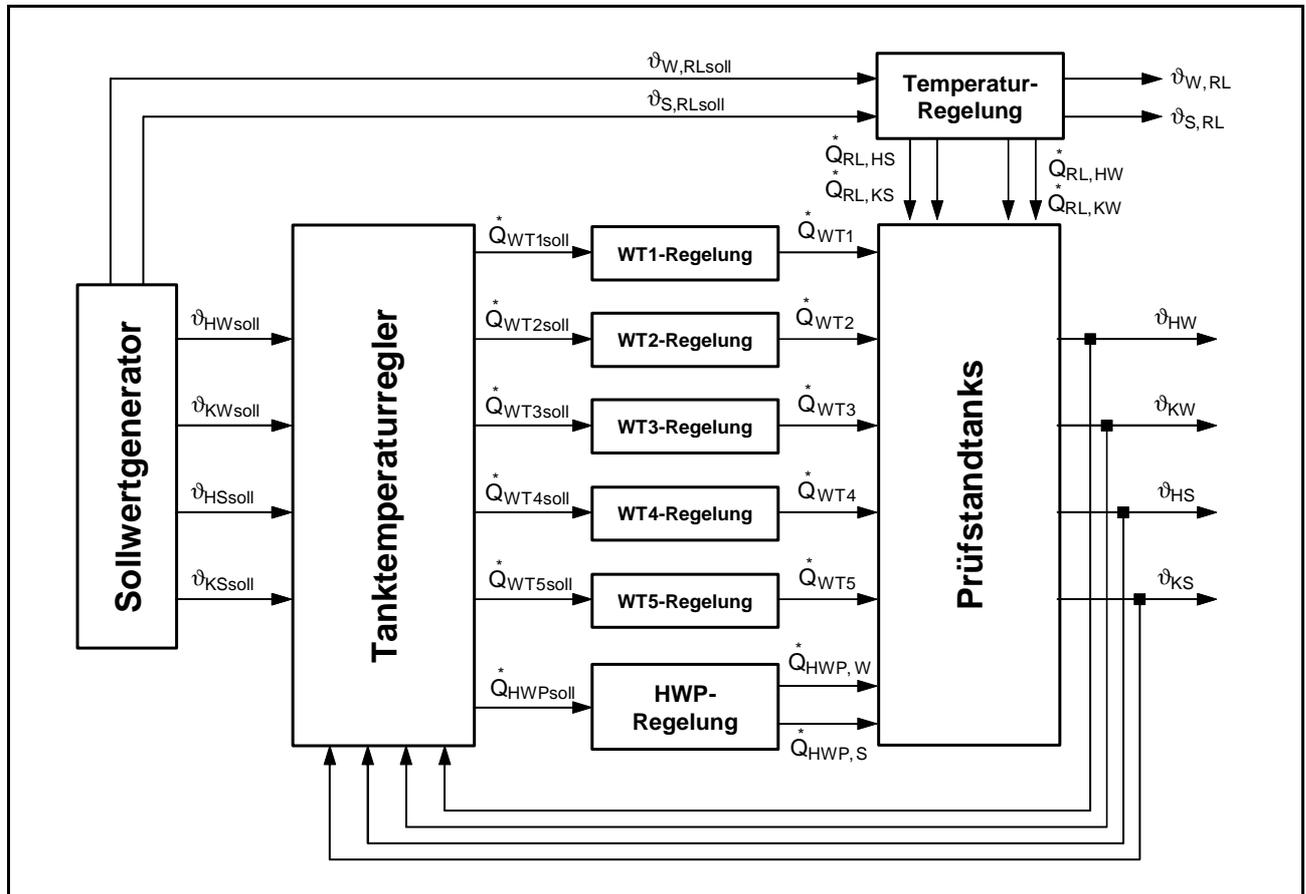


Abbildung 5: Regelungskonzept für die Realisierung der Emulation am Prüfstand

Der Block «Tanktemperaturregler» erfüllt zwei Aufgaben. Er löst einerseits die gegenseitige Kopplung der Tanks auf, so dass vier voneinander unabhängige Tanks als Regelstrecken resultieren. Er verwendet andererseits für jeden Tank einen einfachen Regler (z.B. PID-Regler), um die Tanktemperatur zu regeln. Als Stellsignale generiert diese übergeordnete Regelung Sollverläufe für die Wärmeströme, die durch geeignete untergeordnete Regelungen an den Wärmetauschern WT1 bis WT5 und an der Hilfswärmepumpe (HWP) realisiert werden. Diese sind in Abbildung 5 durch die Blöcke WT1- bis WT5-Regelung und HWP-Regelung gekennzeichnet.

Eine weitere Regelung stellt die Mischtemperaturregelung für die Emulation der Wasser- und Solerücklauftemperatur dar. Diese Regelung ist in Abbildung 5 durch den Block «Temperaturregelung» gekennzeichnet. Die angestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einem Dreipunktregler das beste Resultat betreffend Regelfehlerschwankungen erzielt werden konnte. Daher und Einfachheit halber wurde für die definitive Mischtemperaturregelung ein Dreipunktregler ohne Hysterese eingesetzt.

In Abbildung 6 ist das am Prüfstand gemessene Resultat des oben beschriebenen Regelungskonzepts für den Fall, dass die Testwärmepumpe abgestellt ist, angegeben. Es sind jeweils für die Sole- und Wasserseite die beiden Tanktemperaturen (heiss und kalt) sowie die jeweiligen Mischtemperaturen mit den entsprechenden Sollwertsprüngen dargestellt. Das Resultat ist zufriedenstellend, so dass diese Regelung für die Emulation verwendet wird.

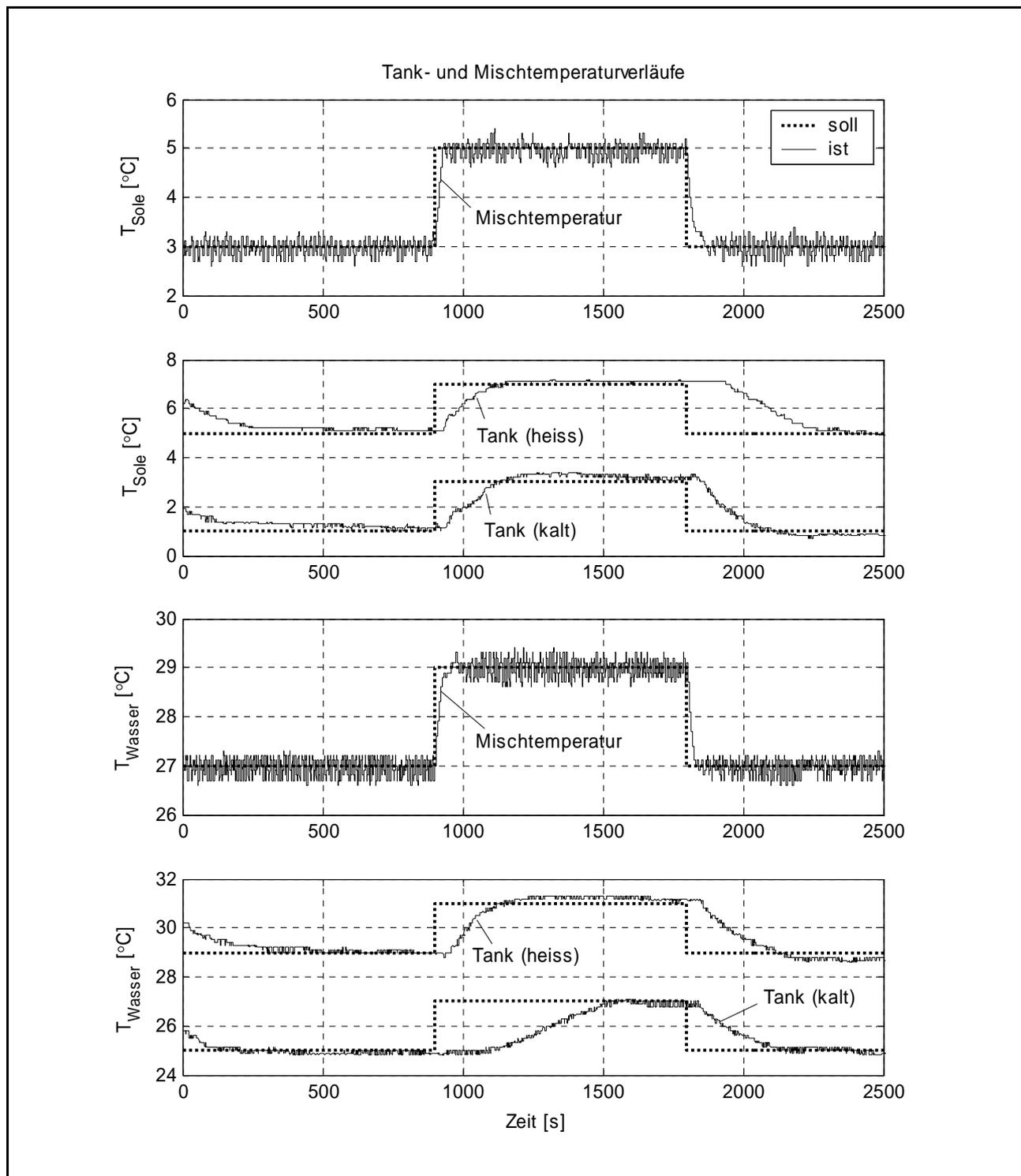


Abbildung 6: Geregelte Tanktemperaturen- und Mischtemperaturenverläufe sowohl auf der Sole- als auch auf der Wasserseite gemessen am Prüfstand bei abgestellter Testwärmepumpe.

## 2.3 Emulation am dynamischen Wärmepumpenprüfstand

In Abbildung 7 ist das Resultat einer echten Emulation am Prüfstand mit ein- und ausgeschalteter Testwärmepumpe dargestellt. Es sind jeweils für die Sole- und Wasserseite die beiden Tanktemperaturen (heiss und kalt) sowie die jeweiligen Mischtemperaturen (Rücklauftemperaturen) mit den entsprechenden Sollwertverläufen (gestrichelt) dargestellt. Die verwendeten Simulationsmodelle für das Gebäude und für die Sonde werden in den nächsten beiden Unterkapiteln beschrieben.

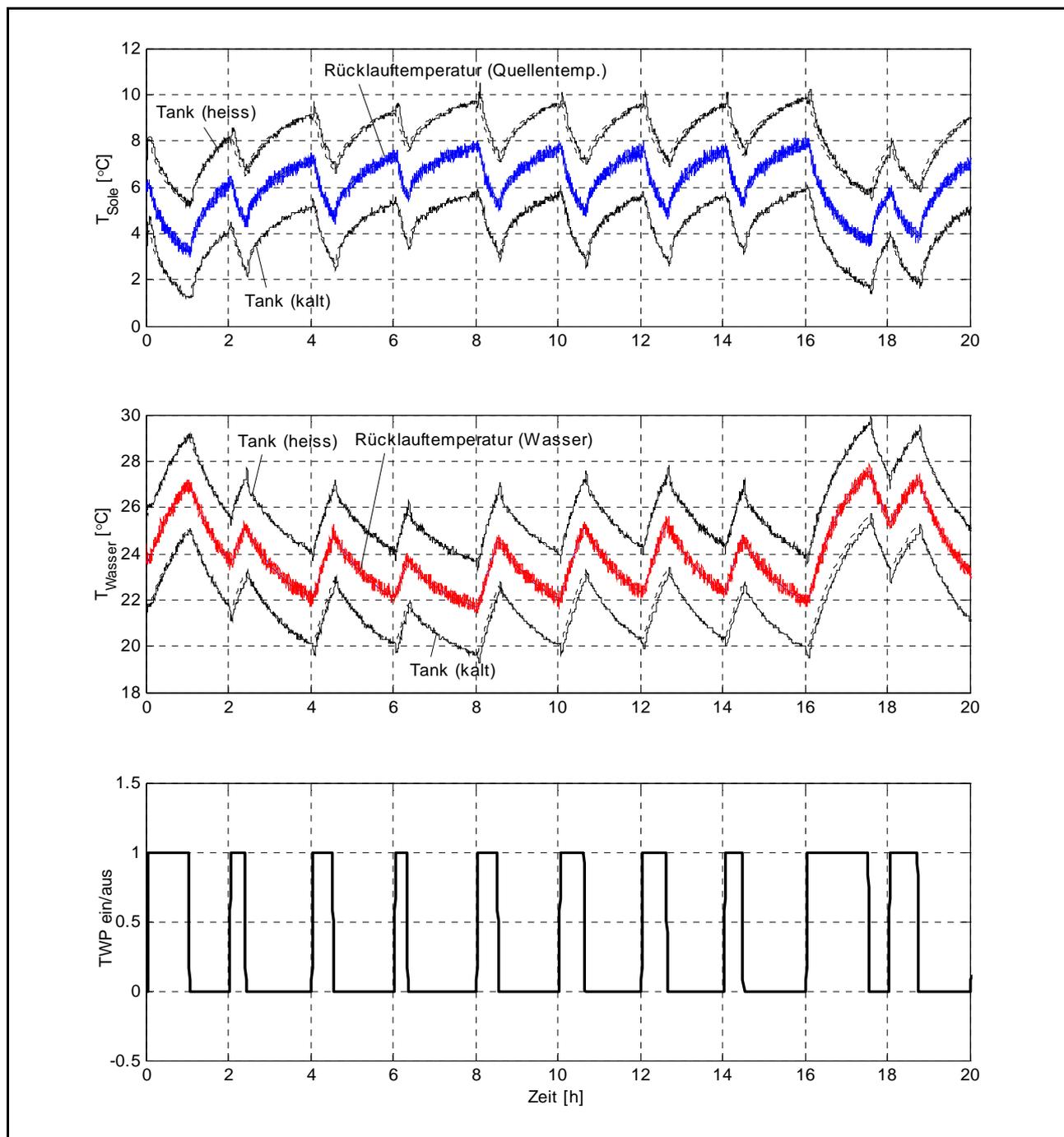


Abbildung 7: Geregelt Tanktemperaturen- und Mischtemperaturenverläufe (Emulation) sowohl auf der Sole- als auch auf der Wasserseite gemessen am Prüfstand bei getakteter Testwärmepumpe (TWP).

### 2.3.1 Das Gebäudemodell für die Emulation

Für die Simulation der thermischen Trägheit des Gebäudes wird das einfache Modell mit 6 Parametern verwendet, das im Rahmen des BFE-Projekts „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen (Phase 1 bis 3)“ (vgl. [5]) entwickelt wurde. Das verwendete Hausmodell besteht aus drei thermischen Speichern: Das Heizungswasser in den Rohren mit der Rücklauf­temperatur  $\vartheta_{RL}$  als Zustandsgrösse, der Fussboden mit der Fussbodentemperatur  $\vartheta_B$  als Zustandsgrösse und der Raum mit der Referenzraumtemperatur  $\vartheta_R$  als Zustandsgrösse. Diese drei Energiespeicherungen werden durch die folgenden drei Energiebilanzgleichungen modelliert:

$$\rho_W V_H c_W \cdot \dot{\vartheta}_{RL}(t) = \dot{Q}_{FB}^*(t) - \dot{Q}_{WB}^*(t) \quad (1)$$

$$\rho_B V_B c_B \cdot \dot{\vartheta}_B(t) = \dot{Q}_{WGB}^*(t) - \dot{Q}_{WB}^*(t) - \dot{Q}_{BR}^*(t) \quad (2)$$

$$\rho_G V_G c_G \cdot \dot{\vartheta}_R(t) = \dot{Q}_{WGR}^*(t) - \dot{Q}_{BR}^*(t) - \dot{Q}_{RA}^*(t) \quad (3)$$

Sie bilden drei gekoppelte Differentialgleichungen mit den folgenden Wärmeströme als Kopplungsterme:

$\dot{Q}_{WB}^*$ : Wärmestrom vom Wasser in den Boden,

$\dot{Q}_{BR}^*$ : Wärmestrom vom Boden in den Raum und

$\dot{Q}_{RA}^*$ : Verlustwärmestrom durch die Gebäudehülle nach Aussen.

Diese Wärmeströme werden jeweils durch einen linearen Ansatz approximiert:

$$\dot{Q}_{WB}^*(t) = \kappa_{WB} \cdot [\vartheta_{RL}(t) - \vartheta_B(t)], \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{BR}^*(t) = \kappa_{BR} \cdot [\vartheta_B(t) - \vartheta_R(t)], \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{RA}^*(t) = \kappa_{RA} \cdot [\vartheta_R(t) - \vartheta_L(t)]. \quad (6)$$

Die äusseren und die inneren Wärmestromgewinne im Raum  $\dot{Q}_{WGR}^*(t)$  und im Boden  $\dot{Q}_{WGB}^*(t)$  stellen gemeinsam mit der Aussenlufttemperatur  $\vartheta_L(t)$  weitere Eingangsgrossen dieses Modells dar. Der durch Wasser an den Boden abgegebene Wärmestrom  $\dot{Q}_{FB}^*(t)$  wird wie folgt durch die Vorlauf­temperatur  $\vartheta_{VL}(t)$ , die Rücklauf­temperatur  $\vartheta_{RL}(t)$  und den Umwälzvolumenstrom  $V_H(t)$  bestimmt:

$$\dot{Q}_{FB}^*(t) = \rho_W V_H(t) c_W \cdot [\vartheta_{VL}(t) - \vartheta_{RL}(t)]. \quad (7)$$

Für die Zahlenwerte der Gebäudeparameter wurde das in der Phase 2 ausgewählte Objekt in Winterthur Seen (vgl. [2]) mit 33% Heizkörperheizungsanteil und 67% Fussbodenheizungsanteil zugrunde gelegt. Die anhand der Messungen aus der Phase 2 validierten Parameter, die beim Ranking für die Simulation der Gebäudeträgheit verwendet werden, lauten:

Heizkreisvolumen:  $V_H = 1.1 \text{ [m}^3\text{]},$

Wärmedurchgangskoeffizient Heizwasser-Boden x wirksame Rohrfläche:  $\kappa_{WB} = 1100 \text{ [W/K]},$

Bodenmasse x Spezifische Wärmekapazität des Bodens:  $m_B c_B = \rho_B V_B c_B = 1e7 \text{ [J/K]},$

Wärmeübergangskoeffizient Boden x Bodenfläche:  $\kappa_{BR} = k_B A_B = 1e5 \text{ [W/K]},$

Wärmedurchgangskoeffizient Gebäude-Aussenluft x wirksame Gebäudefläche:  $\kappa_{RA} = 300 \text{ [W/K]},$

$$\text{Gebäudezeitkonstante: } \tau_G = \frac{\rho_G V_G c_G}{\kappa_{RA}} = 220 \text{ [h].}$$

Damit der Einfluss der Strahlung besser nachgebildet wird, wurde dieses Modell leicht modifiziert, so dass für die Transiente der Raumtemperatur durch Strahlung eine viel kleinere Zeitkonstante resultiert als die Gebäudezeitkonstante  $\tau_G$ :

Strahlungszeitkonstante:  $\tau_S = 5 \text{ [h].}$

In Abbildung 8 erkennt man die gute Übereinstimmung der Simulation mit den gemessenen Verläufen der Rücklauftemperatur und der Raumtemperatur. Insbesondere ist daraus zu entnehmen, dass durch Modifikation des Modells der Strahlungseinfluss auf die Transiente der Raumtemperatur relativ gut modelliert ist. Bei der Simulation wurde die Strahlung durch Rechteckimpulse gemäss Tabelle 1 approximiert.

Tabelle 1: Charakterisierung der Rechteckimpulse für die Simulation der Strahlung

Tag	1	2	3	4	5	6	7
Beginn der Strahlung [h]	10	10	10	10.5	9	-	12
Dauer der Strahlung [h]	3	2.5	3.5	2	3	-	3.5
Intensität der Strahlung [kW]	5	10	12	10	7	0	7

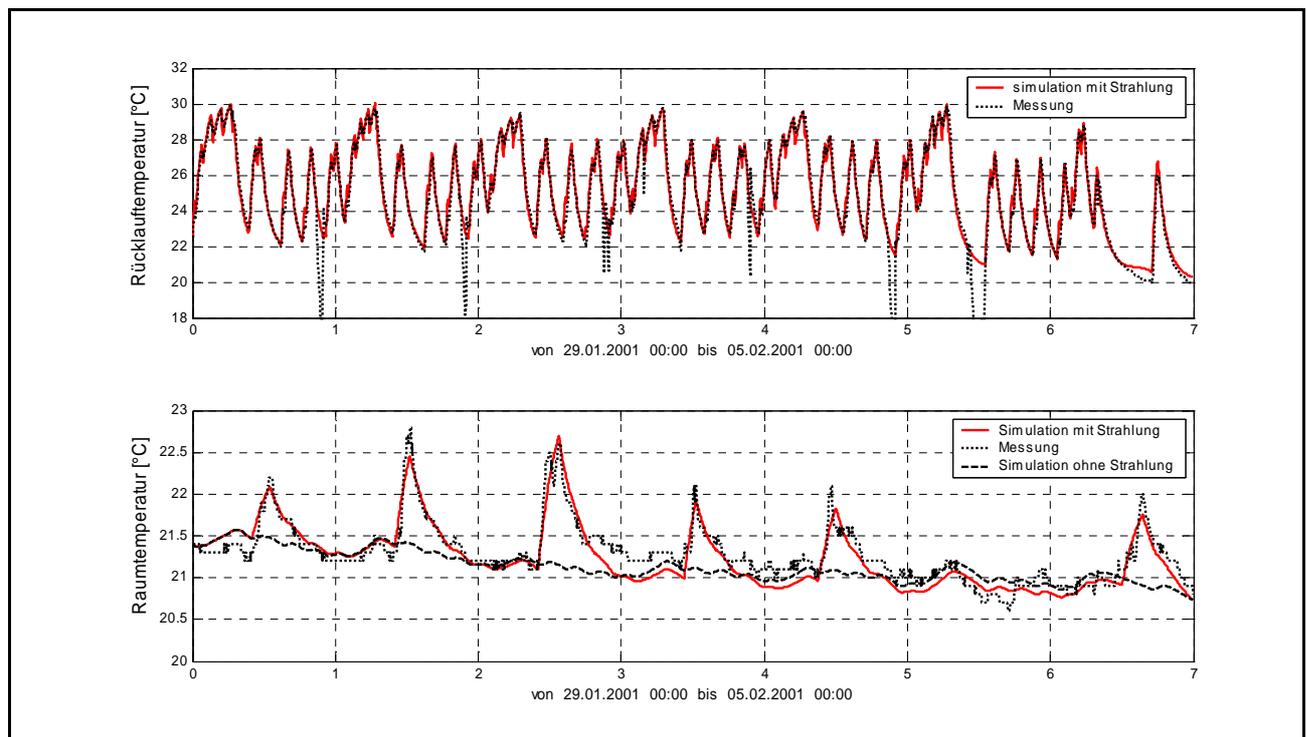


Abbildung 8: Vergleich der simulierten Verläufe der Rücklauftemperatur und der Raumtemperatur mit den gemessenen Verläufen vom 29.01.2001 bis 05.02.2001 an dem in der Phase 2 des Projekts ausgewählten Objekt in Winterthur Seen.

