

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

# **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen**

**Phase 2: Implementierung in handelsübliche Regler  
und Erprobung in einem Wohnhaus**

ausgearbeitet durch

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

und

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

unter Mitarbeit von

**Roger Frei  
Satag Thermotechnik AG, 9320 Arbon  
und**

**Bruno Illi, Franz Sidler  
Siemens Building Technologies AG, 6301 Zug**

Im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

**Autoren:**

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

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

**Begleitgruppe:**

Dr. Thomas Afjei  
Fachhochschule beider Basel  
4132 Muttenz

Markus Erb  
Dr. Eicher + Pauli AG  
4410 Liestal

Daniel Trüssel  
Kälte Wärme Technik AG  
3123 Belp

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie  
3003 Bern

Forschungsprogramm Umge-  
bungs- und Abwärme, Wär-  
me-Kraft-Kopplung (UAW)  
Leitung: Dr. Martin Zogg

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

**Industriepartner:**

Roger Frei  
Satag Thermotechnik AG  
Romanshonerstrasse 36  
9320 Arbon

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

# Zusammenfassung

Es wurden drei Arten von PBM-Reglern untersucht:

- 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 (Wärmebedarf aus der Energiekennlinie dividiert durch Heizleistung aus der Wärmepumpenkennlinie)
- Modellbasierter PBM-Regler: Die Energiezufuhr erfolgt aufgrund eines Modells für die thermische Trägheit des Wärmeabgabesystems und des Gebäudes (prädiktiver Regler mit LQ-Folgeregelung)

Pulsweitenmodulation (PBM) hat gegenüber der herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung wesentliche Vorteile:

- Längere mittlere Laufzeit der Wärmepumpe und Einhaltung Minimallaufzeit
- Höherer Niedertarifanteil
- Eingabe der abstrakten Rücklauftemperatur-Heizkurve entfällt
- Koppelung Heizkurve/Zeitprogramm entfällt
- Koppelung Heizkurve/Wassererwärmung entfällt
- Keine Probleme mit tiefen und flachen Heizkurven
- Keine Fehler durch Momentanwert-Witterungsführung an Tagen mit grosser Temperaturdifferenz
- Kleinerer Hilfsenergieverbrauch durch Pumpenabschaltung

Die genannten Vorteile gegenüber der herkömmlichen Rücklauftemperaturregelung sind systembedingt durch das völlig andere Regelkonzept vom PBM gegeben. Hier wurde vor allem untersucht, ob PBM aufwendiger ist als die herkömmliche Rücklauftemperaturregelung, ob die neuen PBM-Regelkonzepte in heutige Regler implementiert werden können und ob PBM Nachteile gegenüber der Rücklauftemperaturregelung aufweist. Die wichtigsten Resultate der Untersuchung sind:

■ PBM ist für den Installateur und Betreiber nicht aufwendiger als herkömmliche Rücklauftemperaturregelung: Anzahl Fühler, Anzahl Bedienungselemente und notwendige Eingabegrössen sind miteinander vergleichbar.

■ Die Implementierung des PBM-Reglers in herkömmliche Regelgeräte ist problemlos möglich. Neben dem PBM-Regler hat auch noch ein herkömmlicher Rücklauftemperaturregler im gleichen Regelgerät Platz. Der Anwender kann also beide Regelstrategien testen und dann die ihm zuzagende auswählen.

■ Die getesteten und diskutierten PBM-Regler sind bezüglich Raumtemperatur-Komfort mit dem herkömmlichen Rücklauftemperaturregler vergleichbar.

■ Alle PBM-Regler konnten problemlos mit einem Niedertarifanteil von 60...70% gefahren werden. Im Vergleich dazu war der Niedertarifanteil beim Rücklauftemperaturregler 43% (ohne Zeitprogrammsteuerung). Mit Fussbodenheizung ergab sich dabei keine merkbare Komforteinbusse, mit 67% Anteil Heizkörperheizung stieg die Raumtemperatur in der Nacht um etwa 0,5 K an.

■ Lange Laufzeiten sind ein anderer wichtiger Vorteil von PBM. Die Minimallaufzeit ist einstellbar (15...20 Minuten) und übliche Laufzeiten bei Teillast liegen bei 0,5...1,5 Stunden.

■ Auch die Optimierung des Hilfsenergieverbrauchs brachte keine Probleme. Bei den energiekenlinienbasierten und beim laufzeitkennlinienbasierten PBM-Regler konnte die Umwälzpumpe prob-

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

lemlos ausgeschaltet werden, wenn die Wärmepumpe nicht lief.