### 2.3.2 Das Erdsondenmodell für die Emulation

Im Gegensatz zur Phase 2 des Projekts wird auf dem Prüfstand (anstelle einer Luft/Wasser-Wärmepumpe) eine Sole/Wasser-Wärmepumpe für die Heizung des emulierten Hauses eingesetzt. In diesem Fall kann die Aussenlufttemperatur nicht mehr als Quelltemperatur verwendet werden. Die Quelltemperatur muss daher am Prüfstand mit Hilfe eines Simulationsmodells der Erdwärmesonde für die Testwärmepumpe (SATAG BW 108.1) emuliert werden.

Zu diesem Zweck wurde das im Rahmen des BFE-Projekts „Berechnungsmodul für Erdwärmesonden“ entwickelte Modell für Erdwärmesonden (EWS) herangezogen (vgl.[7]). Es handelt sich um ein Modell für die in der Schweiz am häufigsten verwendete Doppel-U-Sonde. Das ursprünglich in Programmiersprache Pascal geschriebene EWS-Modul wurde für die Emulation am Prüfstand in Matlab/Simulink implementiert.

In diesem Modell werden drei Subsysteme unterschieden: die Sole, der Sonden-Nahbereich und das entfernte Erdreich. Im Sonden-Nahbereich (1–3 m um die Sondenachse) wird die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung Schichtweise in Zylinderkoordinaten gelöst (vgl. Abbildung 9). Dabei kann jede Erdschicht eigene Stoffwerte aufweisen. Damit kann auch unterschiedlichen Gesteinsformationen Rechnung getragen werden.

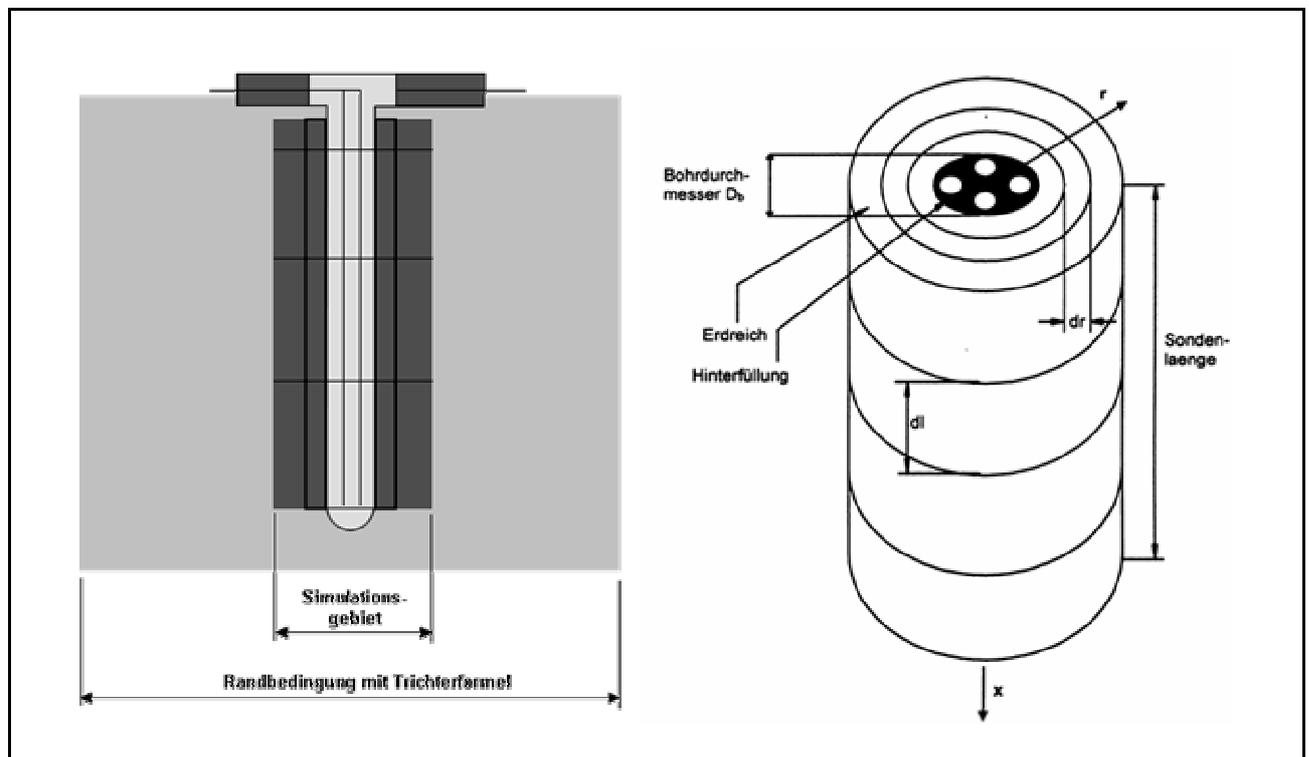


Abbildung 9: Simulationsgebiet des Erdreiches im Sondenbereich (1 bis 3 m um die Sondenachse)

In [7] wird in der Simulation die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung für die Temperatur  $\vartheta$  mit dem Crank-Nicholson-Ansatz als implizite Differenzenengleichung verwendet:

$$\vartheta_{k+1,j} - \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (\vartheta_{k+1,j-1} - \vartheta_{k+1,j}) - \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (\vartheta_{k+1,j+1} - \vartheta_{k+1,j}) = \vartheta_{k,j} + \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (\vartheta_{k,j-1} - \vartheta_{k,j}) + \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (\vartheta_{k,j+1} - \vartheta_{k,j}). \quad (8)$$

Der Index  $k$  steht für die Zeitkoordinate und der Index  $j$  beschreibt die radiale Ortskoordinate.  $C$  ist die Wärmekapazität des Rechenknotens und  $L$  ist die thermische Leitfähigkeit zwischen zwei Rechenknoten.

Bei der Implementation der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung in Matlab/Simulink wurde nur eine Diskretisierung in der Ortskoordinate (vgl. Abbildung 10) mit beliebig einstellbarem Rechengitter durchgeführt:

$$\dot{\vartheta}_{i,j}(t) = \frac{L_j}{C_j} [\vartheta_{i,j-1}(t) - \vartheta_{i,j}(t)] - \frac{L_{j+1}}{C_j} [\vartheta_{i,j}(t) - \vartheta_{i,j+1}(t)]. \quad (9)$$

Für die Zeitkoordinate ist eine Diskretisierung nicht nötig, da die Differentialgleichung in Simulink durch numerische Integration elegant mit Hilfe geeigneter Solver gelöst werden kann.

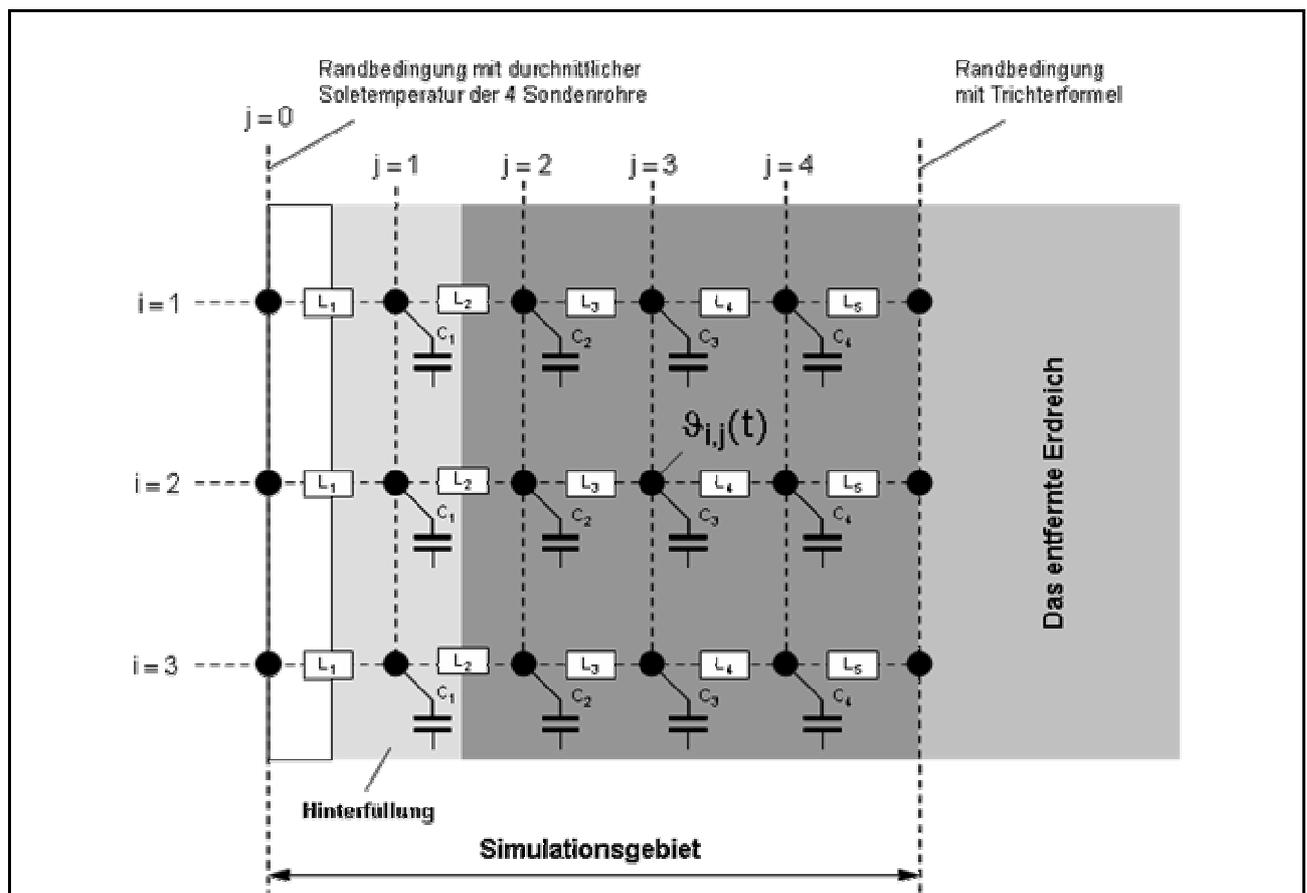


Abbildung 10: Rechengitter der Ortskoordinate für die Simulation des Temperaturfelds in Funktion der Zeit:  $\vartheta_{i,j}(t)$ . Der Index  $j$  steht für die radiale und der Index  $i$  für die axiale Ortskoordinate

Als Randbedingung wird innen die durchschnittliche Soletemperatur der 4 Sondenrohre genommen. Der erste Massenknoten im Rechengitter der Ortskoordinate ist dabei immer die Hinterfüllung. Als äussere Randbedingung wird die Trichterformel verwendet.

**Die Trichterformel:** Die Temperatur zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  am Rand bei einer Entfernung  $r$  von der Sondenachse berechnet sich mit der Trichterformel wie folgt:

$$\vartheta(r,t) = \vartheta(r,0) + \Delta\vartheta(r,t), \quad (10)$$

wobei

$$\Delta\vartheta(r,t) = \sum_{k=1}^n \frac{W(r,t-t_k)}{4\pi\lambda} [\dot{q}_k - \dot{q}_{k-1}], \quad (11)$$

$$W(u) = \left[ -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right], \quad (12)$$

$$u(r,t) = \frac{r^2}{4 \cdot t \cdot a}. \quad (13)$$

$a$ : Temperaturleitfähigkeit in  $\text{m}^2/\text{s}$ ,

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit in  $\text{W/mK}$ ,

$\dot{q}_k$ : durchschnittliche Sondenbelastung der Woche  $k$  in  $\text{W/m}$ ,

$\vartheta(r,0)$ : Temperatur am Rand bei  $t = 0$ .

Der zeitlich variable Wärmeentzug wird in der Trichterformel durch Superposition von beliebig vielen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten beginnenden, konstanten Wärmeentzügen  $\dot{q}_k$  bestimmt. In der Implementation des Simulationsmodells in Matlab/Simulink wird die Neuberechnung wöchentlich durchgeführt. Somit entspricht  $\dot{q}_k$  dem Wärmeentzug in der  $k$ -ten Woche.

**Modellierung der Sole:** Für die Modellierung der Sole wurde ähnlich wie bei dem Sondennahbereich nur eine Diskretisierung in der Ortskoordinate durchgeführt.

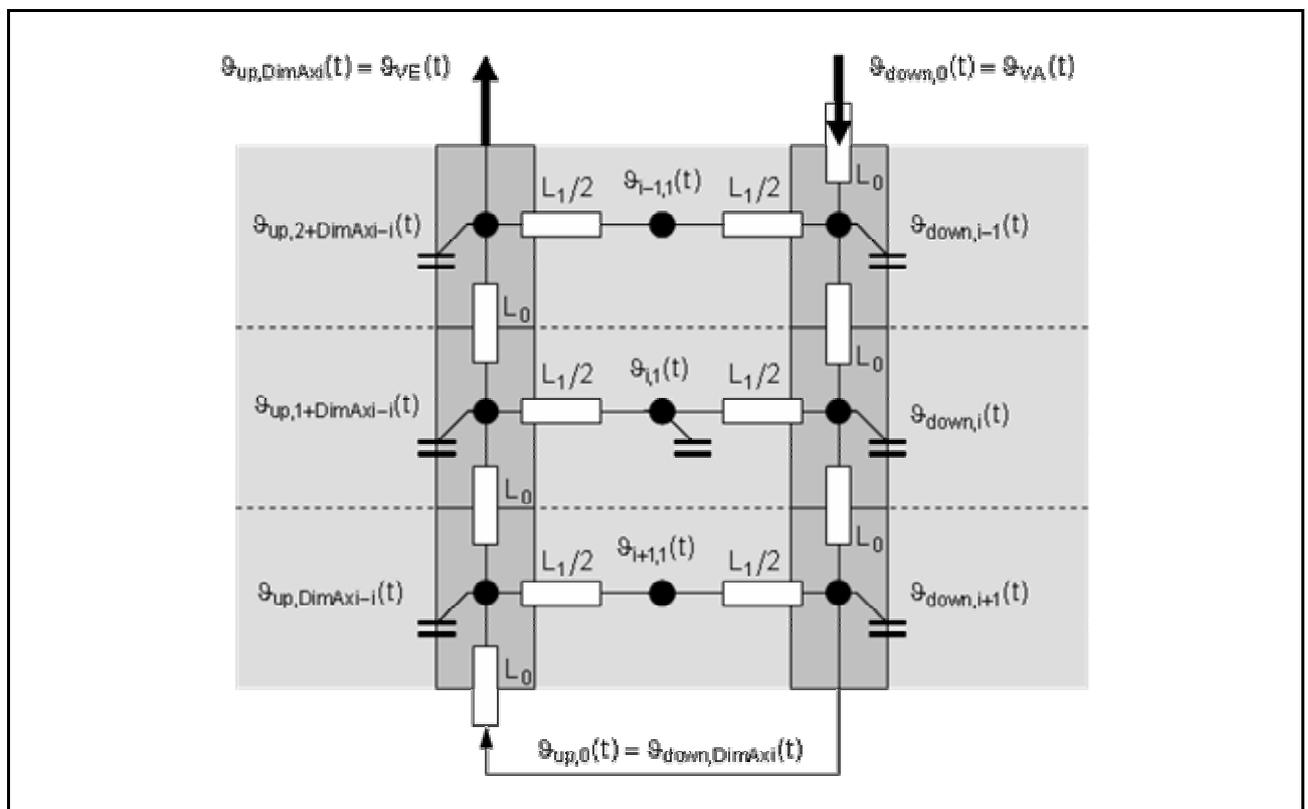


Abbildung 11: Schema zur Modellierung der Sole

Aus der Energiebilanz für das Bilanzelement  $i$  (vgl. Abbildung 11) ergibt sich für die Soletemperatur  $\vartheta_{\text{down},i}(t)$  der hinunterfliessenden Sole:

$$\dot{\vartheta}_{\text{down},i}(t) = \left[ \vartheta_{\text{down},i-1}(t) - \vartheta_{\text{down},i}(t) \right] \cdot \frac{L_0}{m \cdot c_{\text{Sole}}} + \left[ \vartheta_{i,1}(t) - \vartheta_{\text{down},i}(t) \right] \cdot \frac{L_1}{2 \cdot m \cdot c_{\text{Sole}}} \quad (14)$$

und der hinaufströmenden Sole mit der Soletemperatur  $\vartheta_{\text{up},i}(t)$ :

$$\dot{\vartheta}_{\text{up},i}(t) = \left[ \vartheta_{\text{up},i-1}(t) - \vartheta_{\text{up},i}(t) \right] \cdot \frac{L_0}{m \cdot c_{\text{Sole}}} + \left[ \vartheta_{1+\text{DimAxi}-i,1}(t) - \vartheta_{\text{up},i}(t) \right] \cdot \frac{L_1}{2 \cdot m \cdot c_{\text{Sole}}} \quad (15)$$

mit den Randbedingungen

$$\vartheta_{\text{down},0}(t) = \vartheta_{\text{VA}}(t), \quad (16)$$

$$\vartheta_{\text{down},\text{DimAxi}}(t) = \vartheta_{\text{up},0}(t), \quad (17)$$

$$\vartheta_{\text{up},\text{DimAxi}}(t) = \vartheta_{\text{VE}}(t). \quad (18)$$

Dabei ist  $\vartheta_{\text{VA}}(t)$  die Verdampferaustrittstemperatur (= Sondeneintrittstemperatur) und  $\vartheta_{\text{VE}}(t)$  die Verdampfer Eintrittstemperatur (= Sondernaustrittstemperatur). Der Index  $i$  beschreibt die axiale Ortskoordinate, aufsteigend in Flussrichtung der Sole. Der Parameter  $\text{DimAxi}$  entspricht der Anzahl der Unterteilungen in axialer Richtung.

### 3 Resultate der Untersuchungen

Da sowohl die Prüfstandsregelung als auch die Haus- und Erdsonden-Emulation am Prüfstand im Rahmen der Phase 3 des Projekts realisiert werden mussten, wurde zu Beginn des Projekts beschlossen, das Ranking der PBM-Regler zunächst mit Hilfe der HIL-Simulation (HIL: Hardware in the loop) durchzuführen.

Bei dieser Alternativlösung zur Emulation ist das Reglergerät mit dem entsprechenden Regleralgorithmus real vorhanden. Die Wärmepumpe liegt jedoch im Gegensatz zur Emulationsvariante real nicht vor und wird wie das Gebäude und die Erdsonde im Prüfstandsrechner simuliert. Dabei werden für das Gebäude und die Erdsonde dieselben Modelle verwendet, die im Kapitel 2.3 beschrieben wurden. Die simulierten Rücklauftemperaturen des Wassers und der Sole werden nicht als Sollwerte für die Prüfstandsregelung verwendet, sondern direkt als Istwerte dem Regler zur Verfügung gestellt. Dem Regler wird ausserdem auch die Aussenlufttemperatur zur Verfügung gestellt. Die Abbildung 12 zeigt ein am Institut entwickeltes HIL-Testgerät für das Satag-Reglergerät Cd 50. Es funktioniert als Schnittstelle zwischen dem Prüfstandsrechner und dem Satag-Reglergerät. Eine entsprechende Schnittstelle wurde auch für das Reglergerät der Firma Siemens (RVP 300) realisiert.

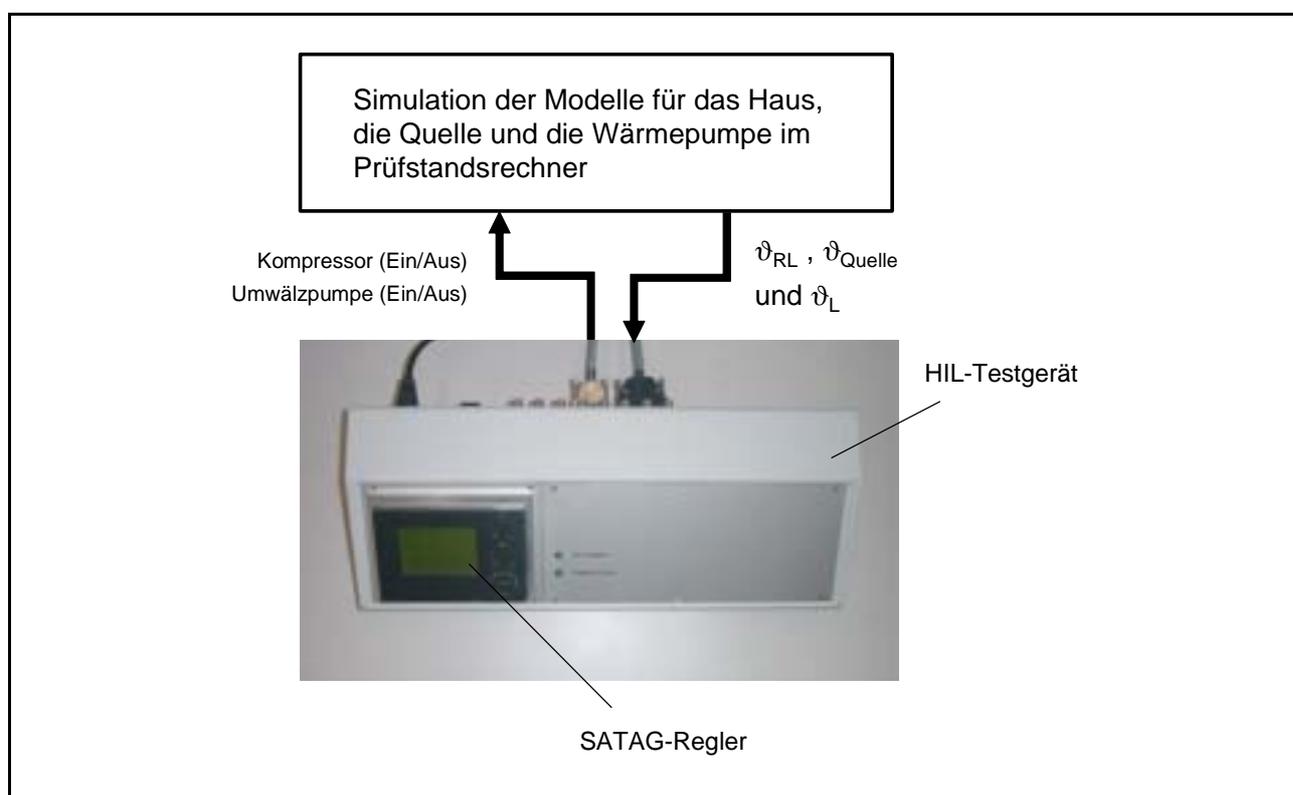


Abbildung 12: HIL-Testgerät (HIL: Hardware in the loop) für die Erprobung eines im SATAG-Regler CD-50 implementierten Regleralgorithmus (Rücklauftemperaturregelung, energiekenntnisbasierte PBM und modellbasierte PBM).

Für das Ranking konnten alle Reglervarianten erfolgreich mit Hilfe der HIL-Simulation untersucht werden. Der witterungsgeführte Zweipunktregler wurde auch exemplarisch in der Emulationsumgebung untersucht. Die Resultate der Untersuchungen werden im nächsten Kapitel vorgestellt und im Kapitel 4 diskutiert. Jede Reglervariante wurde während drei Wochen untersucht. Als Randbedingung für die Untersuchungen wurde der Verlauf der Aussenlufttemperatur und Strahlung

für die ersten zwei Wochen synthetisch generiert, während für die dritte Woche reale Messdaten verwendet wurden (vgl. Abbildung 13). Für die definitive Einstellung jeder Reglervariante wurden die Daten einer Testwoche mit stückweise konstanten Temperaturen (Woche 1 in Abbildung 13) mit provisorisch eingestellten Reglern zur Verfügung gestellt.

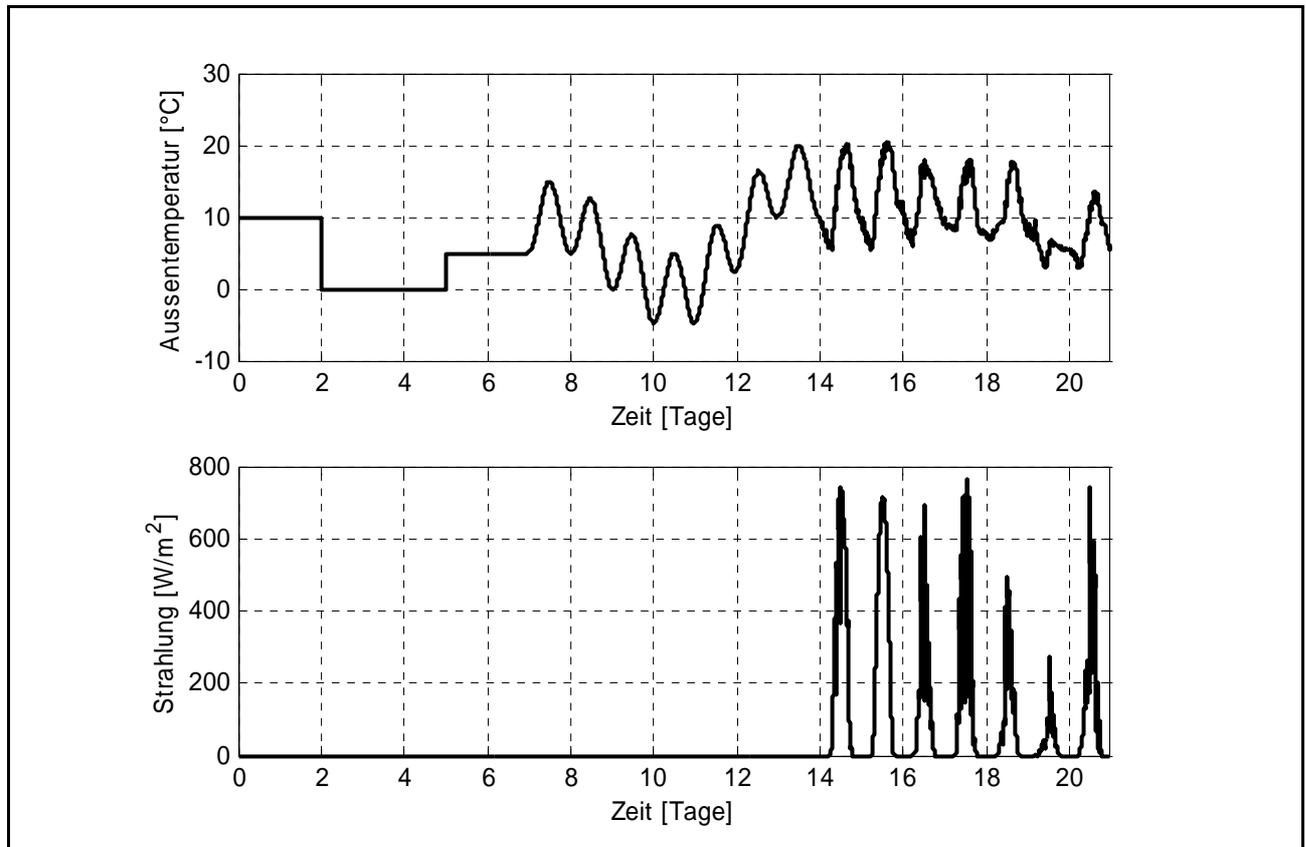


Abbildung 13: Verlauf der Aussenlufttemperatur und Strahlung als Randbedingung für die Untersuchungen. Die ersten zwei Wochen: synthetisch, die dritte Woche: reale Messdaten.

### 3.1 Witterungsgeführter Rücklauf­temperatur-Regler (SATAG)

Der konventionelle Zweipunkt-Regler wurde als einziger Regler sowohl mit der HIL-Simulation als auch am Prüfstand mit der Emulation untersucht. Die Reglereinstellung für beide Varianten ist in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Die Einstellungen des Witterungsgeführten Rücklauf­temperaturreglers

Kennlinie:	B:	24.4 [°C]
	s:	0.22 [°C /°C]
Hysterese:		+/- 2 [°C]
Normalbetrieb:	Zeit	22 <sup>00</sup> -16 <sup>00</sup>
	Sollraumtemperatur	21 [°C]
Reduzierter Betrieb:	Zeit	16 <sup>00</sup> -22 <sup>00</sup>
	Sollraumtemperatur	19 [°C]
Sperrzeit:		11 <sup>00</sup> -12 <sup>00</sup>

Im Unterschied zu den anderen Reglern war eine direkte Einstellung der Reglerparameter anhand der vorgegebenen Hausparameter nicht möglich, weil die Rücklaufemperaturkennlinie nicht explizit von der Energiekennlinie des Hauses abhängt. Die Anpassung der Kennlinie wurde während der Testwoche mit der HIL-Simulation über die Einstellung ‚zu warm/zu kalt‘ im Regler vorgenommen. Dabei wird die Information über den Soll/Ist-Raumtemperaturdifferenzen bei verschiedenen Aussentemperaturen dem Regler mitgeteilt.

Die Reglereinstellung wurde sowohl für die Simulationen mit dem HIL-Testgerät als auch an der Wärmepumpeanlage mit der Hausemulation verwendet. Die Verläufe der Raumtemperatur für beide Varianten sind in Abbildung 14 dargestellt.

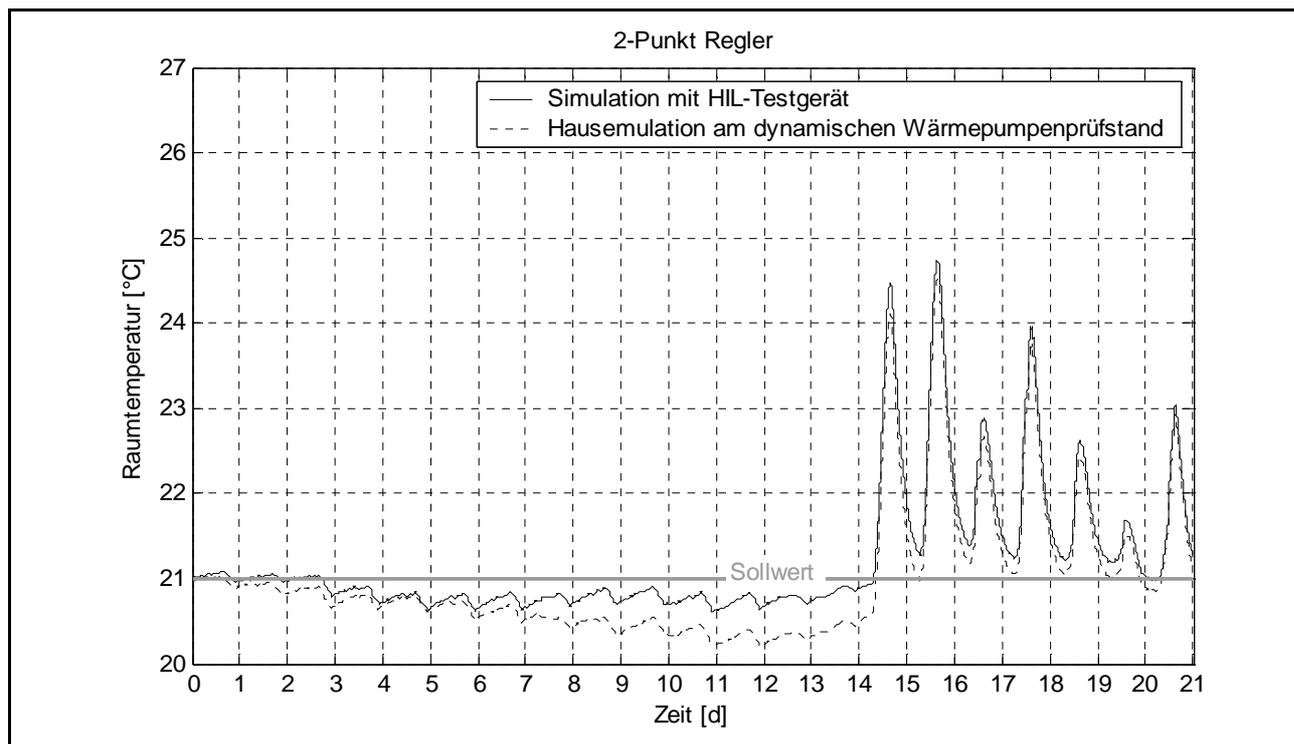


Abbildung 14: Raumtemperaturverläufe während der 3 Testwochen (Zweipunkt-Regler) für die Versuche am dynamischen Prüfstand sowie am HIL-Testgerät.

Die Solltemperatur wird (vor allem bei der HIL-Simulation) gut gehalten. Die Schwankungen bleiben klein, weil vor allem ein kleiner reduzierter Betrieb gewählt wurde. Der tiefere Raumtemperaturverlauf an der Anlage kann dadurch begründet werden, weil die Heizleistung der Wärmepumpe an der Anlage im Vergleich zur HIL-Simulation zu hoch geschätzt wird und deshalb die Rücklauf-temperatur schneller die Ausschalt-Sollrücklauf-temperaturen erreicht. Als Folge davon resultieren kürzere Einschaltpulse und somit tieferer Temperaturverlauf (vgl. Abbildung 15).

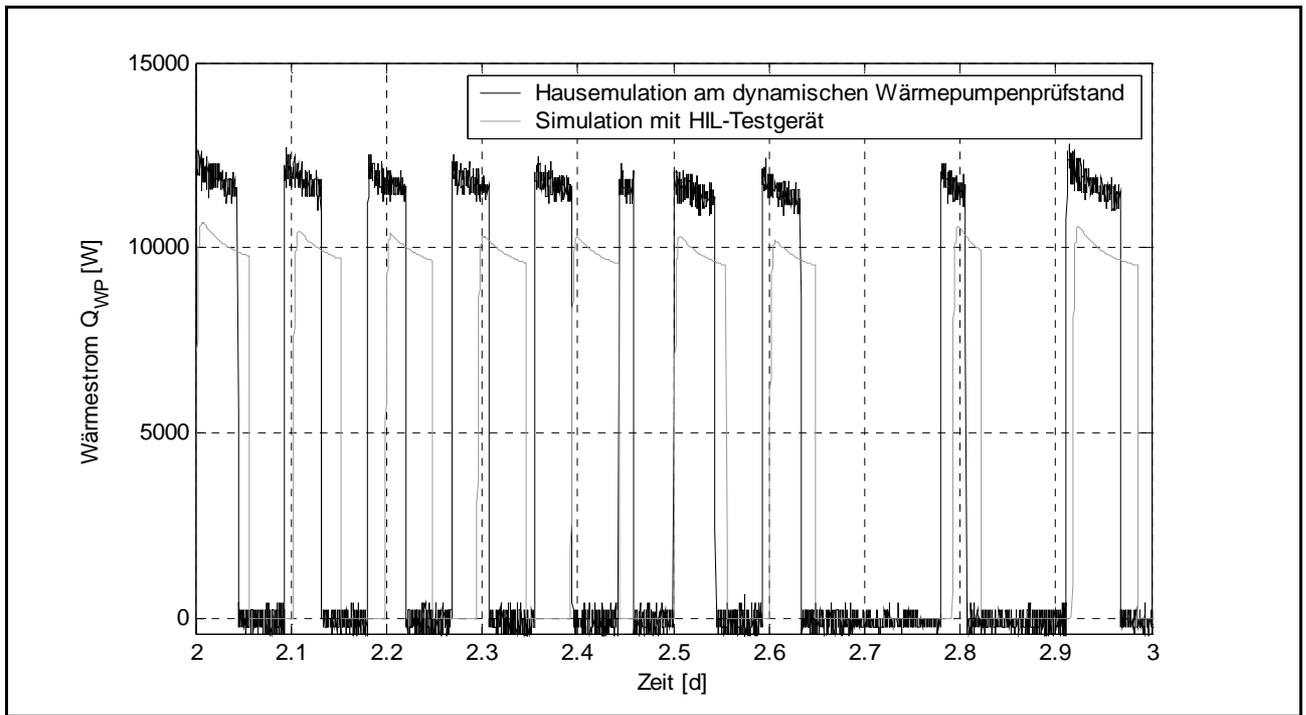


Abbildung 15: Vergleich der geschätzten Heizleistungen in der HIL-Simulation und an der Anlage

Die Verteilungen der Pulse sind für die HIL-Simulation in Abbildung 16 und für die Emulation am Prüfstand in Abbildung 17 dargestellt. Sie sehen in beiden Fällen ähnlich aus. Man kann feststellen, dass der Regler am dynamischen Prüfstand im Mittel kürzere Pulse liefert.

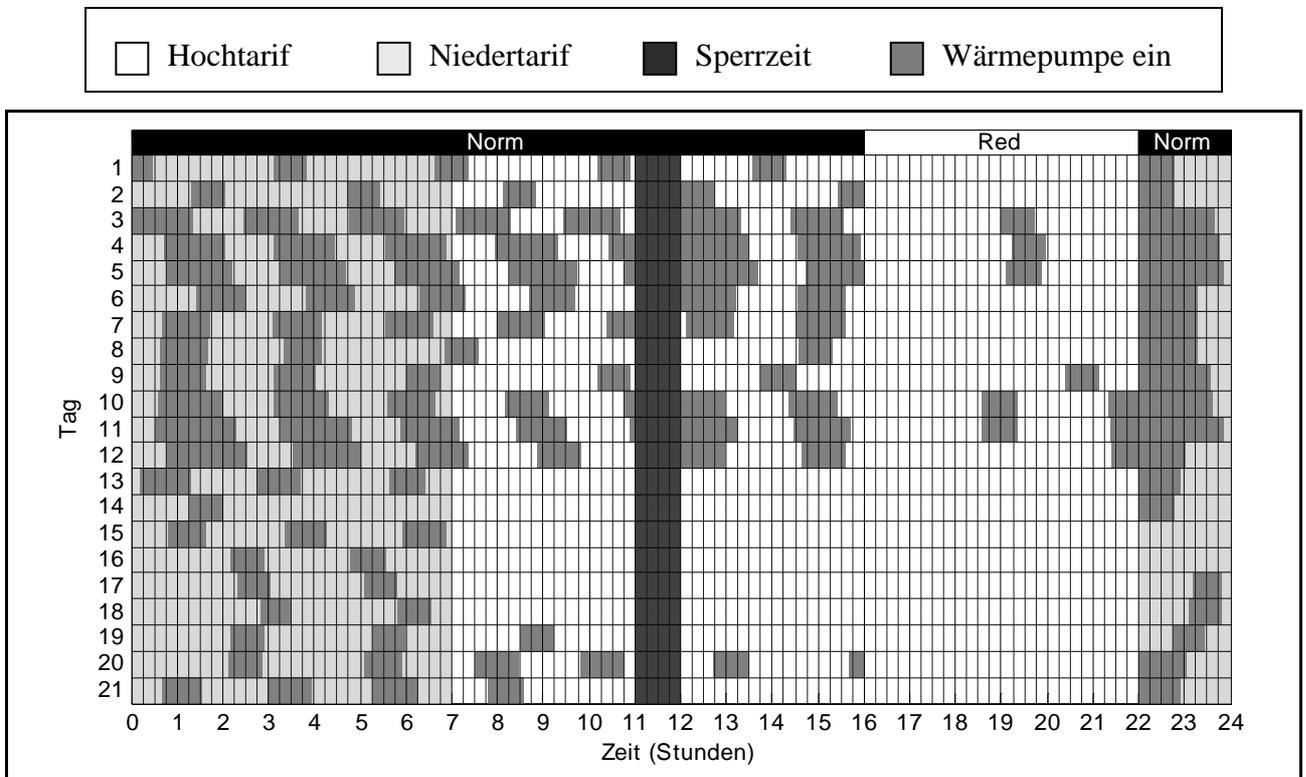


Abbildung 16: Pulsverteilung vom Rücklaufftemperatur-Regler am HIL-Testgerät. Die obere Farb-Bezeichnung gilt für alle Pulsverteilungsdiagramme.

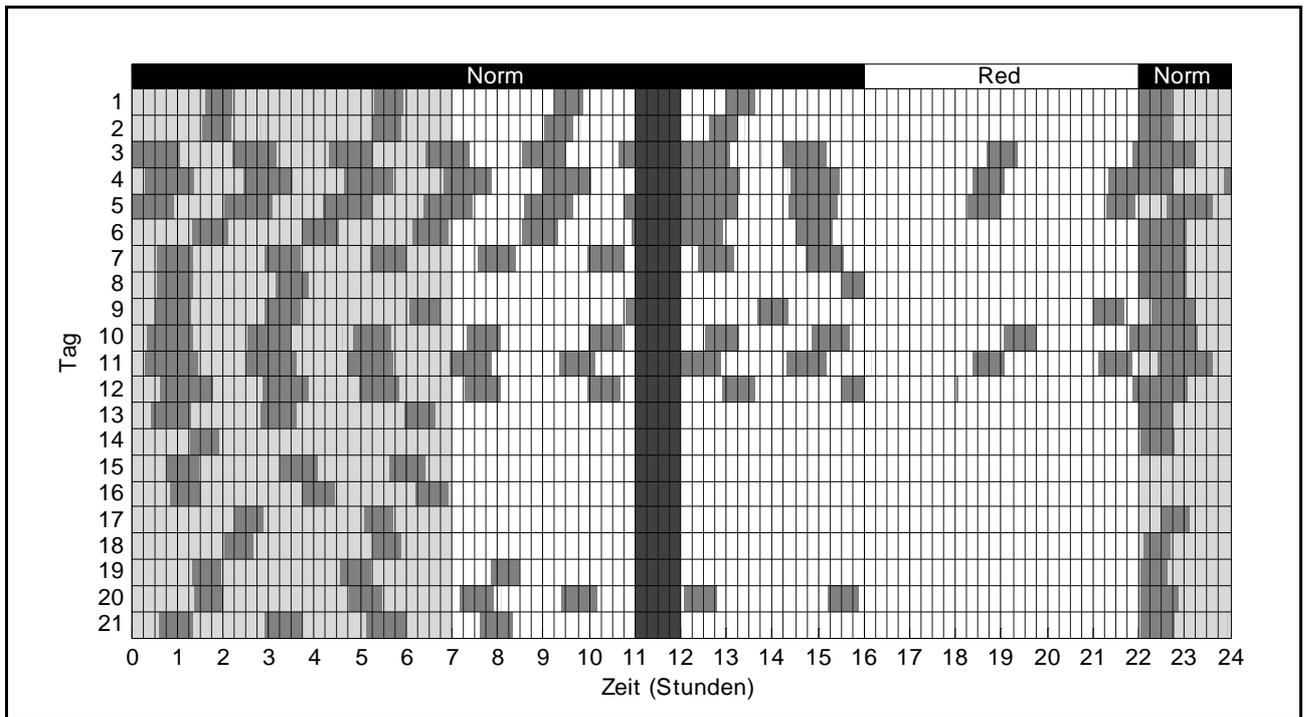


Abbildung 17: Pulsverteilung vom Rücklaufemperaturbasierten Regler am dynamischen Prüfstand. Der normale bzw. reduzierte Betrieb sind mit Norm und Red bezeichnet.