■ Durch Sonneneinstrahlung stieg bei allen Regelkonzepten die Raumtemperatur jeweils während einiger Stunden um 1...1,5 K an. Ob der Rücklauf temperaturregler und die modellbasierte PBM, die ja eine gewisse Raumtemperatur-Information über die Rücklauf temperatur erhalten, besser sind als die beiden kennlinienbasierten PBM-Regler, kann infolge der sehr unterschiedlichen Beobachtungsperioden nicht gesagt werden (hier muss auf Phase 3 verwiesen werden). Bei allen Regelkonzepten könnte eine Raumtemperaturaufschaltung (oder sogar ein Sonnenintensitätsfühler) in extremen Fällen sicher Vorteile bringen (beim laufzeitkennlinienbasierten PBM-Regler bereits eingebaut, hier aber noch nicht getestet).

■ Ein detaillierter Vergleich der Regelkonzepte bezüglich Komfort und Energie-Effizienz war noch nicht möglich: Beobachtungsperioden, Temperaturen, Sonneneinstrahlung sind infolge des zeitlich aufeinanderfolgenden Einsatzes der untersuchten Regler zu unterschiedlich. Welcher der erprobten PBM-Regler (oder Kombinationen davon) nun die beste Lösung ist, wird in Phase 3 beantwortet werden. Erst mit dem ETHZ-Wärmepumpenprüfstand wird es möglich sein, einen objektiven Vergleich zwischen den einzelnen Regelkonzepten anzustellen.

■ Ausserdem bestehen noch zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten, die in Phase 3 noch näher untersucht werden sollten:

- Raumtemperatur- und Sonnenintensitätsaufschaltung
- Verbesserung der Begrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperaturen in Anlagen mit grossem Thermostatventilanteil
- Verbesserung der Abtausteu erung
- Ladung des Wassererwärmers

■ In anderen Einsatzgebieten, wie Wärme-Kraft-Kopplung und Brennstoffzellen, eröffnen sich für die vorgestellten PBM-Regler weitere interessante Anwendungsmöglichkeiten.

## Abstract

In conventionally controlled heat pump heating systems either the supply or the return flow temperature is controlled by a relay-type controller. The set-point of the controller is chosen as a function of the outdoor temperature along the so-called heating characteristic curve, which characterizes the steady-state heating energy consumption of the building for a certain indoor reference temperature. Restrictions, such as low-tariff periods or cut-off periods determined by electric power providers, cannot be integrated for optimization purposes, nor can this simple controller take into account the weather forecast. Additionally, in well-insulated single-family houses with low-temperature heating systems, the heating characteristic curve is rather low and flat, such that the hysteresis band of the controller may cause the heat pump not to switch on above a certain outdoor temperature.

Within the scope of the current research project (Pulse-width modulation for heat pump heating systems), a new control approach has been developed. This approach does not aim at controlling the temperature of either the supply or the return flow. Rather, it quantifies optimal heating energy portions to be delivered into the house, optimally distributed throughout the day with respect to the weather forecast, the most efficient operation of the heat pump, low-tariff periods, and power cut-off periods determined by electric power providers, while still guaranteeing the desired indoor temperature. Three versions of this new control approach have been developed:

- Pulse-width modulation based on the heating characteristic curve: In this pragmatic control concept, the total heating energy required for 24 hours is calculated on the basis of both the mean value of the outdoor temperature over the last 24 hours and the energy characteristic curve of the house, which shows the steady-state heating energy required for 24 hours in function of the outdoor temperature. For the distribution of the heating energy required for each tariff period, the user has to pre-define a preferred percental ratio for distribution. The duration for the heat pump to be turned on within each tariff period is then calculated by using the power characteristic curve of the heat pump, which shows the steady-state heating power of the heat pump in function of the outdoor temperature. The number of the pulses required for both low and high tariff periods are finally calculated by utilizing a preferred duration for heating pulses and heating pauses which also have to be pre-defined by the user, while taking into account the restrictions given by the power tariff structure as well as the power cut-off periods.

- Pulse-width modulation based on the characteristic curve for the "on" duration: This control approach is quite similar to the previous one. The only difference is that instead of both of the characteristic curves, namely the energy characteristic curve of the house and the power characteristic curve of the heat pump, only the characteristic curve for the "on" duration (energy characteristic curve of the house divided by power characteristic curve of the heat pump) is directly utilized.