Da die Heizkennlinie von der aktuellen Aussentemperatur abhängt, reagiert der Regler gut und ohne Verzögerung auf die Aussentemperatursprünge in der ersten Woche. Der Anteil der gelieferte Niedertarifenergie beträgt sowohl für die HIL-Simulation als auch für die Emulation am Prüfstand ungefähr 60 %. Dieser Wert liegt ca. 10% unter dem geforderten 70% Niedertarifanteil. Der Grund dafür ist die Wahl eines zu kleinen reduzierten Betriebsintervalls.

### 3.2 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler (SATAG)

Der Energiekennlinienbasierte PBM-Regleralgorithmus wurde im SATAG Reglergerät implementiert. Die Einstellung der Reglerparameter ist in der Tabelle 3 zusammengefasst:

Tabelle 3: Die Einstellungen des Energiekennlinienbasierten PBM-Reglers

Energiekennlinie:	B:	115 [kWh/d]
	s:	7.2 [kWh/(K.d)]
Niedertarifanteil:		70 [%]
Wunschlängelänge:		60 [min]
Wunschpausenlänge:		60 [min]
Minimale Pausenlänge:		15 [min]
Minimale Pulslänge:		15 [min]

Die Energiekennlinie wurde dabei durch die Umrechnung des Heizleistungsbedarfs des Hauses in Tagesenergiebedarf wie folgt bestimmt:

$$s = 0.3[kW / K] \cdot \frac{24}{1}[h / d] = 7.2[kWh / (K \cdot d)] \quad B = 7.2[kWh / (K \cdot d)] \cdot 16[K] = 115.2[kWh / d]$$

Die gelieferte Wärmemenge wird für die Bilanzierung anhand der Wärmepumpenkennlinie geschätzt, wobei die aktuelle Soleeintrittstemperatur verwendet wird. Der Raumtemperaturverlauf der drei Simulationswochen (21 Tage) ist in Abbildung 18 dargestellt.

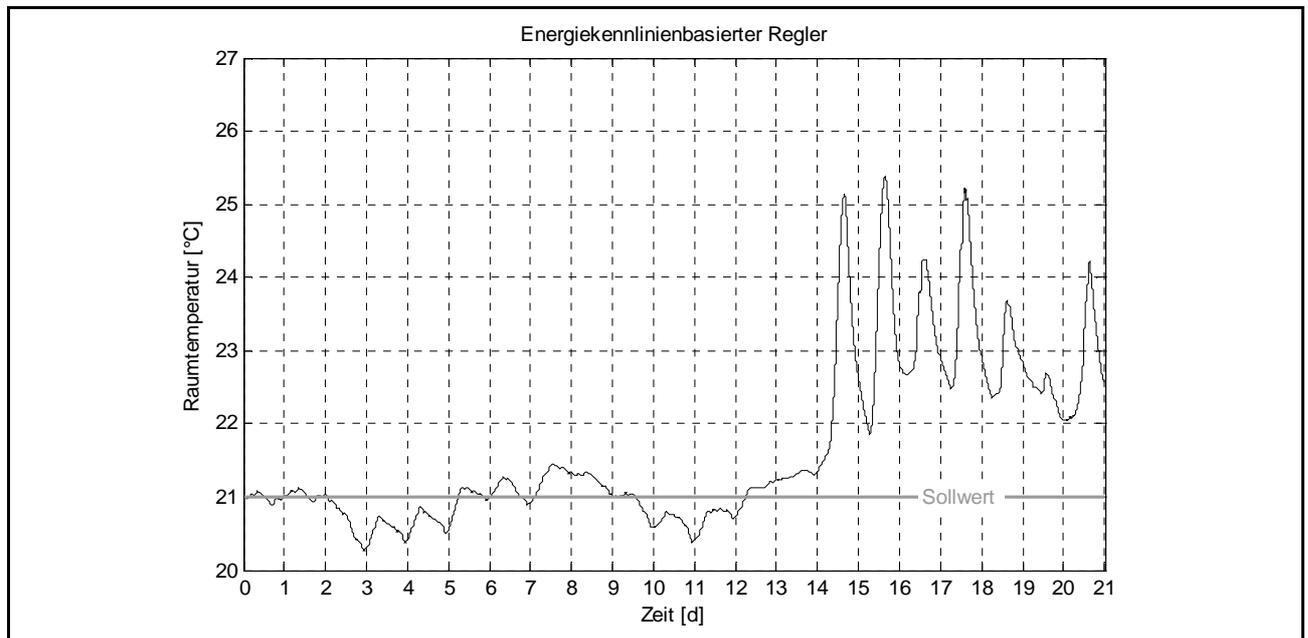


Abbildung 18: Raumtemperaturverlauf während der 3 Testwochen (energiekennlinienbasiert)

Die ersten zwei Tage folgt der Raumtemperaturverlauf dem Sollwert gut. Der Aussentemperatursprung am dritten Tag führt zu einer momentanen Raumtemperaturabsenkung. Der Grund dafür ist die Berechnung des Tagesenergiebedarfs anhand der über den Tag gemittelten Aussentemperatur, was die Reaktion des Reglers träge macht.

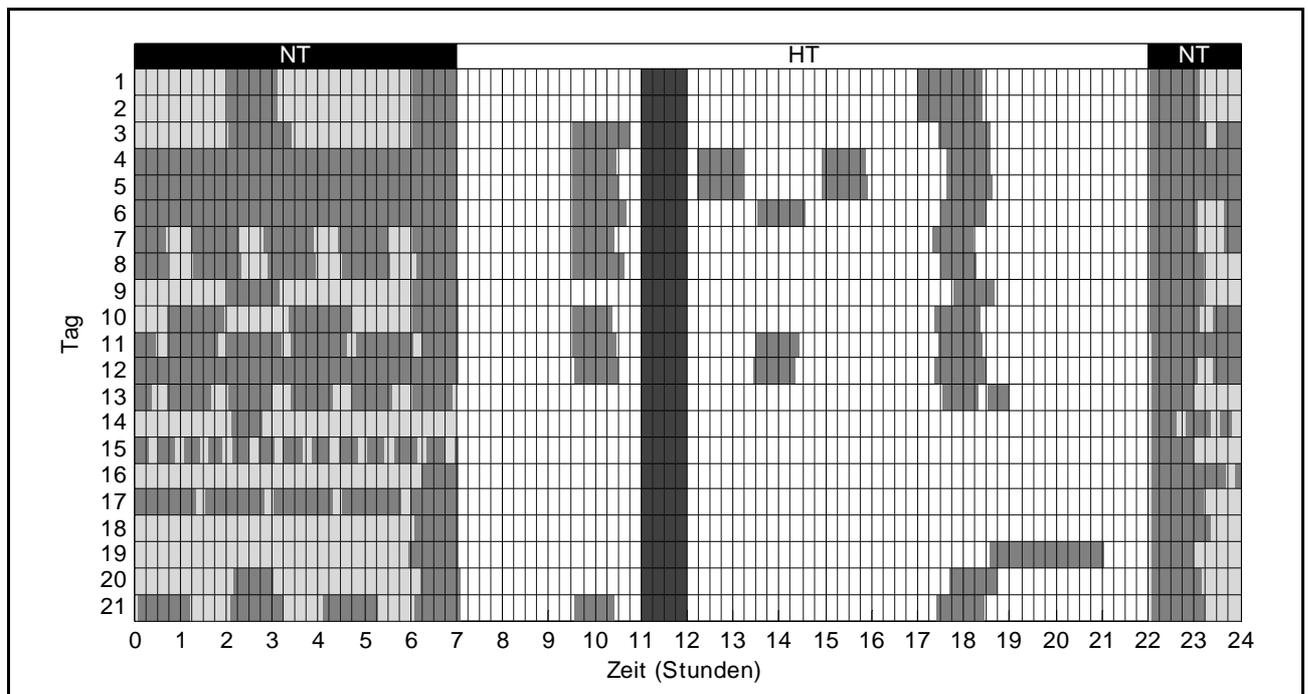


Abbildung 19: Pulsverteilung vom Energiekennlinienbasierten Regler. Der Hochtarif- und Niedertarifbereich sind mit HT und NT bezeichnet.

In Abbildung 19 ist die Pulsverteilung dargestellt. Die Pulsverteilung am dritten und fünften Tag zeigen gut die verspätete Reaktion des Reglers auf den Aussentemperatursprung. Wie gewünscht werden im Allgemeinen die Pulse meist am Anfang bzw. am Ende des Niedertarifs gelegt und die Pulslänge ist ungefähr 60 Minuten. Der Niedertarifanteil beträgt 74.7%.

### 3.3 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler (SIEMENS)

Der laufzeitkennlinienbasierte PBM-Regler wurde im SIEMENS-Reglergerät implementiert. Die Einstellungen sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Der Tag wurde in 4 Fenster unterteilt, die ersten drei Fenster im Hochtarifbereich und das vierte im Niedertarifbereich. Die Solllaufzeit wurde anhand der Wärmepumpenkennlinie und der Hauskennlinie berechnet. Die Abhängigkeit der Wärmepumpenkennlinie von der Soletemperatur wird hier vernachlässigt.

*Tabelle 4: Die Einstellungen des laufzeitkennlinienbasierten PBM-Reglers*

Sollraumtemperatur:	21 [°C]	
Fenster 1:	Beginn: 7 <sup>00</sup>	Energieanteil: 7 [%]
Fenster 2:	Beginn: 11 <sup>00</sup>	Energieanteil: 15 [%]
Fenster 3:	Beginn: 17 <sup>00</sup>	Energieanteil: 8 [%]
Fenster 4:	Beginn: 22 <sup>00</sup>	Energieanteil: 70 [%]
Laufzeitkennlinie (für $T_R=20^\circ\text{C}$ ):	Aussentemperatur: -5 [°C]	Laufzeit: 16:00 [Std]
	Aussentemperatur: 15 [°C]	Laufzeit: 00:00 [Std]
Pulslänge:	Minimal: 30 [Min]	Wunsch: 60 [Min]
Pausenlänge:	Minimal: 15 [Min]	Wunsch 60 [Min]
Gebäudezeitkonstante:	20 [Std]	
Aussentemperatur:	Gedämpft: 25 [%]	Aktuell: 75 [%]

Die Laufzeitkennlinie ist linear und gilt für einen Raumtemperatursollwert von 20°C. Für 21°C wird die Kennlinie parallel verschoben. Um die Dynamik des Hauses zu berücksichtigen wird die notwendige Laufzeit mit einer gefilterten Aussentemperatur berechnet. Dieses Signal besteht aus 25% gedämpfter Temperatur (mit einer Filterzeitkonstante von 20h) und aus 75% aktueller Temperatur.

Die Raumtemperatur folgt für die erste Woche dem Sollwert gut, steigt aber leicht in den letzten zwei Wochen. Der Aussentemperatursprung vor allem am dritten Tag wird gut kompensiert.

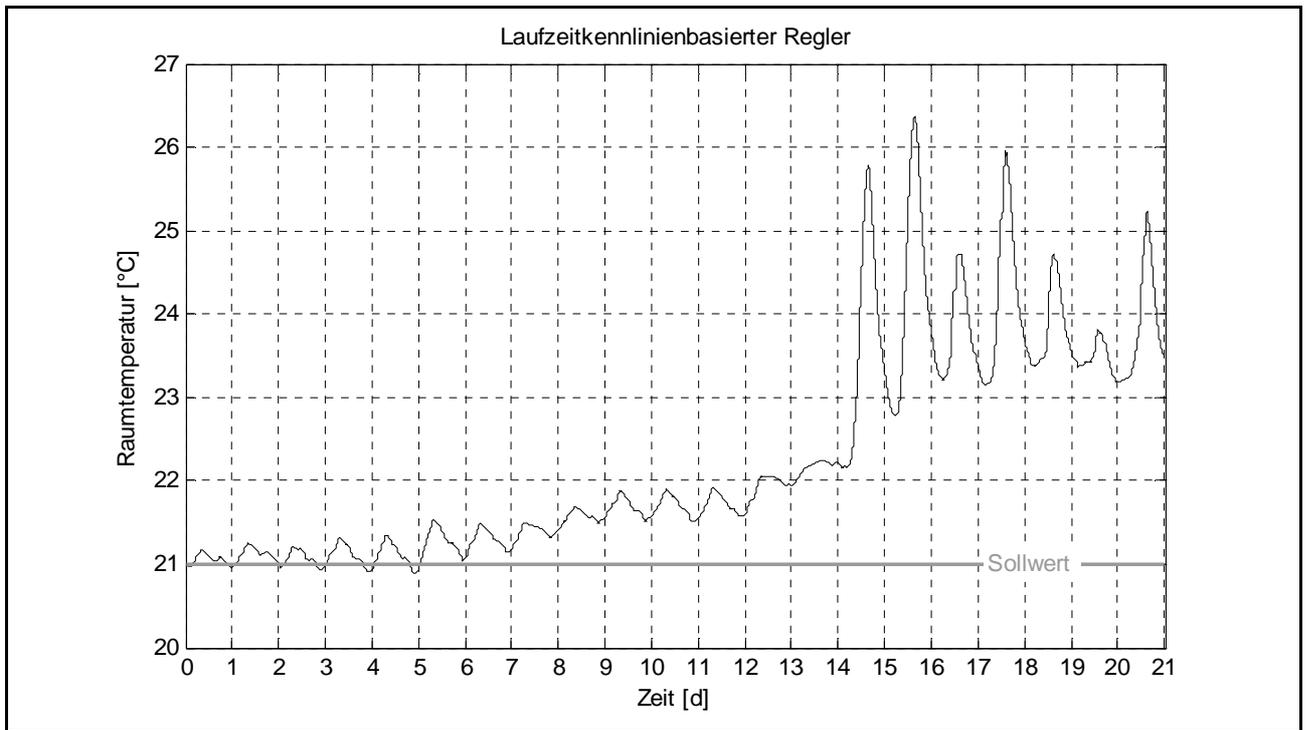


Abbildung 20: Raumtemperaturverlauf während der 3 Testwochen (laufzeitkennlinienbasiert)

Wie in Abbildung 21 dargestellt ist, versucht der Regler die Pulse am Ende jedes Zeitfensters zu platzieren. Der Niedertarifanteil beträgt 70.8%, entspricht also dem Sollwert.

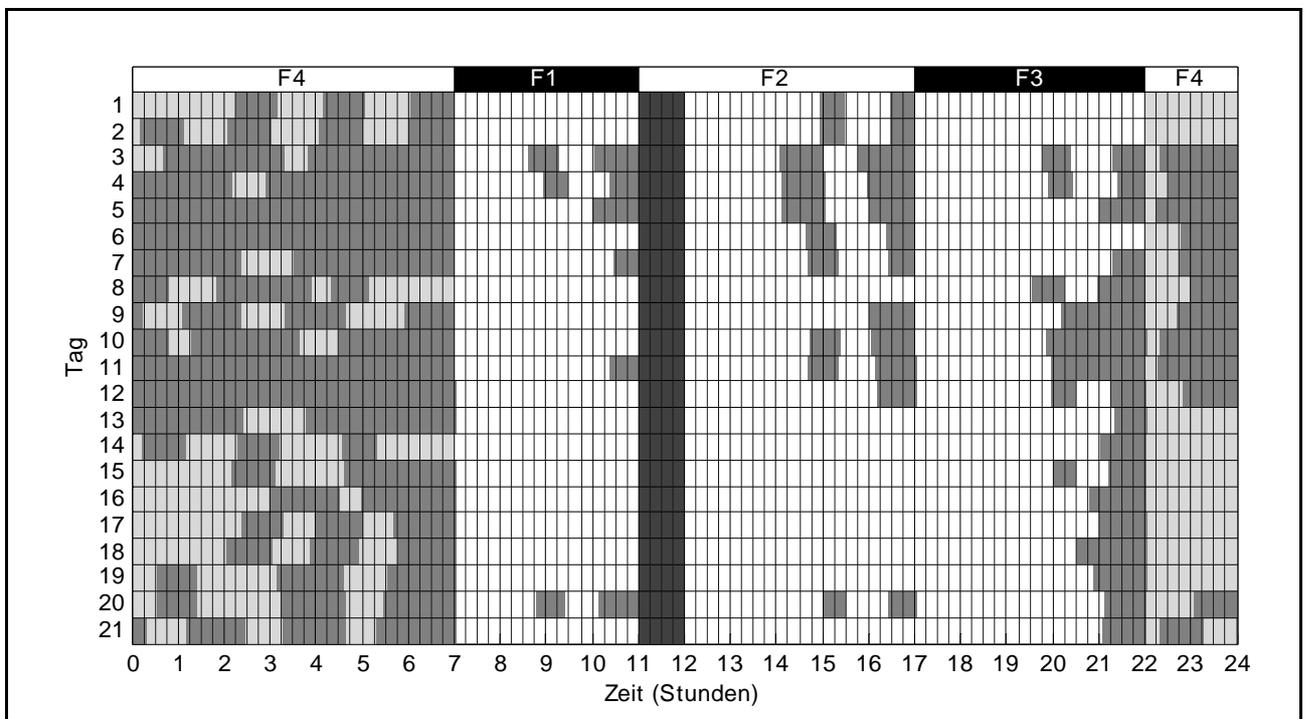


Abbildung 21: Pulsverteilung vom Laufzeitkennlinienbasierten Regler. Die 4 Zeitfenster sind mit F1 bis F4 bezeichnet

### 3.4 Modellbasierter PBM-Regler (SATAG)

Für diesen Regler wurde der modellbasierte prädiktive Regleralgorithmus aus [2] leicht modifiziert. Der Algorithmus wurde für die Sole-Wasser Wärmepumpe angepasst. Für die Schätzung der COP-Werte sind die Prädiktionen der Soleeintrittstemperatur und der Kondensatoraustrittstemperatur erforderlich. Man beachte, dass für die korrekte Prädiktion der Temperaturverläufe, der Verlauf der Heizleistung und das Modell der Erdsonde bekannt sein muss. Da jedoch der Regler die Heizleistung noch zu bestimmen hat, ist die Problemlösung nur iterativ möglich. Alternativ kann angenommen werden, dass die Soleeintrittstemperatur proportional zur Aussentemperatur ist. So muss nur die Proportionalkonstante bestimmt werden. Die Verteilung der Wärmepakete wird dabei während des Tages gleichmässig angenommen und somit nicht berücksichtigt, dass die Quelltemperatur im Niedertarif tiefer liegt. Eine andere Möglichkeit wäre es, ähnlich wie bei der Prädiktion der Aussentemperatur, eine Vorhersage für die Quelltemperatur zu machen. Dabei würde man auch hier annehmen, dass der Verlauf der Quelltemperatur gleich bleibt wie in den letzten 24 Stunden und nur noch um die Differenz zwischen der aktuellen und der vortägigen Temperatur verschoben ist. In der implementierten Version des Algorithmus wurde der COP-Wert im Gütekriterium für den Prädiktionshorizont von 24 Stunden konstant angenommen. Das neu verwendete Gütekriterium lautet:

$$J(\dot{Q}_{Bed}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \left\{ R \cdot \left( \frac{Tarif_k}{COP} \right)^2 \cdot 10^{(2-4 \cdot Comfort/10)} \cdot \dot{Q}_{Bed,k}^2 + (T_{R,k} - T_{Rsoll,k})^2 \right\}, \quad (19)$$

wobei R ein Grundgewichtungsfaktor ist, der Parameter „Tarif“ die Energiekosten darstellt und „Comfort“ ein frei wählbarer Parameter zwischen 0 und 10 ist. Je grösser der Comfortparameter gewählt wird, desto besser versucht der Regler den Raumtemperatursollwert zu halten.

Im Hinblick auf die Erweiterung des Reglers um eine On-line-Identifikation der Parameter des Hausmodells (adaptiver Regler) und damit das im Regler verwendete Hausmodell nicht mit dem Simulationsmodell (vgl. Kapitel 2.3.1) identisch ist, wurde das im Regler verwendete Hausmodell um eine Ordnung reduziert, d.h. die Bodendynamik wurde vernachlässigt, so dass die Wärme direkt vom Heizwasser in den Raum strömt. Das Modell wird durch folgende Energiebilanzgleichungen beschrieben:

$$c_w \rho_w V_H \dot{\vartheta}_{RL}^*(t) = \dot{Q}_{FB}^*(t) - \dot{Q}_{WR}^*(t) \quad (20)$$

$$c_G \rho_G V_G \dot{\vartheta}_R^*(t) = \dot{Q}_{WR}^*(t) - \dot{Q}_{RA}^*(t) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{FB}^*(t) = \rho_w V_w(t) c_w \cdot [\vartheta_{VL}^*(t) - \vartheta_{RL}^*(t)] \quad (22)$$

$$\dot{Q}_{WR}^*(t) = \kappa_{WR} \cdot [\vartheta_{RL}^*(t) - \vartheta_R^*(t)] \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{RA}^*(t) = \kappa_{RA} \cdot [\vartheta_R^*(t) - \vartheta_L^*(t)] \quad (24)$$

Die Reglerparameter für die HIL-Simulation sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Die letzten 5 Parameter waren intern im Programm definiert (fest verdrahtet) und konnten im implementierten Regler nicht geändert werden.

Tabelle 5: Die Einstellungen des modellbasierten PBM-Reglers

Sollraumtemperatur:	21 [°C]
Comfort:	8
Tarifverhältnis:	0.45
Prädiktionshorizont:	24 [Std]
Periodendauer:	2 [Std]
Reglerabtastrzeit:	1 [Std]
Minimale Pulslänge:	15 [Min]
Maximale Pausenlänge:	10 [Min]

Die Abbildung 22 zeigt den Raumtemperaturverlauf. Der Raumtemperatursollwert wird gut gehalten. Der Aussentemperatursprung wird gut kompensiert. Die Fehler in der Aussentemperaturvorhersage haben fast keine Auswirkung auf den Raumtemperaturverlauf, denn der Parameter „Comfort“ wurde hoch gewählt. Mit dieser Einstellung wird die prädizierte Aussentemperatur durch den Optimierungsalgorithmus weniger stark berücksichtigt. Mit einem kleineren Wert für „Comfort“ würde der Regler mehr die Energieminimierung gewichten und die Aussentemperaturvorhersage stärker berücksichtigen. Dadurch würde der Regler sensibler auf einen Prädiktionsfehler reagieren.

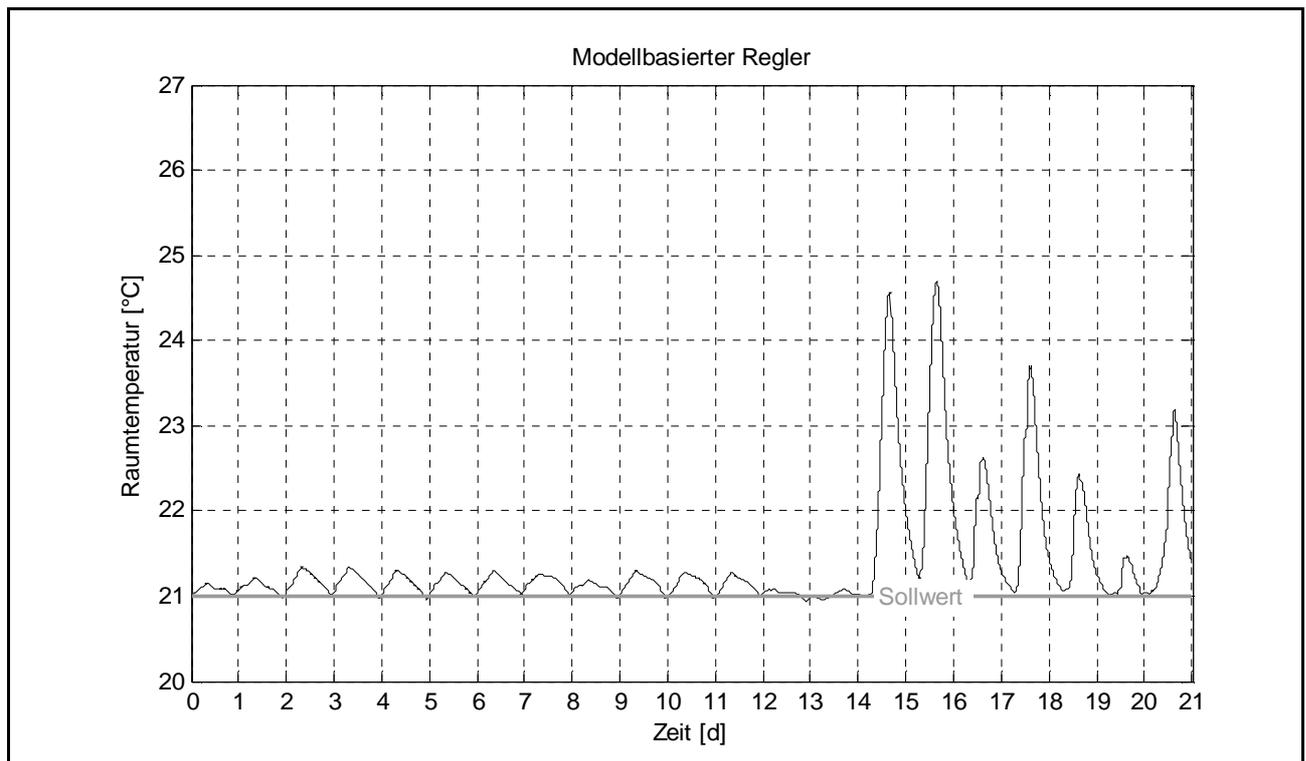


Abbildung 22: Raumtemperaturverlauf während der 3 Testwochen (modellbasiert)

Die Pulsverteilungen sind in Abbildung 23 dargestellt. Wegen der festen Periodendauer (2 Stunden) kann nicht wie bei den anderen zwei PBM-Reglern eine gewünschte Pulslänge vorgegeben werden. Dadurch werden die Pulse im Hochtarif ziemlich kurz. Der Niedertarifanteil ist 71.8%, was ungefähr dem Sollwert entspricht. Man beachte, dass der Niedertarifanteil auch nicht explizit eingestellt werden kann. Die Wärmepakete werden vom Regler so verteilt, dass die Kosten optimiert werden.

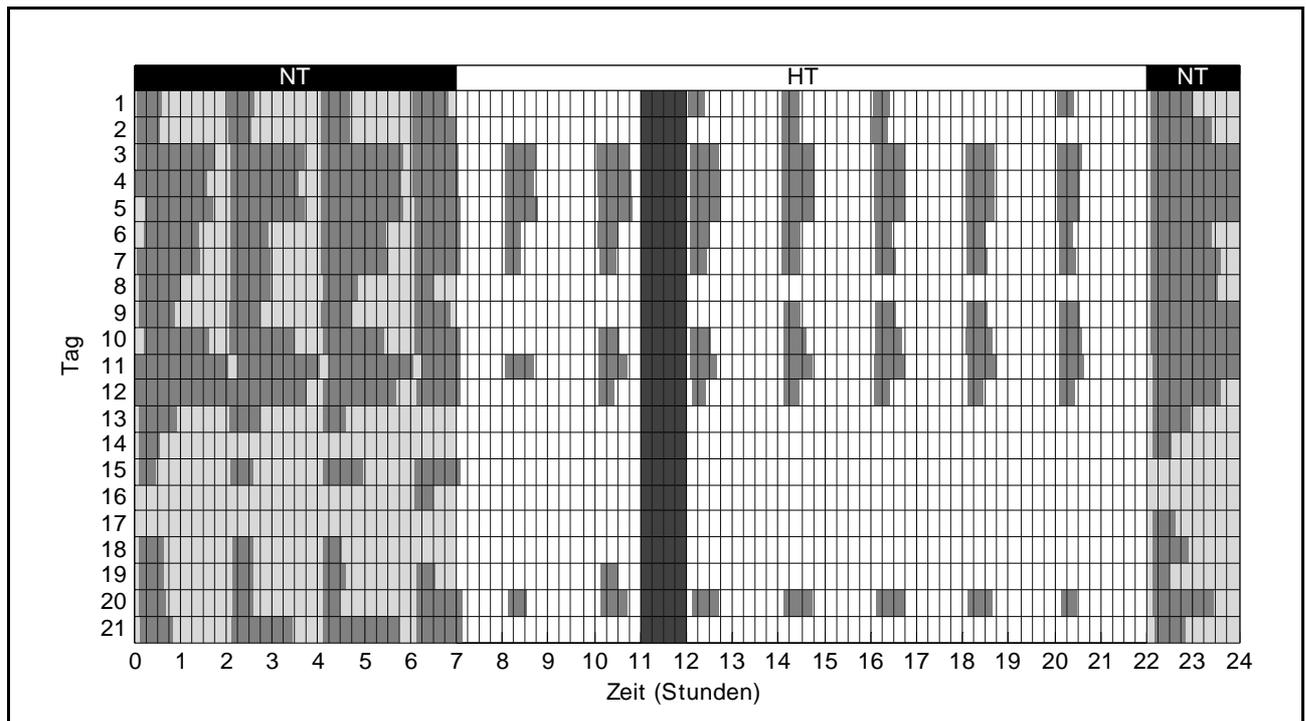


Abbildung 23: Pulsverteilung vom modellbasierten PBM-Regler. Der Hochtarif- und Niedertarifbereich sind mit HT und NT bezeichnet.

## 4 Diskussion der Resultate

### 4.1 Fragestellung

Die Diskussion der Resultate soll folgende Fragen beantworten:

1. Wie gut wurden die Vorgaben der energiekenlinienbasierten PBM (siehe Kapitel 3 in [2]) im energiekenlinienbasierten PBM-Regler von Satag und im laufzeitkenlinienbasierten PBM-Regler von Siemens umgesetzt?
2. Wie gut wurden die Vorgaben der modellbasierten PBM (siehe Kapitel 6 in [2]) im modellbasierten PBM-Regler von Satag umgesetzt?
3. Da die Prüfstandsregelung noch nicht bereit war, wurden die Probeläufe mit dem Testgerät HIL (= Hardware in the Loop) durchgeführt. Das Regelgerät war damit zwar real vorhanden, aber zusätzlich zur Anlage wurde auch die Wärmepumpe simuliert. Haben sich dadurch Probleme ergeben, die speziell berücksichtigt werden müssten?
4. Das Modell für den Prüfstand (und damit auch das Modell für das Testgerät HIL) wurde durch die gleichen Leute erstellt wie das im modellbasierten PBM-Regler verwendete Modell. Bringt dies dem modellbasierten PBM-Regler unzulässige Vorteile?
5. Ist ein Ranking im Hinblick auf die Beantwortung der Fragen 1 bis 4 sinnvoll möglich, und falls ja, wie lautet das Ranking?

## 4.2 Vorgehen

Zum möglichst objektiven Vergleich der Regler werden die Resultate in Abbildung 24 bis Abbildung 33 in jeweils 5 übereinanderliegenden Diagrammen dargestellt. Zu diesen Diagrammen einige generelle Hinweise.

**Diagramm A in Abbildung 24 bis Abbildung 27:** Synthetischer Aussentemperaturverlauf (Woche 1 Rechteck, Woche 2 Rampen mit überlagertem Sinus)

**Diagramm A in Abbildung 28 bis Abbildung 33:** Realer, gemessener Aussentemperaturverlauf.

**Diagramm B:** Raumtemperaturverlauf.

**Diagramm C:** Heizleistung der Wärmepumpe und in der dritten Woche (ab Abbildung 28) zusätzlich auch der reale, gemessene Solarertrag.

Dem energiekenlinienbasierten PBM-Regler wurden in Kapitel 3 in [2] (Phase 2 des Projekts) Vorgaben über die Energiezufuhr zum Gebäude in Abhängigkeit der Energiekenlinie, der Aussentemperatur, und des gewünschten Niedertarifanteils gemacht. Der **Verlauf der Soll-Energiezufuhr eines idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers** ist eine interessante Vergleichsgrösse zur Beurteilung der Regler. Dabei gilt:

- 24-Stunden-Mittelwert der Aussentemperatur wird als Fenster mitgezogen
- Immer um Mitternacht stimmt die Bilanz des abgeschlossenen Tages

**Diagramm D:** Vergleich der Ist-Energiezufuhr mit der Soll-Energiezufuhr eines idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit einer Vorgabe von 70% Niedertarifanteil. Dabei ist der Tag in drei Abschnitte eingeteilt:

- 00:00 bis 07:00 = Niedertarifzeit =  $\frac{7}{9}$  von 70% der Soll-Tagesenergiezufuhr
- 07:00 bis 22:00 = Hochtarifzeit = 30% der Soll-Tagesenergiezufuhr
- 22:00 bis 24:00 = Niedertarifzeit =  $\frac{2}{9}$  von 70% der Soll-Tagesenergiezufuhr

Das Ziel ist, jeweils am Ende des Abschnitts dessen Sollwert zu erreichen. Dieses Diagramm ist eigentlich zum Vergleich mit den beiden kenlinienbasierten PBM Regler gedacht, aber auch ein Vergleich mit dem modellbasierten PBM-Regler ist aufschlussreich..

**Diagramm E in Abbildung 24 bis Abbildung 27:** Vergleich der Ist-Energiezufuhr mit der Soll-Energiezufuhr eines idealen Reglers mit kontinuierlicher Soll-Energiezufuhr berechnet aus der aktuellen Aussentemperatur (im Gegensatz zu Diagramm D ohne Berücksichtigung der Hoch- und Niedertarifzeiten). Um 24:00 Uhr stimmt die Soll-Tagesenergiezufuhr jeweils mit Diagramm D überein. Dieses Diagramm ist hauptsächlich zum Vergleich mit dem Rücklauftemperaturregler gedacht.

**Diagramm E in Abbildung 28 bis Abbildung 33:** Wie oben, aber unter Berücksichtigung des Solarertrages (die Energiezufuhr kann hier negativ werden). Dieses Diagramm ist nicht allein zum Vergleich mit dem Rücklauftemperaturregler interessant, sondern eigentlich für alle Regler. Der Vergleich zeigt nämlich, wie die Regler auf das Überangebot an Wärme reagieren.

## 4.3 Vergleich

Das Verhalten der einzelnen Regler wird im Folgenden jeweils auf einer Seite beschrieben und in einer Abbildung dargestellt. Die Reihenfolge der Regler ergibt sich aus der logischen Herleitung der Folgerungen.

### 4.3.1 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 1+2

An Tag 1 und Tag 2 folgt die Ist-Energiezufuhr exakt der Soll-Energiezufuhr des idealen energie-kennlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil (Diagramm D). Entsprechend gut wird die Soll-Raumtemperatur von 21°C eingehalten. Nach dem Aussentemperatursprung von 10°C auf 0°C am 3. Tag ist die Ist-Energiezufuhr viel zu klein, und nach dem Aussentemperatursprung von 0°C auf 5°C am 6. Tag ist sie zu gross. Am 6. Tag hätte der Regler die Energiezufuhr spätestens beim Schnittpunkt Soll/Ist stoppen müssen.

Auch in der zweiten Woche (Tage 8 bis 14) ist die Energiezufuhr bei sinkender Aussentemperatur zu klein und bei steigender Aussentemperatur zu hoch. Entsprechend folgt der Fehler der Raumtemperatur mehr oder weniger der Aussentemperatur.

Wenn der reale Regler die Energiezufuhr entsprechend dem idealen energie-kennlinienbasierten PBM-Reglers vorgenommen hätte, wäre die Raumtemperatur wesentlich besser eingehalten worden. Da beide Regler die gleiche Energiekennlinie verwenden, ist kaum eine falsche Einstellung die Ursache des schlechten Abschneidens, sondern es scheint ein Programmierfehler im Regelalgorithmus vorzuliegen.

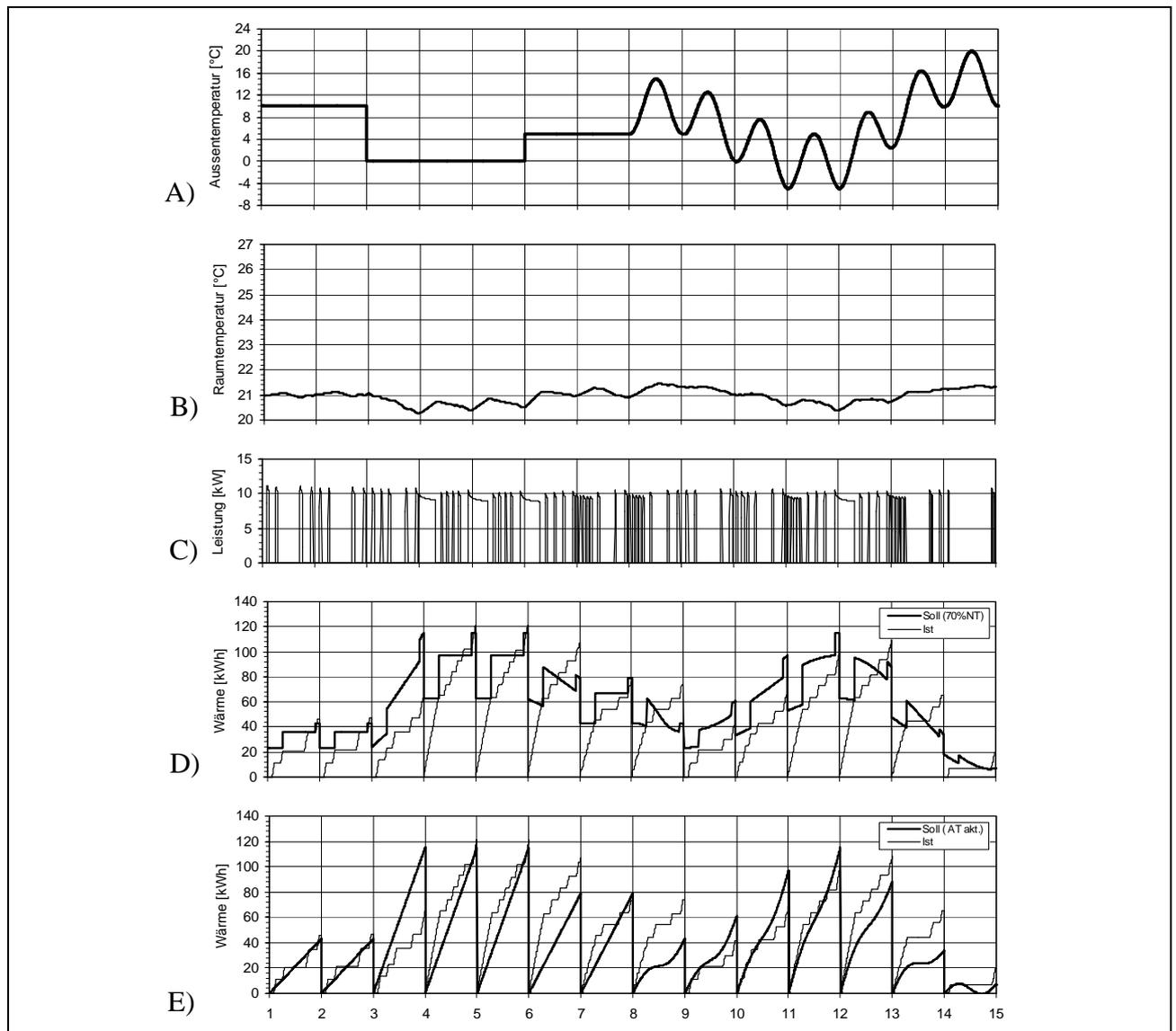


Abbildung 24: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 1+2

### 4.3.2 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens, Woche 1+2

Während der ersten Woche folgt die Ist-Energiezufuhr relativ gut der Soll-Energiezufuhr des idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil (Diagramm D). Entsprechend gut wird die Soll-Raumtemperatur von 21°C eingehalten. Der Anstieg während des Tages ist die Folge der starken Niedertarifnutzung in der Nacht. In der zweiten Woche ist die Energiezufuhr an den Tagen 8, 9, 13 und 14 zu hoch, während sie in der Mitte der Woche etwa richtig ist. Entsprechend läuft die Raumtemperatur in zwei Schritten um mehr als 1 K davon.

Hier muss berücksichtigt werden, dass der laufzeitkennlinienbasierte PBM-Regler weniger Informationen hat als der energiekenlinienbasierte. Insbesondere kennt er die Wärmepumpenkennlinie nicht. Er kann das Verhalten der Wärmepumpe (in Abhängigkeit der Wärmequelle) nur durch eine entsprechende Krümmung der Laufzeitkennlinie berücksichtigen. Eine Verbesserung durch eine optimierte Einstellung scheint hier noch möglich. Ausserdem wird anstelle des 24-Stunden-Mittelwertes eine «gemischte Aussentemperatur» mit einstellbarer Gebäudezeitkonstante verwendet. Dass sich Fehler vor allem im dynamischen Betrieb der zweiten Woche bemerkbar machen, ist ein Hinweis darauf, dass auch hier noch Optimierungsmöglichkeiten vorhanden sind.

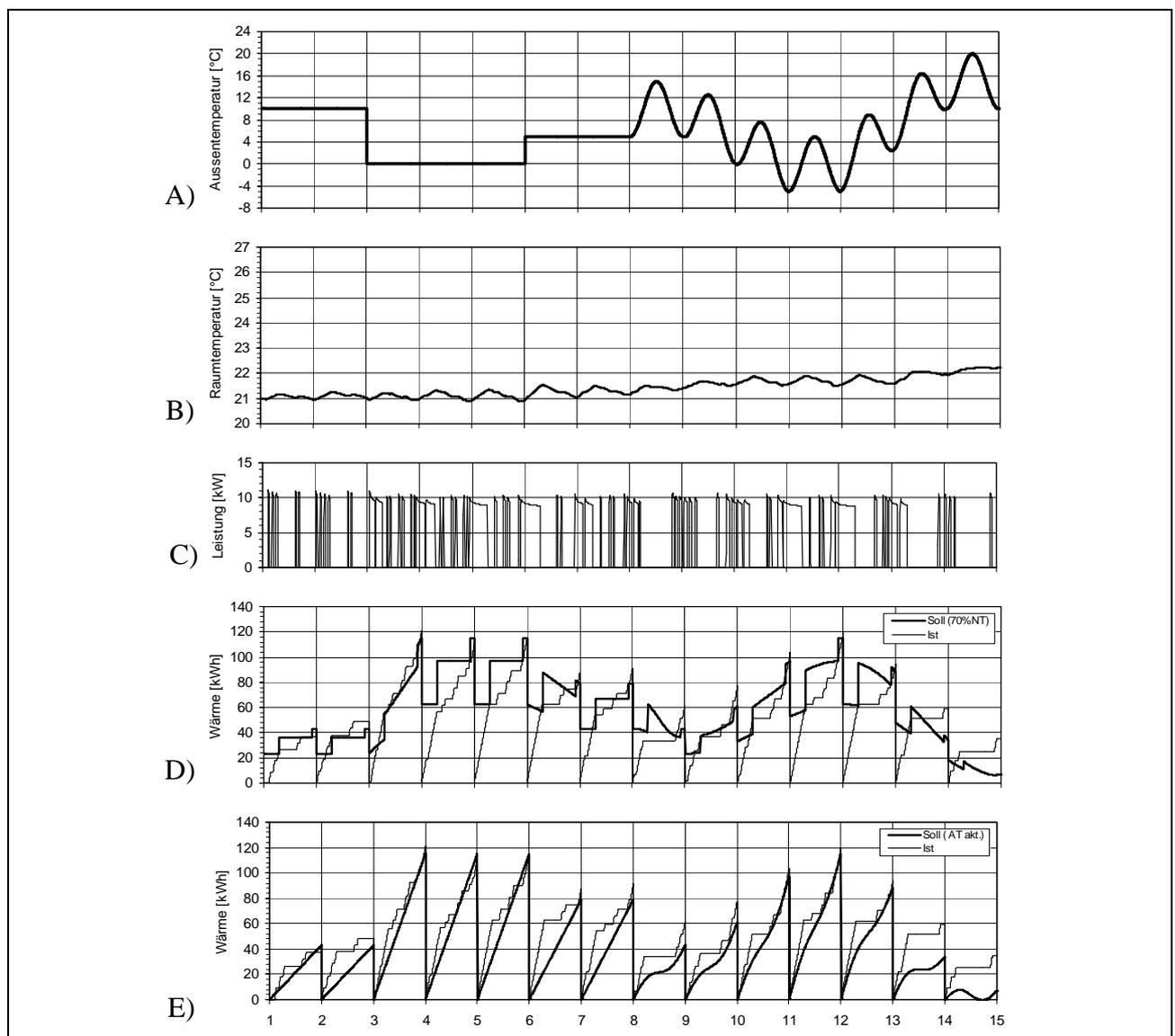


Abbildung 25: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler, Woche 1+2

### 4.3.3 Rücklauftemperaturregler von Satag, Woche 1+2

Besonders interessant ist hier das Verhalten in Diagramm E: Die Ist-Energiezufuhr folgt praktisch perfekt der Soll-Energiezufuhr eines idealen Reglers mit kontinuierlicher Soll-Energiezufuhr berechnet aus der aktuellen Aussentemperatur.