- Model-based pulse-width modulation: This is the most sophisticated of the three control concepts. Instead of a steady-state heating characteristic curve, it uses a mathematical model for the dynamic thermal behavior of the house and a predicted transient for the outdoor temperature in a controller algorithm to optimize the duration of the heating energy portions as well as their distribution with regard to the power costs (high and low tariff), the power cut-off times, and the most energy-efficient operation of the heat pump. For the development of the controller algorithm the Model Predictive Control (MPC) approach using the LQ optimization is chosen (LQ: linear model for the system to be optimized, quadratic objective function for the optimization).

The results of this Phase 2 of the project clearly show that all versions of the new control approach can be easily implemented in commercially available controllers and that they work successfully in a single-family house. A complete and representative comparison among the three versions of the pulse width modulation approaches as well as the conventionally available relay-type controller approach will be investigated on a test bench in Phase 3 of the project.



# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	9
1.1	Die grundsätzliche Idee der Pulsbreitenmodulation (PBM).....	9
1.2	In Phase 1 durchgeführte Untersuchungen.....	10
1.3	Zielsetzung Phase 2.....	10
1.4	Ausblick auf Phase 3.....	11
2.	Referenzanlage.....	12
2.1	Beschreibung.....	12
2.2	Messkonzept.....	14
2.3	Einstellung der Referenzanlage.....	14
2.3.1	Heizsaison 2000/2001.....	14
2.3.2	Heizsaison 2001/2002.....	15
3.	Energiekennlinienbasierte PBM.....	16
3.1	Bisherige Erfahrungen.....	16
3.2	Beschreibung Regelalgorithmus.....	16
3.2.1	Grundsätzliche Ideen.....	16
3.2.2	Messgrößen.....	16
3.2.3	Eingabegrößen.....	17
3.2.4	Flussdiagramme.....	18
3.3	Simulationen.....	25
4.	Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag.....	27
4.1	Regelalgorithmus.....	27
4.2	Implementierung.....	27
4.3	Erprobung.....	27
5.	Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens.....	28
5.1	Regelalgorithmus.....	28
5.2	Implementierung.....	28
5.2.1	PBM-Prototypregler.....	28
5.2.2	Laufzeitkennlinie statt Energiekennlinie.....	28
5.2.3	Aufteilung der Pulse auf 4 Zeitfenster.....	29
5.2.4	Abweichungen gegenüber dem Flussdiagramm in Kapitel 3.....	30
5.3	Erprobung.....	32
6.	Modellbasierte PBM.....	33
6.1	Generelles Konzept.....	33
6.2	Hausmodell.....	33
6.3	Optimierung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation.....	35
6.4	Beobachter.....	37
6.5	Wettervorhersage.....	37
6.6	Optimierung.....	37
6.7	Pulsbreitenmodulation.....	39

7.	Modellbasierter PBM-Regler von SATAG .....	40
7.1	Regelalgorithmus .....	40
7.2	Implementierung .....	40
7.3	Erprobung in der Heizsaison 2000/2001 .....	41
7.4	Erprobung in der Heizsaison 2001/2002 .....	41
8.	Diskussion .....	42
8.1	Fragestellung .....	42
8.2	«Tricks» bei der Rücklauftemperaturregelung .....	42
8.2.1	Minimallaufzeit durch Abschaltverzögerung .....	42
8.2.2	Normalbetrieb in der Nacht und reduzierter Betrieb am Tag .....	43
8.3	Diskussion der Messresultate .....	43
8.3.1	Rücklauftemperaturregler – 33% FBH / 67% HKH – November 01 .....	44
8.3.2	Energiekennlinienbasierter PBM-Regler – 100% FBH – März/April 99 .....	46
8.3.3	Energiekennlinienbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – März/April 02 .....	48
8.3.4	Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – Jan./Feb. 02 .....	50
8.3.5	Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – Ferien .....	52
8.3.6	Modellbasierter PBM-Regler – 67% FBH / 33% HKH – Feb./März 01 .....	54
8.3.7	Modellbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – Januar 02 .....	56
8.3.8	Modellbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – März 02 .....	58
8.3.9	Energiekennlinien .....	60
8.3.10	Vorlauf- und Rücklauftemperaturen .....	62
8.4	Optimierungsmöglichkeiten .....	64
8.4.1	Raumtemperatur- und Sonnenintensitätsaufschaltung .....	64
8.4.2	Begrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur .....	64
8.4.3	Abtausteuern .....	64
8.4.4	Ladung des Wassererwärmers .....	65
9.	Zusammenarbeit .....	66
9.1	Nationale Zusammenarbeit .....	66
9.2	Internationale Zusammenarbeit .....	66
9.2.1	Erweitertes Lehrkolloquium an der Technischen Universität Dresden .....	66
9.2.2	IASTED – International Conference on Control and Applications .....	66
9.2.3	7th IEA Heat Pump Conference Beijing .....	66
10.	Literaturverzeichnis .....	67

# 1. Einleitung

## 1.1 Die grundsätzliche Idee der Pulsbreitenmodulation (PBM)

Kleinwärmepumpenanlagen werden heute fast ausschliesslich mit witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelungen betrieben. Mit dieser Regelstrategie versucht man vor allem eine optimale Regelung des Wärmeabgabesystems zu erreichen. Spezielle Forderungen der Wärmepumpe – lange Laufzeiten, hoher Niedertarifanteil, kleiner Hilfsenergieverbrauch usw. – werden dabei nur zweitrangig berücksichtigt.