Die Einstellung des Rücklauftemperaturreglers war vor dem Testlauf ausführlich diskutiert worden. Durch eine Absenkphase zwischen 16.00 und 22.00 Uhr (entsprechend einer Raumtemperaturabsenkung um 2 K) sollte der Bedarf in der Niedertarifphase erhöht werden («Aushungermethode»). Resultat:

- Der «Aushunger»-Effekt ist offensichtlich minimal
- Eine stärkere Absenkung hätte zwar den Niedertarifanteil erhöht, aber bei tiefen Aussentemperaturen hätte dann die Wärmepumpenleistung nicht mehr zur Deckung des Wärmebedarfs ausgereicht (generell bedingt jede Absenkung eine entsprechende Überdimensionierung der Wärmepumpe und eine andere Einstellung der Heizkurve)

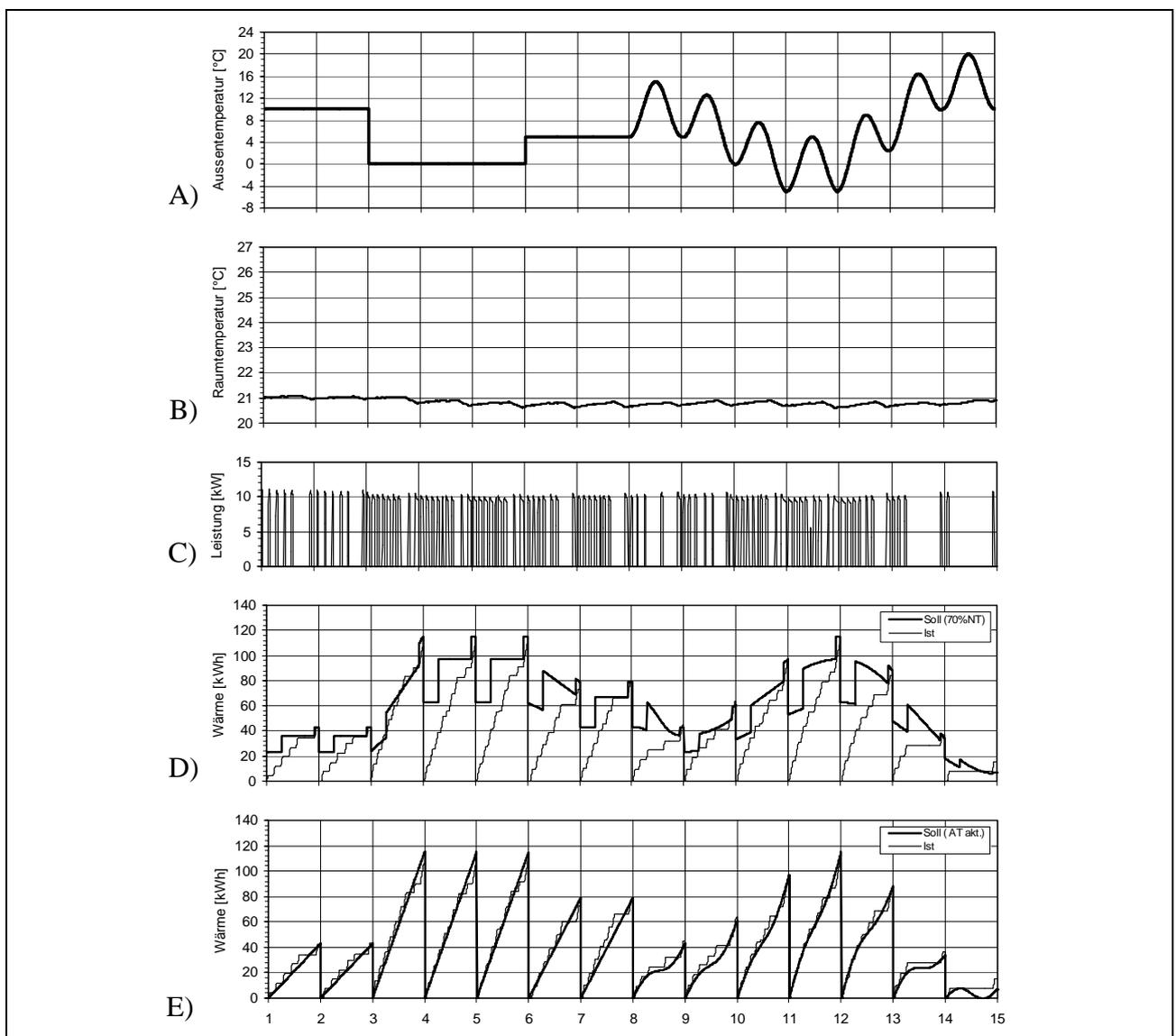


Abbildung 26: Rücklauftemperaturregler von Satag, Woche 1+2

#### 4.3.4 Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 1+2

Hier ist das Verhalten in Diagramm D interessant: Die Ist-Energiezufuhr folgt weitgehend der Soll-Energiezufuhr eines idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil.

Auffallend ist, dass der ideale energiekenlinienbasierte PBM-Regler (Vergleichskurve) am 6., 8., 13. und 14. Tag möglicherweise zuviel Energie zugeführt hätte, weil er den Aussentemperaturanstieg aufgrund des 24-Stunden-Mittelwertes erst zu spät berücksichtigt hätte. Der modellbasierte PBM-Regler registrierte den Aussentemperaturanstieg hingegen ohne Zeitverzögerung und drosselte die Energiezufuhr entsprechend.

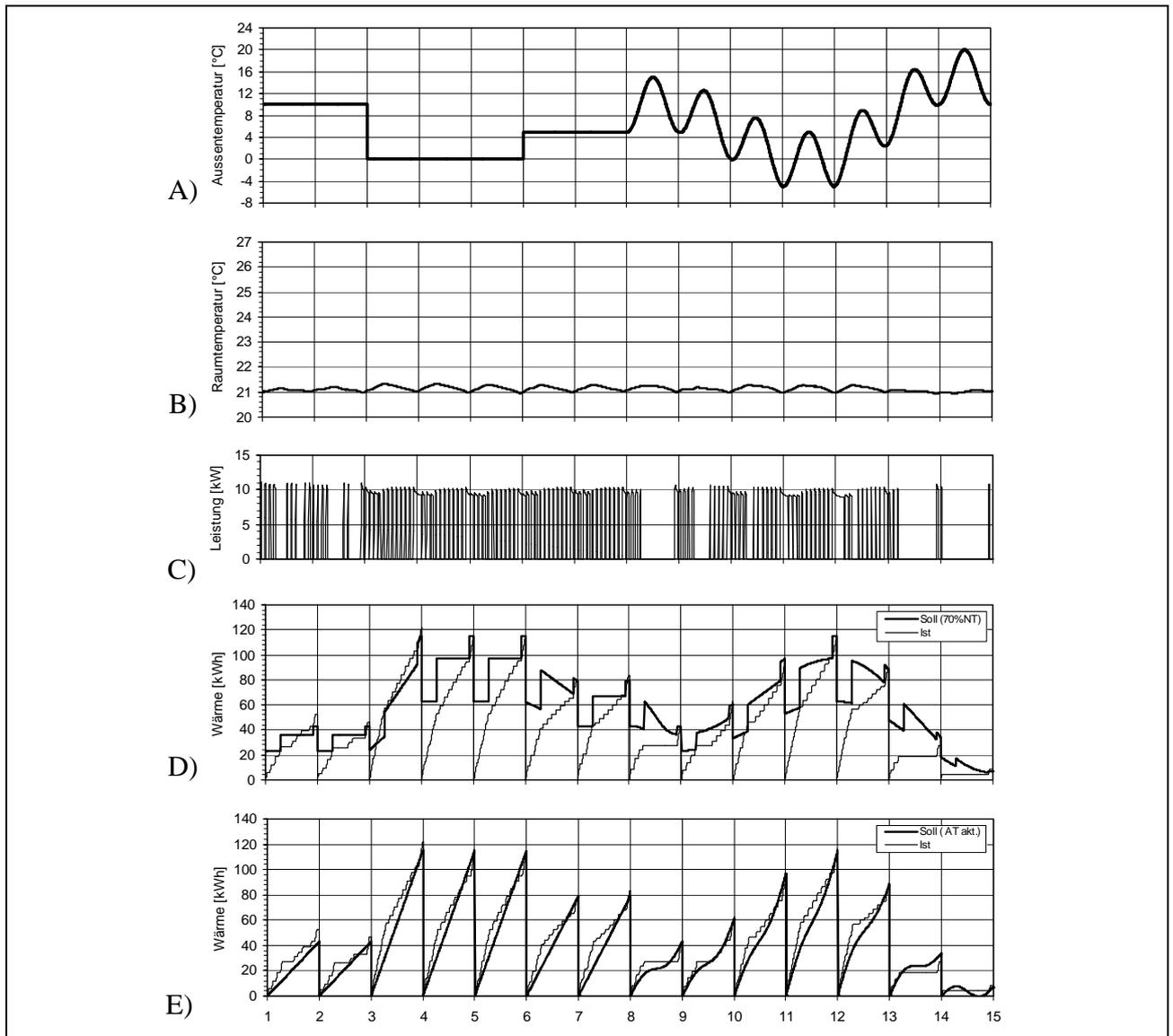


Abbildung 27: Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 1+2

### 4.3.5 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3

Die dritte Testwoche folgt einem realen Aussentemperaturverlauf mit Solarertrag. Der Solarertrag ist zusätzlich in Diagramm C eingetragen. Auch in Diagramm E wird neu der Solarertrag berücksichtigt. Die Energiezufuhr kann damit negativ werden. Da Kühlung nicht möglich ist, kann der Regler im günstigsten Fall mit einer vollständigen Drosselung der Energiezufuhr reagieren und so den Temperaturanstieg wenigstens mindern.

Die Ist-Energiezufuhr des energiekenlinienbasiert PBM-Regler von Satag sollte hier eigentlich der Soll-Energiezufuhr des idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil folgen (Diagramm D). Dies ist, ausser an Tag 16, absolut nicht der Fall. Wie bereits im Testbetrieb der ersten beiden Wochen festgestellt wurde, liegt offensichtlich ein Programmierungsfehler vor. Auffallend ist das starke Takten des Reglers zu Beginn von Tag 15.

Dass der energiekenlinienbasiert PBM-Regler Solarerträge regelungstechnisch nicht erfassen kann, sondern nur pauschal durch entsprechend tiefere Einstellung der Kennlinie, ist durch das Regelkonzept vorgegeben. Wie stark die Auswirkungen sind, kann leider nicht diskutiert werden, da das Reglerverhalten zu konfus ist.

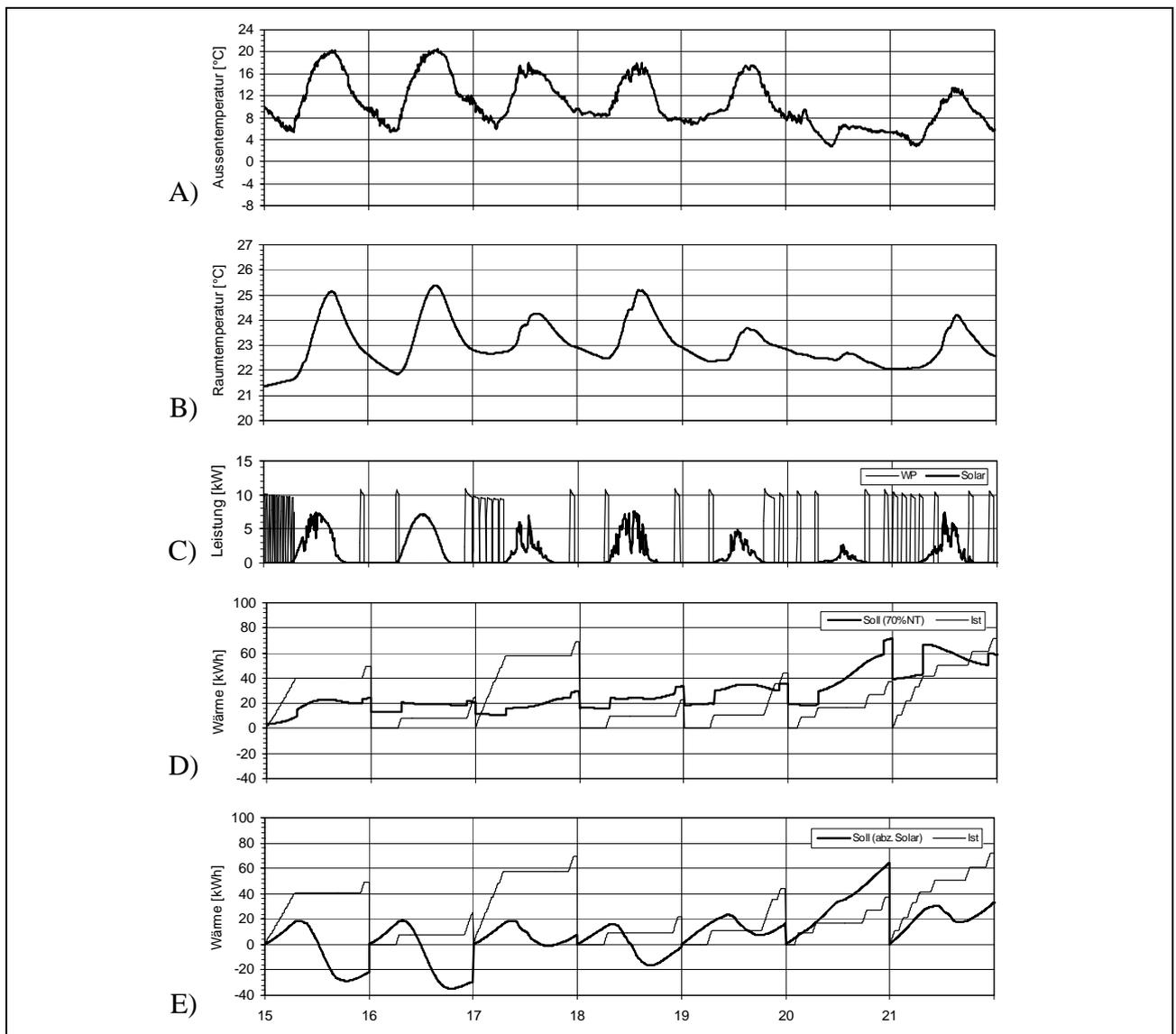


Abbildung 28: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3

### 4.3.6 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens, Woche 3

Die Ist-Energiezufuhr ist gegenüber der Soll-Energiezufuhr des idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil, mit Ausnahme der letzten beiden Tage, jeweils deutlich zu hoch (Diagramm D). Als Folge davon steigt jeweils die minimale Raumtemperatur am Morgen von 22°C bis auf 23,5°C an. Hier ist es offensichtlich so, dass die Laufzeitkennlinie um einiges tiefer hätte eingestellt werden können.

Auffallend ist die eindeutig viel zu hohe Produktion in der Niedertarifzeit, vor allem bei tiefen Nachttemperaturen. Der Regler reagiert offensichtlich zu stark auf die kurzzeitig tiefen Nachttemperaturen. Dies scheint wiederum ein Problem mit der Gebäudezeitkonstanten der «gemischten Aussentemperatur» zu sein, die anstelle des 24-Stunden-Mittelwertes verwendet wird.

Auch hier ist durch das Regelkonzept vorgegeben, dass der laufzeitkennlinienbasiert PBM-Regler Solarerträge regelungstechnisch nicht erfassen kann, sondern, dass er diese nur pauschal durch entsprechend tiefere Einstellung der Kennlinie teilweise kompensieren kann. Um gültige Aussagen darüber zu bekommen, müsste ein Test mit längeren Schönwetter- und Schlechtwetterperioden erfolgen.

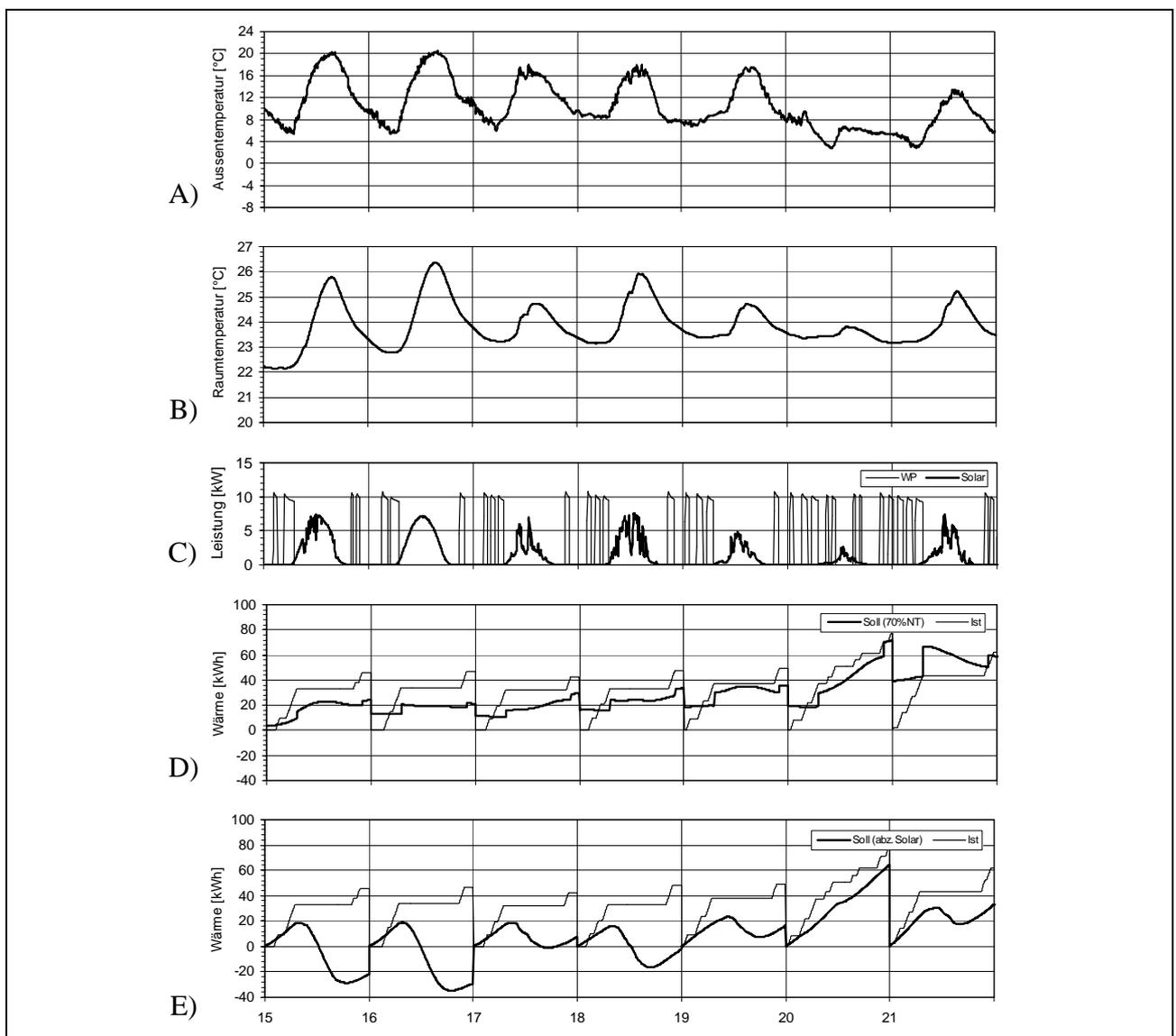


Abbildung 29: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens, Woche 3

### 4.3.7 Rücklauftemperaturregler von Satag, Woche 3

Der Rücklauftemperaturregler schneidet gegenüber den beiden kennlinienbasierten PBM-Reglern viel besser ab. Die Ist-Energiezufuhr ist gegenüber der Soll-Energiezufuhr des idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil meistens tiefer (Diagramm D). Wenn man das Diagramm E betrachtet, fällt auf, dass nur geringfügig mehr Energie zugeführt wird als der Soll-Energiebedarf des idealen Reglers unter Berücksichtigung der Solarerträge verlangt.

Obwohl dieser Regler die Solarerträge auch nicht erfassen kann, scheint er irgendwie zu erkennen, dass die Raumtemperatur immer um mindestens 1 K zu hoch ist. Infolge dieses Verhaltens kann er die Raumtemperatur viel besser einhalten als die beiden kennlinienbasierten PBM-Regler.

Wie ist dieses Erkennen der zu hohen Raumtemperatur möglich?

Bevor wir darauf zurückkommen, schauen wir uns doch zuerst einmal den modellbasierten PBM-Regler an.

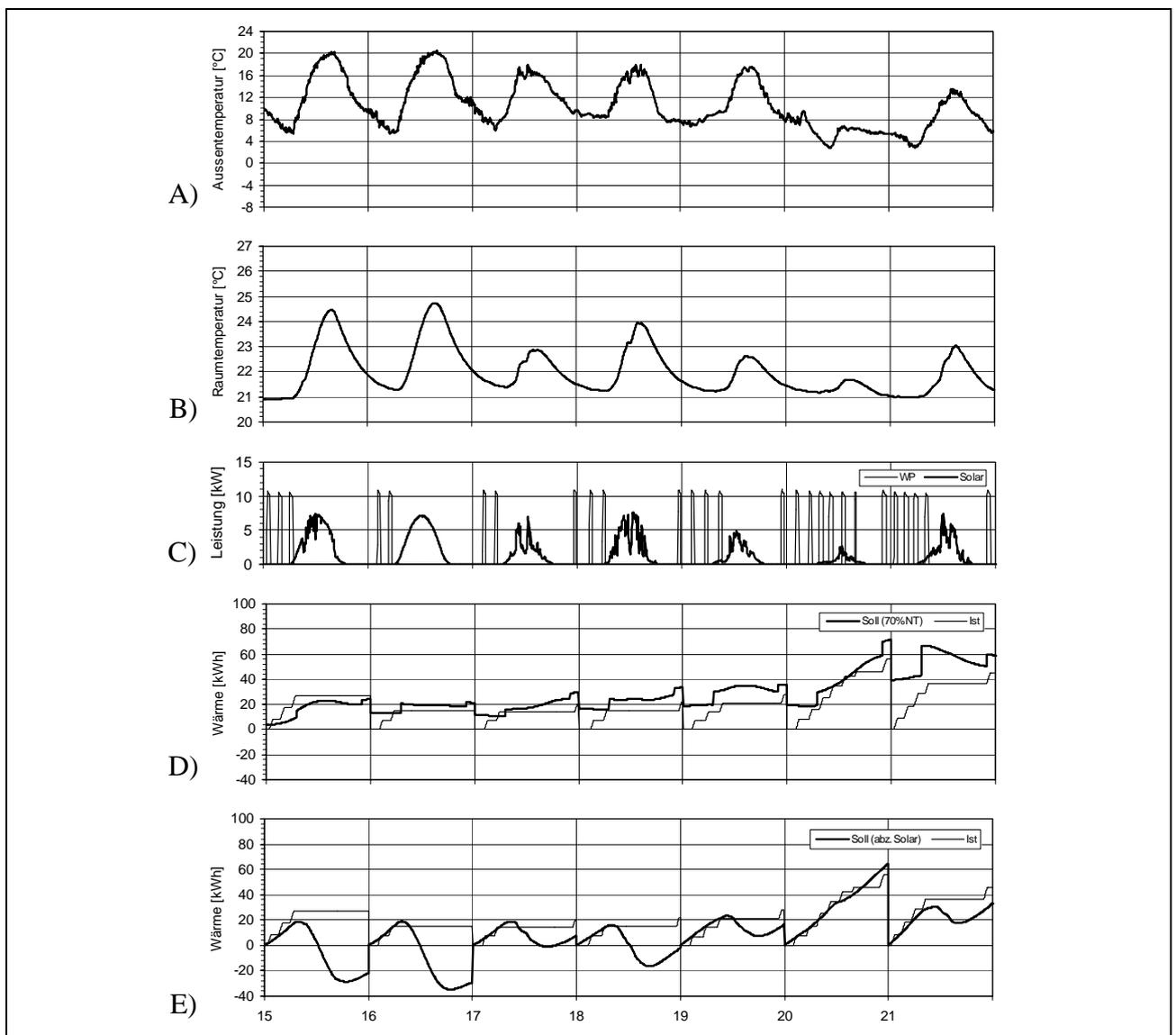


Abbildung 30: Rücklauftemperaturregler von Satag, Woche 3

### 4.3.8 Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3

Auf den ersten Blick ergibt sich beim modellbasierten PBM-Regler das gleiche Bild wie beim Rücklauf temperaturregler: Die Ist-Energiezufuhr ist gegenüber der Soll-Energiezufuhr des idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers mit 70% Niedertarifanteil meistens tiefer (Diagramm D). Und wenn man Diagramm E betrachtet, fällt zusätzlich auf, dass hier noch deutlich weniger Energie zugeführt wird als der Soll-Energiebedarf des idealen Reglers unter Berücksichtigung der Solarerträge verlangen würde. An den Tagen 16 und 17 ist das vorausschauende Verhalten geradezu perfekt.

Deshalb nochmals die Frage: Wie ist das möglich? Grundsätzlich macht der modellbasierte PBM-Regler eine Vorhersage aufgrund des Vortages und zusätzlich verfügt der Regler über einen Beobachter, der via Rücklauf temperatur Informationen über die Raumtemperatur erhält. Der modellbasierte PBM-Regler könnte also grundsätzlich das Wissen für eine derart gute Regelung haben. Sind aber die real verfügbaren Messgrößen wirklich so gut, dass diese perfekte Regelung auch tatsächlich möglich ist?

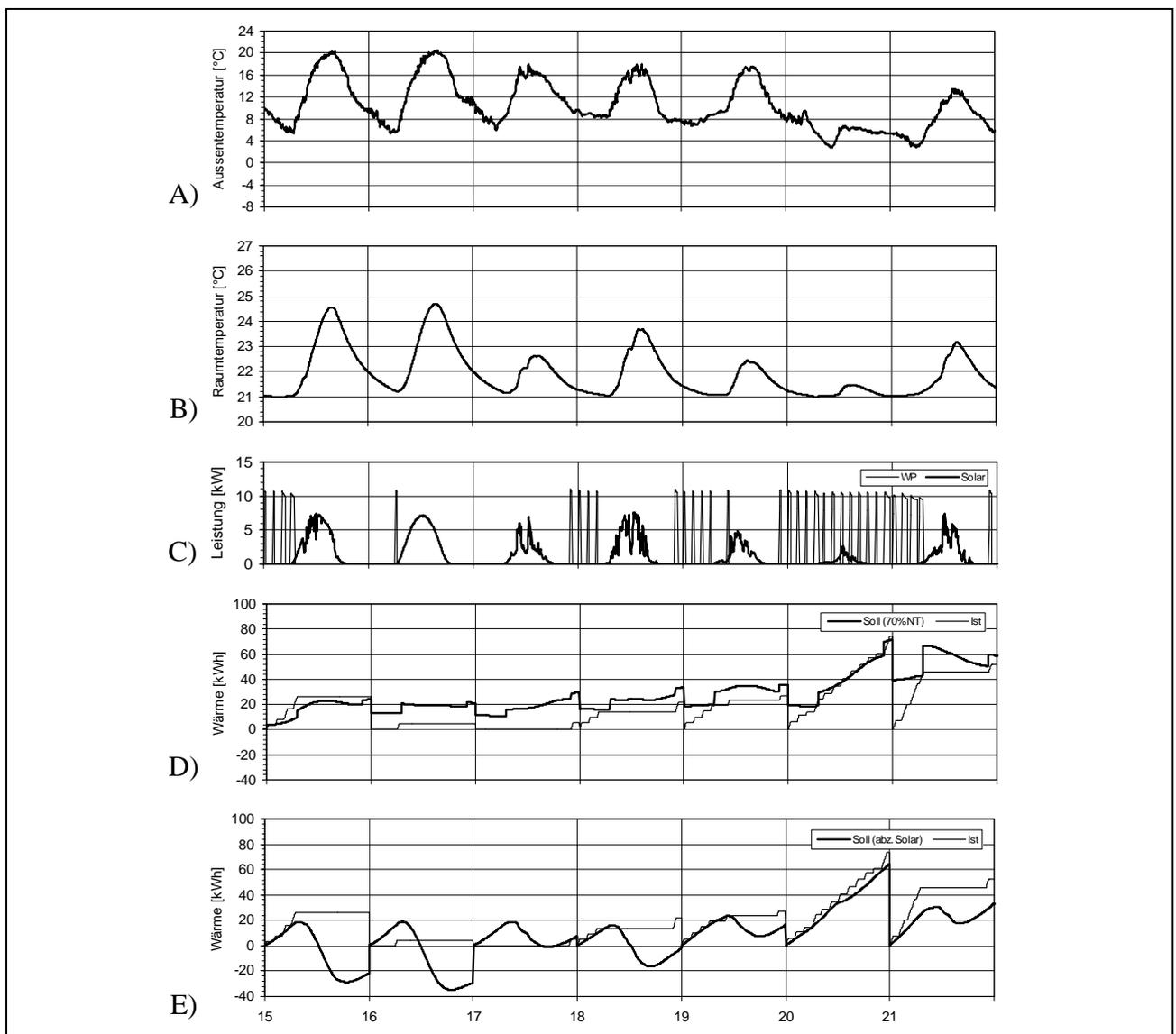


Abbildung 31: Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3

### 4.3.9 Woher kommen die exakten Informationen über die Raumtemperatur?

Sowohl der Rücklaufftemperaturregler wie der modellbasierte PBM-Regler verfügen offensichtlich gegenüber den beiden kennlinienbasierten PBM-Reglern über zusätzliches Wissen, was die wesentlich bessere Regelung ergibt – der modellbasierte PBM-Regler noch ausgeprägter als der Rücklaufftemperaturregler.

Sowohl der Rücklaufftemperaturregler wie der modellbasierte PBM-Regler verfügen gegenüber den beiden kennlinienbasierten PBM-Reglern zusätzlich über die Messgröße der Rücklaufftemperatur. Wir sollten also diese Messgröße in unsere Überlegungen mit einbeziehen.

Abbildung 32 ist identisch mit Abbildung 31, bis auf die zusätzlich eingetragene Rücklaufftemperatur in Diagramm B. Sofort ist ersichtlich, dass die Rücklaufftemperatur bei ausgeschalteter Wärmepumpe exakt der Raumtemperatur folgt, lediglich mit einer Zeitverzögerung von etwa einer Stunde. Durch diese direkte Koppelung der Rücklaufftemperatur an die Raumtemperatur ist das perfekte Verhalten des modellbasierten Reglers erklärbar. Der Raumtemperatur-Beobachter erkennt, dass die Raumtemperatur ab dem 16. Tag immer zu hoch ist und drosselt deshalb die Energiezufuhr. Gibt es diese Koppelung der Rücklaufftemperatur an die Raumtemperatur auch bei der realen Anlage?

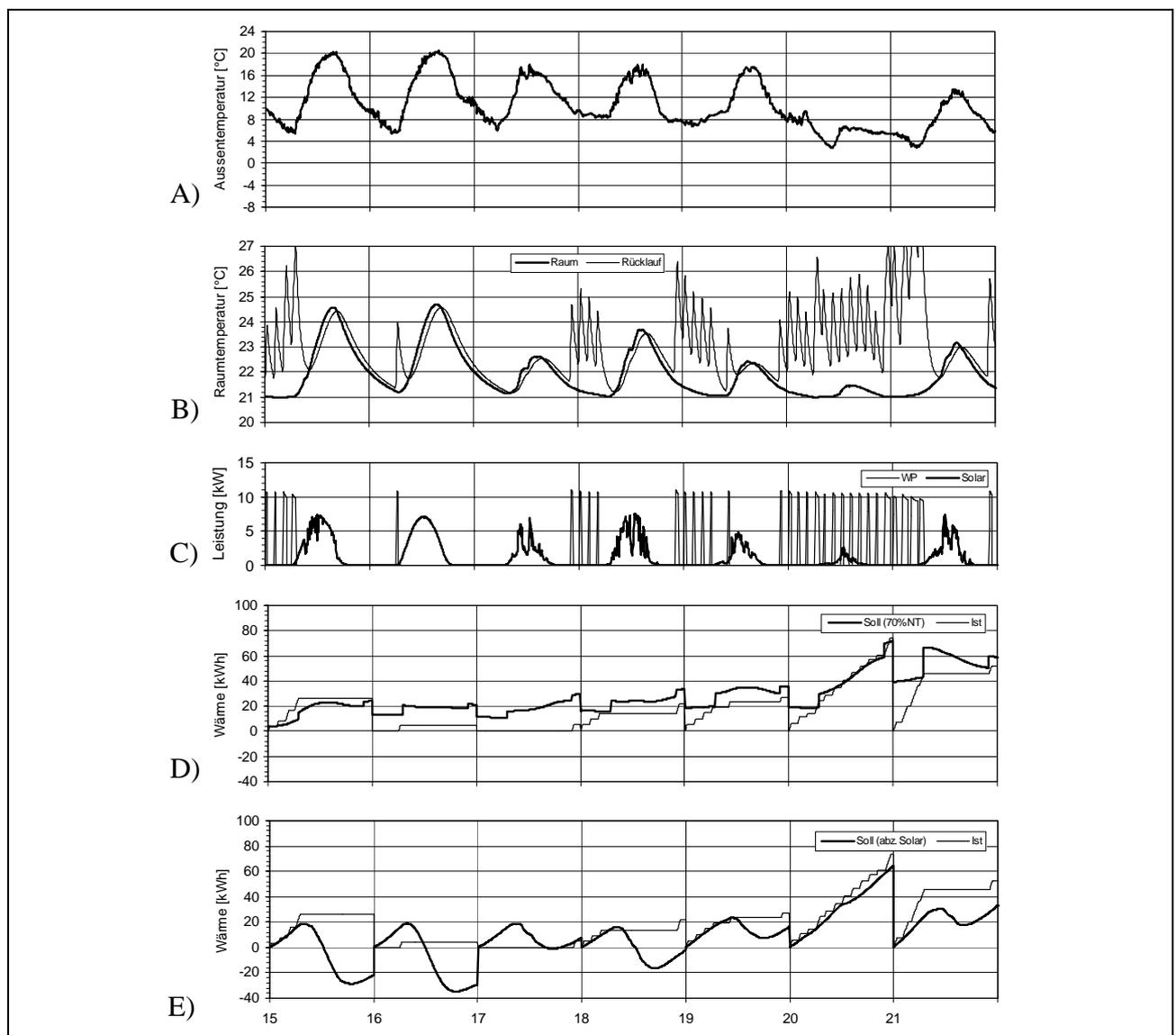


Abbildung 32: Modellbasierter PBM-Regler von Satag, Woche 3

### 4.3.10 ... und wie verhält es sich beim Rücklauftemperaturregler?

Der Rücklauftemperaturregler verfügt im Gegensatz zum modellbasierten PBM-Regler über keinen Raumtemperatur-Beobachter. Aber auch der Rücklauftemperaturregler scheint irgendwie die zu hohe Raumtemperatur zu erkennen. Deshalb auch hier nochmals Abbildung 30 mit zusätzlich eingetragener Rücklauftemperatur in Diagramm B (Abbildung 33).

Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 32: Die Rücklauftemperatur folgt der Raumtemperatur mit einer Zeitverzögerung von etwa einer Stunde, solange die Wärmepumpe nicht arbeitet. Offensichtlich ist der Rücklauftemperaturverlauf so hoch, dass der Einschaltpunkt der Rücklauf-temperatur-Heizkurve häufig nicht erreicht wird und so die Energiezufuhr gedrosselt wird.

Dass ein Rücklauftemperaturregler – wie im vorliegenden Fall – praktisch zum Raumtemperaturregler mutiert, ist allerdings nur bei einer sehr tief und sehr flach eingestellten Rücklauf-temperatur-Heizkurve denkbar. Eine derart tiefe Heizkurve ist heute eigentlich nur bei sogenannten «Thermo-aktiven Bauelementen (TAB's)» möglich.

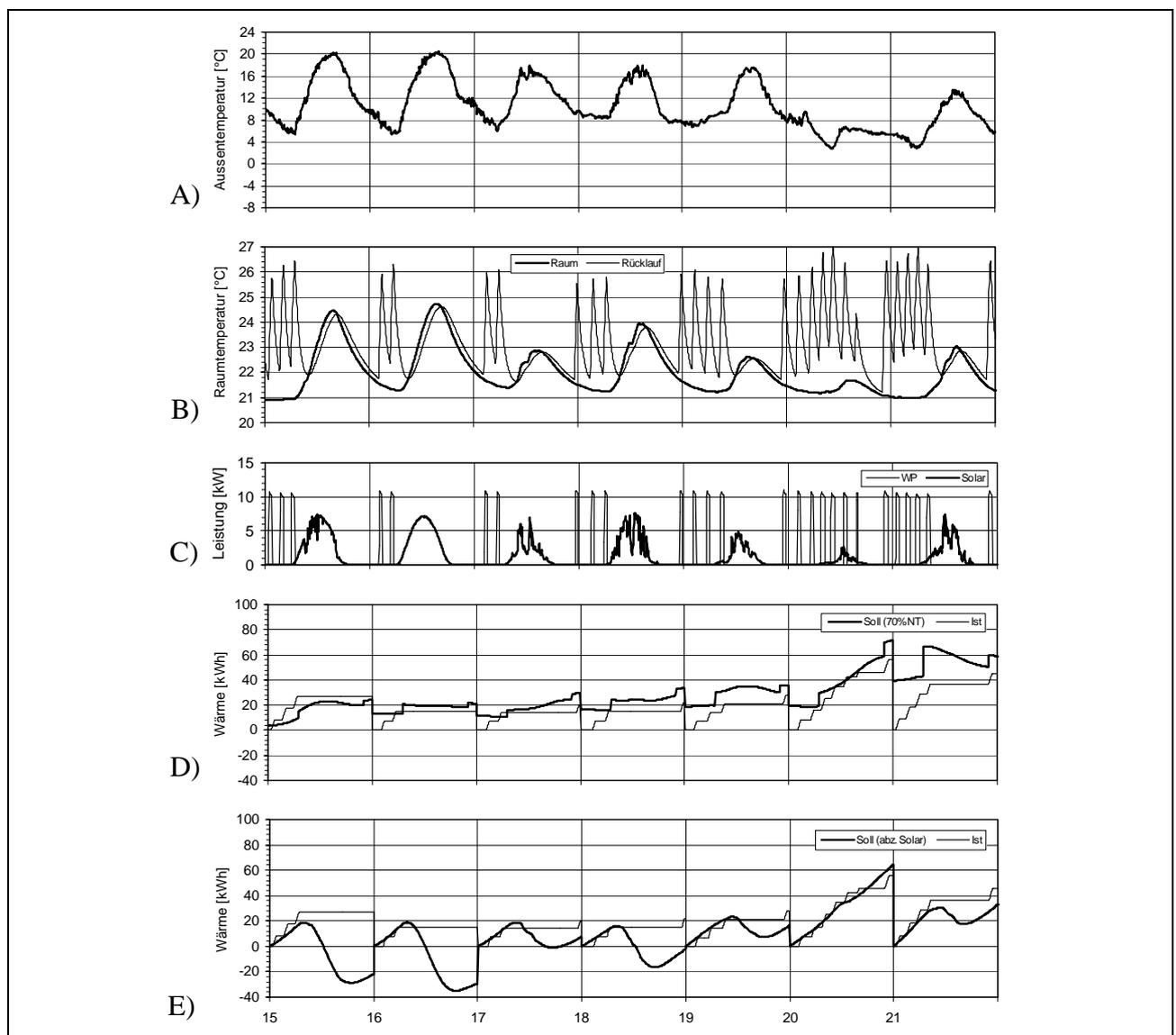


Abbildung 33: Rücklauftemperaturregler von Satag, Woche 3

#### 4.3.11 Folgt die Rücklauftemperatur wirklich so perfekt der Raumtemperatur?

Die guten Resultate des Rücklauftemperaturreglers und des modellbasierten Reglers sind nur dann haltbar, wenn die Rücklauftemperatur tatsächlich der Raumtemperatur entsprechend Diagramm B in Abbildung 32 und Abbildung 33 folgt.

Als Vergleich sind in Abbildung 34 die Messwerte einer Woche mit ähnlichem Aussentemperaturverlauf (Diagramm F) aus der Referenzanlage «Winterthur-Seen» für den Betrieb mit 67% Heizkörperheizung und 33% Fussbodenheizung dargestellt (Näheres über die Referenzanlage siehe [2]). Die Regelung an dieser realen Anlage erfolgte mit dem gleichen modellbasierten PBM-Regler wie bei der Simulation.

Diese Anlage – allerdings mit 33% Heizkörperheizung (HKH) und 67% Fussbodenheizung (FBH) – diente als reales Vorbild für die Simulation. Die beiden Rücklauftemperaturen der Heizkörperheizung und Fussbodenheizung ergeben zusammen die Wärmepumpeneintrittstemperatur (Diagramm G), die mit der simulierten Rücklauftemperatur der Testläufe zu vergleichen ist. Einen Vergleich der Wärmepumpeneintrittstemperatur mit den beiden Raumtemperaturen der Referenzanlage zeigt Diagramm H (das Wohnzimmer (Whz.) hat wesentlich mehr Solarertrag als das Büro).