Deshalb wurde schon seit längerer Zeit die Anwendung der Pulsbreitenmodulation (PBM) in der Wärmepumpentechnik gefordert (vgl. [1], [2] und [3]). Mittels PBM lässt sich nämlich die thermische Trägheit des Wärmeabgabesystems und des Gebäudes zugunsten eines optimalen Betriebs der Wärmepumpenanlage nutzen: Die notwendige Energie wird dem Gebäude in «Wärmepaketen» geeigneter Grösse so zugeführt, dass Laufzeiten, Niedertarifanteil, Hilfsenergieverbrauch usw. optimiert werden können.

In diesem Projekt werden drei Arten von PBM-Reglern untersucht:

- 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 (Wärmebedarf aus der Energiekennlinie dividiert durch Heizleistung aus der Wärmepumpenkennlinie)
- Modellbasierter PBM-Regler: Die Energiezufuhr erfolgt aufgrund eines Modells für die thermische Trägheit des Wärmeabgabesystems und des Gebäudes (prädiktiver Regler mit LQ-Folge-regelung)

Gegenüber der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung ergeben sich mit PBM zahlreiche Vorteile:

1. Längere mittlere Laufzeit der Wärmepumpe und Einhaltung Minimallaufzeit: Dies bedeutet geringere Anfahrbelastung des Netzes (Forderung der Elektrizitätswerke: maximal 3 Einschaltungen pro Stunde) und längere Lebensdauer des Verdichters
2. Höherer Niedertarifanteil: Der Betreiber kann beliebig wählen zwischen hohem Komfort (möglichst gleichmässige Wärmeabgabe) und tiefen Heizkosten (möglichst hoher Niedertarifanteil).
3. Eingabe der abstrakten Rücklauf temperatur-Heizkurve entfällt: Selbst Fachleute sind nicht in der Lage die richtige Einstellung der Rücklauf temperatur-Heizkurve vorherzusagen. Die richtige Einstellung muss vielmehr durch den Betreiber nach und nach gefunden werden. Die Frage der laufzeitkennlinienbasierten PBM «Wie lange muss meine Wärmepumpe pro Tag bei einer bestimmten Aussentemperatur laufen?» lässt sich viel leichter und anschaulicher beantworten. Bei der modellbasierten PBM kann diese Einstellung sogar vollständig entfallen.
4. Koppelung Heizkurve/Zeitprogramm entfällt: Jede Änderung des Zeitprogramms bedingt eine neue Einstellung der Rücklauf temperatur-Heizkurve. Um diese höchst unangenehme Koppelung braucht man sich bei PBM nicht zu kümmern. Die Nutzung des Niedertarifs kann mit PBM so weit als möglich gegen den Morgen hin geschoben werden (warme Wohnung beim Aufstehen); am Morgen kühlt die Wohnung dann wieder aus (Haushaltsarbeiten) und auf den Abend hin kann wieder verstärkt geheizt werden.
5. Koppelung Heizkurve/Wassererwärmung entfällt: Je länger die Wärmepumpe zur Wassererwärmung laufen muss, desto höher muss die Rücklauf temperatur-Heizkurve eingestellt werden, weil weniger Laufzeit zur Heizung zur Verfügung steht. Dies ist insbesondere ein Problem bei

Anlagen mit grossem und stark schwankenden Warmwasserbedarf. Mit Pulsbreitenmodulation entfällt dieses Problem: Die Wassererwärmung kann gezielt in den Pausen erfolgen, wenn die Wärmepumpe nicht zum Heizen gebraucht wird.