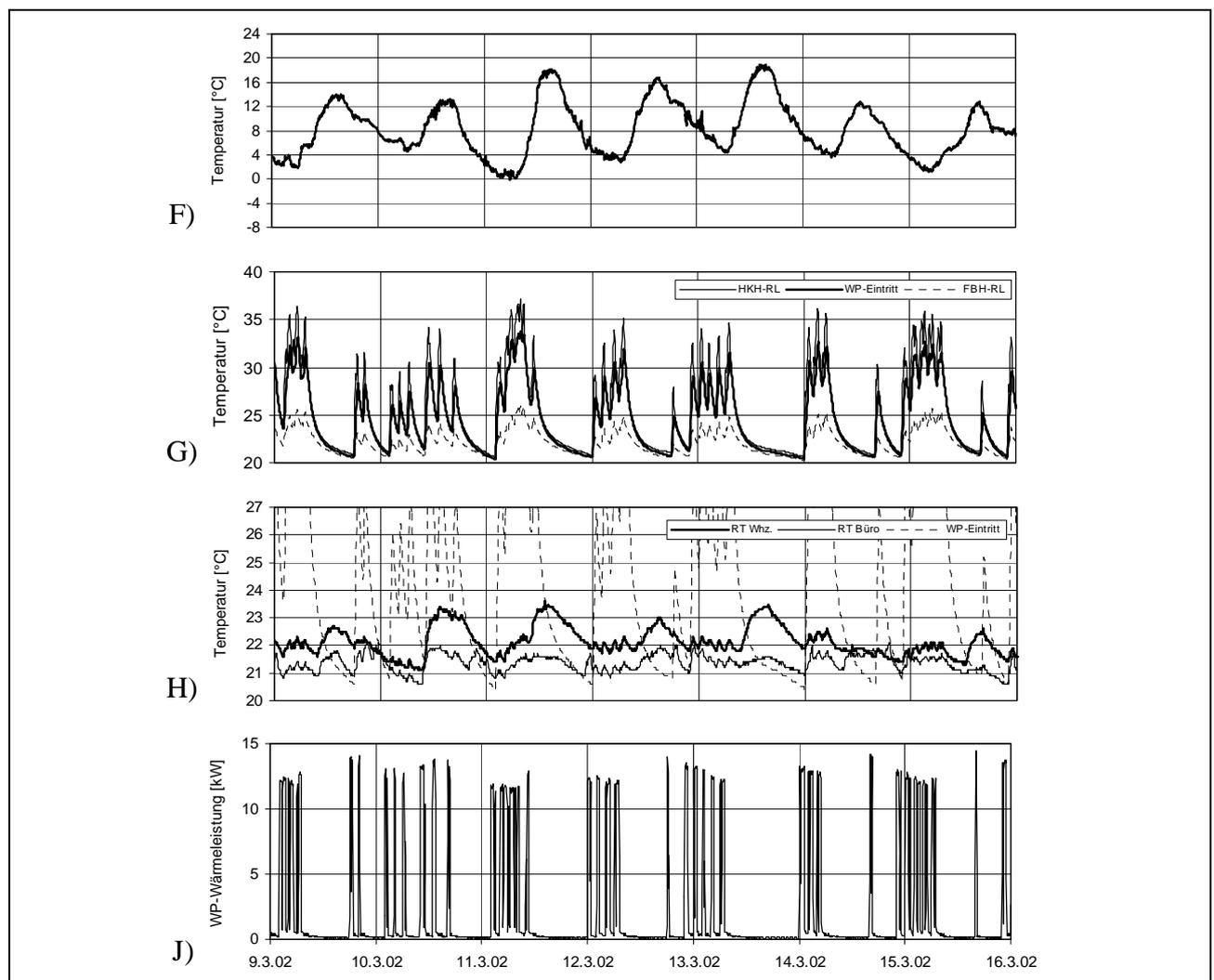


Abbildung 34: Messungen mit dem modellbasierten PBM-Regler an der Referenzanlage «Winterthur-Seen» mit 67% Heizkörperheizung und 33% Fussbodenheizung (Phase 2, siehe [2])

Alle Rücklaufemperaturen – sowohl Heizkörper- und Fussbodenheizung wie die Mischung der beiden – sinken nach dem Abschalten der Wärmepumpe stur entsprechend einer e-Funktion ab. Das reale Verhalten der Rücklaufemperaturen stimmt also absolut nicht mit dem simulierten Verhalten in den Tests überein (Diagramm B in Abbildung 32 und Abbildung 33).

Ein Folgen der Rücklaufemperatur auf die Raumtemperatur ist absolut nicht feststellbar. Durch diese «falsche» Modellierung der Rücklaufemperatur für die Emulation (Simulation der «fiktiven Realität») wurden der modellbasierte PBM-Regler und der Rücklaufemperaturregler bevorzugt!

Abbildung 34 zeigt auch deutlich, dass der gleiche modellbasierte PBM-Regler in der realen Anlage – die als Vorbild für die Simulation diente – das perfekte und vorausschauende Regelverhalten der HIL-Testserie in Abbildung 32 nicht aufweist. Der Heizkörperanteil an der realen Anlage (67%) war grösser als derjenige bei der simulierten Anlage (33%). An der realen Anlage waren also die Voraussetzungen für eine enge Koppelung der Rücklaufemperatur an die Raumtemperatur noch günstiger als bei der Simulation.

#### 4.4 Antworten auf Fragestellung

**Frage 1:** *Wie gut wurden die Vorgaben der energiekenlinienbasierten PBM (siehe Kapitel 3 in [2]) im energiekenlinienbasierten PBM-Regler von Satag und im laufzeitkenlinienbasierten PBM-Regler von Siemens umgesetzt?*

Beim energiekenlinienbasierten Regler von Satag scheint ein Programmierfehler vorzuliegen. Wenn der reale Regler die Energiezufuhr entsprechend dem vorgeschlagenen Regler vorgenommen hätte, wäre die Raumtemperatur wesentlich besser eingehalten worden. Darauf deutet der Vergleich der Energiezufuhr des realen Reglers mit der Energiezufuhr eines idealen energiekenlinienbasierten PBM-Reglers hin.

Der laufzeitkenlinienbasierte PBM-Regler wurde nach einer wesentlich einfacheren Regelstrategie umgesetzt als der vorgeschlagene energiekenlinienbasierte. Eine Verbesserung durch eine optimierte Einstellung der Laufzeitkenlinie scheint hier noch möglich. Ausserdem sind sicher noch Optimierungsmöglichkeiten vorhanden, wenn die «gemischte Aussentemperatur» besser dem vorgeschlagenen 24-Stunden-Mittelwert angeglichen würde.

**Frage 2:** *Wie gut wurden die Vorgaben der modellbasierten PBM (siehe Kapitel 6 in [2]) im modellbasierten PBM-Regler von Satag umgesetzt?*

Da der von der ETH geschriebene Regelalgorithmus direkt im modellbasierten Regler implementiert wurde, war Gewähr gegeben, dass der vorgeschlagene Regler exakt umgesetzt wurde.

**Frage 3:** *Da die Prüfstandsregelung noch nicht bereit war, wurden die Probeläufe mit dem Testgerät HIL (= Hardware in the Loop) durchgeführt. Das Regelgerät war damit zwar real vorhanden, aber zusätzlich zur Anlage wurde auch die Wärmepumpe simuliert. Haben sich dadurch Probleme ergeben, die speziell berücksichtigt werden müssten?*

Bei der Simulation der Wärmepumpe haben sich keine speziellen auf das HIL-Testgerät zurückzuführenden Probleme ergeben. Das Hauptproblem der Testläufe war die Tatsache, dass der modellbasierte PBM-Regler und der Rücklaufregler durch eine «falsche» Modellierung der Rücklaufemperatur bevorzugt wurden. Dieses Problem hätte sich genauso ergeben, wenn die Prüfstandsregelung bereits bereit gewesen wäre.

**Frage 4:** *Das Modell für den Prüfstand (und damit auch das Modell für das Testgerät HIL) wurde durch die gleichen Leute erstellt wie das im modellbasierten PBM-Regler verwendete Modell. Bringt dies dem modellbasierten PBM-Regler unzulässige Vorteile?*

Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass das gleiche Modell bei der simulierten Anlage und beim Regelalgorithmus die perfekte Regelung ergeben müssten. Daher hat die ETHZ im Regler bewusst eine andere Modellstruktur verwendet als in der Simulation (vgl. Kapitel 3.4). Es ist jedoch zutreffend, je besser das Modell die Realität abbildet, desto grösser ist der Vorteil bei der Regelung. Dies dürfte allerdings nicht als unzulässiger Vorteil deklariert werden!

**Frage 5:** *Ist ein Ranking im Hinblick auf die Beantwortung der Fragen 1 bis 4 sinnvoll möglich, und falls ja, wie lautet das Ranking?*

Um es gleich vorwegzunehmen: Ein objektives Ranking ist nicht möglich. Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:

■ **Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag:** Konfuses Regelverhalten infolge Programmierfehler. In Kapitel 3 in [2] wurde zur Diskussion der Resultate ein idealer energiekennlinienbasierter PBM-Regler vorgegeben. Erstaunlich ist, dass dieser ideale Regler ein sehr gutes Regelverhalten ergeben würde, wenn man sein Regelverhalten beispielsweise mit demjenigen des modellbasierten PBM-Reglers vergleicht. Somit hätte der reale energiekennlinienbasierte PBM-Regler eigentlich ein ähnlich gutes Regelverhalten erreichen sollen, wie der ideale Regler. Bezüglich Niedertarifanteil schnitt der energiekennlinienbasierte PBM-Regler von Satag sehr gut ab.

■ **Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens:** Mässiges Regelverhalten, aber mit optimierter Einstellung der Laufzeitkennlinie und der sogenannten «gemischten Aussentemperatur» wäre ein wesentlich besseres Einhalten der Raumtemperatur und damit ein tieferer Heizenergieverbrauch möglich gewesen. Bezüglich Niedertarifanteil schnitt er sehr gut ab.

■ **Rücklauftemperaturregler von Satag:** Gutes Regelverhalten und damit tiefer Heizenergieverbrauch, aber leider wurde der Regler durch eine falsche Modellierung der Rücklauftemperatur in Verbindung mit einer unrealistisch tiefen Heizkurve unzulässig bevorzugt. Bezüglich Niedertarifanteil schnitt er eindeutig am schlechtesten ab.

■ **Modellbasierter PBM-Regler von Satag:** Gutes Regelverhalten und damit tiefer Heizenergieverbrauch, aber leider wurde der Regler durch eine falsche Modellierung der Rücklauftemperatur unzulässig bevorzugt. Bezüglich Niedertarifanteil schnitt er sehr gut ab.

■ Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass ein wichtiger Punkt nicht getestet wurde, nämlich das **Verhalten der Regler im Dauerbetrieb bei tiefer Aussentemperatur**. Hier wäre folgendes Verhalten zu erwarten gewesen:

- Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag: Der Regler könnte im Dauerbetrieb bei tiefer Aussentemperatur problemlos ohne Überdimensionierung betrieben werden
- Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens: Der Regler könnte im Dauerbetrieb bei tiefer Aussentemperatur problemlos ohne Überdimensionierung betrieben werden
- Rücklauftemperaturregler von Satag: Abhängig von der Absenkung («Aushungermethode») würde die Wärmepumpenleistung ab einer bestimmten Aussentemperatur nicht mehr genügen; d. h. die Wärmepumpe müsste entsprechend überdimensioniert werden oder Zeitprogramm und Heizkurve müssten bei tiefen Aussentemperaturen von Hand angepasst werden.
- Modellbasierter PBM-Regler von Satag: Trotz Periodendauer von 2 Stunden und minimaler Pauselänge von 10 Minuten würde der Regler den Kompressor der Wärmepumpe ohne Pause durchlaufen lassen, falls die geforderte Pulslänge für die Heizung länger als zwei Stunden würde (genauer: 1 Stunde 50 Minuten!).

■ Sehr lange Laufzeiten könnten bei Erdsondenanlagen einen negativen Einfluss auf den Nutzungsgrad haben. Dieses Thema wurde noch nicht eingehend untersucht. Eine Optimierung in Bezug auf Pulslänge und Pulspause wäre jedoch bei allen drei PBM-Reglern problemlos realisierbar.

# 5 Zusammenarbeit

## 5.1 Nationale Zusammenarbeit

Die beiden Industriepartnern aus der Phase 2 des Projekts, Satag Thermotechnik AG und Siemens Building Technologies (Europe) AG, waren auch in der vorliegenden Phase 3 in der Projektgruppe und haben eng mit uns zusammengearbeitet. Wir möchten uns an dieser Stelle bei beiden Firmen für ihr Interesse und ihre wertvolle Zusammenarbeit bedanken.

Am 25. Juni dieses Jahres fand die 10. UAW-Tagung in Burgdorf statt. Hier präsentierte E. Shafai hauptsächlich die Resultate aus der Phase 2 (vgl. [3]).

## 5.2 Internationale Zusammenarbeit

Siehe das entsprechende Kapitel in [2].

# 6 Ausblick

Nachfolgend sind die wichtigsten Schwerpunkte für eine allfällige Fortsetzung des Projekts im Rahmen der Phase 4 zusammengestellt:

- Besseres Simulationsmodell für die Gebäudeemulation mit Carnot-Blockset. Implementation von weiteren Hydraulikschaltungen, die in [8] als Standardschaltungen definiert sind.
- Validierung des Erdsondenmodells mit Messdaten.
- Ranking der Reglervarianten am dynamischen Wärmepumpenprüfstand, nachdem nun sowohl die Gebäude- als auch die Sondenemulation am Prüfstand möglich sind.
- Weiterentwicklung der PBM-Regler:
  - Einbezug der Warmwasseraufbereitung
  - Raumtemperatur- und Sonnenintensitätsaufschaltung
  - Erweiterung des modellbasierten PBM-Reglers zu einem adaptiven Regler.  
Das setzt eine On-line-Identifikation der Parameter des Hausmodells voraus.
- Entwicklung eines Reglergeräts mit Anbindungsmöglichkeit an Wetterdaten der MeteoSchweiz und bessere Benutzeroberfläche für die Reglereinstellung, Auswertung und Darstellung diverser Signalverläufe (inkl. Prädiktion).
- Erprobung an einem realen Objekt (Herbst 2005).
- Solareinbindung (Sonnenkollektoren für Heizung und Warmwasseraufbereitung).

# 7 Symbolliste

## 7.1 Allgemeine Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
------------------	---------------------

BW 108.1:	Sole/Wasser-Testwärmepumpe, mit der die Regler geprüft werden.
-----------	--

EWS:	Erdwärmesonde.
------	----------------

HIL:	Hardware in the loop.
------	-----------------------

HS:	Heisser Soletank.
-----	-------------------

HW:	Heisser Wassertank.
-----	---------------------

HWP:	Hilfswärmepumpe für die Regelung des dynamischen Prüfstands.
------	--

KS:	Kalter Soletank.
-----	------------------

KW:	Kalter Wassertank.
-----	--------------------

PBM:	Pulsbreitenmodulation.
------	------------------------

WT1:	Wärmetauscher für die Kopplung zwischen kaltem Medium und heissem Wassertank.
------	---

WT2:	Wärmetauscher für die Kopplung zwischen kaltem Medium und kaltem Wassertank.
------	--

WT3:	Wärmetauscher für die Kopplung zwischen heissem Soletank und kaltem Wassertank.
------	---

WT4:	Wärmetauscher für die Kopplung zwischen heissem Medium und heissem Soletank.
------	--

WT5:	Wärmetauscher für die Kopplung zwischen heissem Medium und kaltem Soletank.
------	---

## 7.2 Symbole zum Kapitel 2.1 und 2.2 (Prüfstand)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\dot{Q}_{\text{HWP,S}}$	Ist-Wärmestrom am Eingang der Hilfswärmepumpe (Soleseite).	[W]
$\dot{Q}_{\text{HWP,W}}$	Ist-Wärmestrom am Ausgang der Hilfswärmepumpe (Wasserseite)	[W]
$\dot{Q}_{\text{HWP,soll}}$	Soll-Wärmestrom für die Hilfswärmepumpe.	[W]
$\dot{Q}_{\text{RL,HS}}, \dot{Q}_{\text{RL,KS}}$	Störwärmestrom von den entsprechenden Soletanks in die Testwärmepumpe.	[W]
$\dot{Q}_{\text{RL,HW}}, \dot{Q}_{\text{RL,KW}}$	Störwärmestrom von der Testwärmepumpe in die entsprechenden Wassertanks.	[W]
$\dot{Q}_{\text{WT1}} \dots \dot{Q}_{\text{WT5}}$	Ist-Wärmeströme durch die entsprechenden Wärmetauscher.	[W]
$\dot{Q}_{\text{WT1soll}} \dots \dot{Q}_{\text{WT5soll}}$	Soll-Wärmeströme für die entsprechenden Wärmetauscher.	[W]
$\vartheta_{\text{HW}}, \vartheta_{\text{KW}},$ $\vartheta_{\text{HS}}, \vartheta_{\text{KS}}$	Ist-Temperaturen in den entsprechenden Tanks.	[K]
$\vartheta_{\text{HWsoll}}, \vartheta_{\text{KWsoll}},$ $\vartheta_{\text{HSsoll}}, \vartheta_{\text{KSsoll}}$	Soll-Temperaturen für die entsprechenden Tanks.	[K]
$\vartheta_{\text{W,RL}}, \vartheta_{\text{S,RL}}$	Ist-Wasser- bzw. Soletemperatur am Eingang der Testwärmepumpe (Mischtemperaturen).	[K]
$\vartheta_{\text{W,RLsoll}}, \vartheta_{\text{S,RLsoll}}$	Soll-Wasser- bzw. Soletemperatur am Eingang der Testwärmepumpe.	[K]

### 7.3 Symbole zum Kapitel 2.3.1 (Gebäudemodell)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$c_B$	Spezifische Wärmekapazität des Bodens.	[J/(K.Kg)]
$c_G$	Spezifische Wärmekapazität des Gebäudes.	[J/(K.Kg)]
$c_W$	Spezifische Wärmekapazität des Heizwassers.	[J/(K.Kg)]
$m_B c_B =$		
$\rho_B V_B c_B$	Bodenmasse x spezifische Wärmekapazität des Bodens.	[J/K]
$Q_{BR}$	Wärmestrom vom Boden in den Raum.	[W]
$Q_{WB}$	Wärmestrom vom Heizwasser in den Boden.	[W]
$Q_{FB}$	Wärmestrom von der Testwärmepumpe in das Gebäude.	[W]
$Q_{RA}$	Verlustwärmestrom durch die Gebäudehülle nach Aussen.	[W]
$Q_{WGB}$	Störwärmestrom in den Boden (z.B. von der Sonnenstrahlung).	[W]
$Q_{WGR}$	Störwärmestrom in den Raum (z.B. von der Sonnenstrahlung).	[W]
$V_B$	Volumen des Bodens.	[m <sup>3</sup> ]
$V_G$	Volumen des Gebäudes.	[m <sup>3</sup> ]
$V_H$	Volumen des Heizwassers im Fussboden und Heizkörper.	[m <sup>3</sup> ]
$V_H$	Umwälzvolumenstrom.	[m <sup>3</sup> /s]
$\vartheta_B$	Bodentemperatur.	[K]
$\vartheta_L$	Aussenlufttemperatur.	[K]
$\vartheta_R$	Raumtemperatur.	[K]
$\vartheta_{RL}$	Heizwassertemperatur am Eingang der Wärmepumpe.	[K]
$\vartheta_{VL}$	Heizwassertemperatur am Ausgang der Wärmepumpe.	[K]
$\kappa_{BR} =$		
$k_B A_B$	Wärmeübergangskoeffizient Boden x Bodenfläche.	[W/K]
$\kappa_{RA}$	Wärmedurchgangskoeffizient Gebäude-Aussenluft x Gebäudefläche.	[W/K]
$\kappa_{WB}$	Wärmedurchgangskoeffizient Heizwasser-Boden x wirksame Rohrfläche.	[W/K],
$\rho_B$	Dichte des Bodens.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_G$	Dichte des Gebäudes.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_W$	Dichte des Heizwassers.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_G$	Gebäudezeitkonstante.	[h]
$\tau_s$	Strahlungszeitkonstante.	[h]

## 7.4 Symbole zum Kapitel 2.3.2 (Erdwärmesonde)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$a$ :	Temperaturleitfähigkeit.	$[m^2/s]$
$C_j$ :	Wärmekapazität des Rechenknotes $j$ (radiale Richtung).	$[J/K]$
DimAxi:	Anzahl Knoten in axialer Richtung.	$[-]$
DimRad:	Anzahl Knoten in radialer Richtung.	$[-]$
$L_j$ :	Thermische Leitfähigkeit zwischen den Knoten $(j-1)$ und $(j)$ (radiale Richtung).	$[W/K]$
$\dot{q}_k$ :	Durchschnittliche spezifische Wärmebelastung in der Woche $k$ pro Sondenlänge.	$[W/m]$
$\vartheta_{down,i}(t)$ :	Temperatur der hinunterfliessenden Sole für die axiale Ortskoordinate $i$ .	$[K]$
$\vartheta_{i,j}(t)$ :	Temperatur der Erde für die axiale Ortskoordinate $i$ und radiale Ortskoordinate $j$ (Zeitkontinuierlich).	$[K]$
$\vartheta_{k,j}(t)$ :	Temperatur der Erde für die zeitdiskrete Koordinate $k$ und die radiale Ortskoordinate $j$ .	$[K]$
$\vartheta_{up,DimAxi-i}(t)$ :	Temperatur der hinauffliessenden Sole für die axiale Ortskoordinate $i$	$[K]$
$\vartheta_{VA}(t)$ :	Verdampferaustrittstemperatur (= Sondeneintrittstemperatur).	$[K]$
$\vartheta_{VF}(t)$ :	Verdampfereintrittstemperatur (= Sondenausrittstemperatur).	$[K]$
$\lambda$ :	Wärmeleitfähigkeit.	$[W/(m.K)]$

## 7.5 Symbole zum Kapitel 4 (Reglereinstellungen)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$Q_{Bed}^*$ :	Wärmestrombedarf für das Haus.	$[W]$
$Q_{WR}^*$ :	Wärmestrom vom Heizwasser in den Raum (Hausmodell 2. Ordnung).	$[W]$
$\kappa_{WR}$ :	Wärmeübergangskoeffizient Heizwasser und Boden x Bodenfläche.	$[W/K]$

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] H. R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Wärmepumpenanlagen. Phase 1. Schlussbericht. Bern: Bundesamt für Energie, 1999.
- [2] H. R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Wärmepumpenanlagen. Phase 2: Implementierung in handelsübliche Regler und Erprobung in einem Wohnhaus. Schlussbericht. Bern: Bundesamt für Energie, 2002.
- [3] E. Shafai, H. R. Gabathuler, H. Mayer: Pulsbreitenmodulation in der Praxis, Tagungsband zur 10. UAW-Tagung „Wärmepumpen – noch effizienter und leiser“, Burgdorf, Bundesamt für Energie, 2003.
- [4] E. Shafai, R. Wimmer, H. P. Geering: A New Approach for Heat Pump Heating Systems. In: Proceedings of the 7th IEA Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002.
- [5] G. Reiner, E. Shafai, R. Wimmer, D. Zogg, H.R. Gabathuler, H. Mayer, H.U. Bruderer: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phasen 1 bis 3, Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW), Bundesamt für Energie (BFE), Bern, Schlussbericht, ENET-Nr. 9657407, 1998.
- [6] D. Zogg und E. Shafai: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen (A Short-Term Rating Method for Heat Pump Heating Systems). Phase 5: Test der Fehlerdiagnosesysteme an Prüfständen und mit Simulationen. Schlussbericht. Bern: Bundesamt für Energie, Oktober 2001.
- [7] A. Huber, O. Schuler: Berechnungsmodul für Erdwärmesonden, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW), Bundesamt für Energie (BFE), Bern, Schlussbericht, ENET-Nr. 195115141, 1997.
- [9] Th. Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW (STASCH). Zwischenbericht. Bern: Bundesamt für Energie, Juli 2001.