6. Keine Probleme mit tiefen und flachen Heizkurven: Differenzen zwischen Auslegung und realem Betrieb bewirken, dass die reale Heizkurve viel tiefer und viel flacher verläuft als erwartet. Dadurch wird die Regelbarkeit der Wärmepumpenanlage mit herkömmlichen Rücklauftemperaturreglern eingeschränkt. Diese Probleme entfallen mit PBM vollständig.
7. Keine Fehler durch Momentanwert-Witterungsführung an Tagen mit grossen Temperaturdifferenzen: Rücklauftemperaturregler, die mittels Zeitprogramm zur Niedertarifnutzung hauptsächlich während der Nacht arbeiten, erzeugen an Tagen mit grosser Temperaturdifferenz zwischen Tag und Nacht mehr Wärme als notwendig, weil die Witterungsführung mit dem Momentanwert der Aussentemperatur erfolgt. Dieses Problem entfällt bei PBM.
8. Kleinerer Hilfsenergieverbrauch durch Pumpenabschaltung: Die energiekennlinien- und laufzeitkennlinienbasierten PBM-Regler brauchen die Rücklauftemperatur nicht als Messgrösse, d. h. die Umwälzpumpe kann bei Stillstand der Wärmepumpe ganz oder zeitverzögert abgeschaltet werden (gilt nicht für modellbasierte PBM).

## 1.2 In Phase 1 durchgeführte Untersuchungen

In Phase 1 des vorliegenden Projekts [4] wurden erste Untersuchungen zu zwei der drei genannten Regelstrategien durchgeführt:

■ Die **energiekennlinienbasierte PBM** wurde an einem typischen Neubauobjekt mit trägem Wärmeabgabesystem (nass verlegte Fussbodenheizung) während zweier Jahre erprobt. Sie lief völlig problemlos und der Sollwert der Raumtemperatur konnte immer ohne nennenswerte Abweichungen eingehalten werden.

■ Die **modellbasierte PBM** wurde durch Simulationen an der ETHZ erprobt und lieferte ebenfalls erfolgsversprechende Resultate. Zusätzlich konnte die modellbasierte PBM im Rahmen des Projekts «Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3» [5] an einer anderen Referenzanlage erfolgreich erprobt werden, allerdings nur während einer Woche.

Damit konnte die grundsätzliche Machbarkeit von PBM und deren Vorteile gegenüber der herkömmlichen witterungsgeführten Rücklauftemperaturregelung (siehe Abschnitt 1.1) aufgezeigt werden. Aufgrund dieser positiven Resultate hatten zwei Regelgerätehersteller grosses Interesse an den neuen Regelstrategien bekundet und waren bereit, in Phase 2 an deren weiteren Erprobung als Industriepartner mitzuwirken:

- Satag Thermotechnik AG, Arbon (Unternehmen der Viessmann Gruppe)
- Siemens Building Technologies (Europe) AG, Landis & Staefa Division, Zug

## 1.3 Zielsetzung Phase 2

In Phase 2 sollen auf Basis handelsüblicher Geräte durch die beiden Industriepartner Regler mit den neuen Regelstrategien programmiert und (zusammen mit dem Originalregler) zur Erprobung zur Verfügung gestellt werden:

- Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag
- Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens
- Modellbasierter PBM-Regler von Satag
- Witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklauftemperaturregler von Satag (Originalregler)

Auf einer Referenzanlage mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und der Charakteristik eines typischen Sanierungsobjekts sollen dann die herkömmliche witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung und die drei neuen Regelstrategien alternativ gefahren und miteinander verglichen werden.

Aufgrund zeitlicher Probleme und zu warmer Witterung musste eine Aufteilung, entsprechend den beiden Heizperioden, vorgenommen werden:

■ Heizperiode 2000/2001 mit folgenden Arbeiten:

- Evaluation der Referenzanlage
- Ausrüstung der Referenzanlage mit einem unabhängigen Mess- und Datenaufzeichnungssystem
- Messtechnische Bestimmung der Anlageparameter mit der bestehenden Wärmepumpe und der bestehenden witterungsgeführten Rücklauf-temperaturregelung
- Definition der Algorithmen und Implementierung des modellbasierten PBM-Reglers
- Definition der Algorithmen und Implementierung des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers
- Erprobung des modellbasierten Reglers auf der Referenzanlage

■ Heizperiode 2001/2002 mit folgenden Arbeiten:

- Neue Einregulierung der Referenzanlage auf einen grösseren Anteil Heizkörperheizung
- Definition der Algorithmen und Implementierung des laufzeitkenlinienbasierten PBM-Reglers
- Erstellen einer Schnittstelle Satag-Wärmepumpe/Siemens-Regler
- Parameteridentifikation mit dem witterungsgeführten Rücklauf-temperaturregler (Originalregler)
- Erprobung des modifizierten modellbasierten Reglers auf der Referenzanlage
- Erprobung des laufzeitkenlinienbasierten PBM-Reglers auf der Referenzanlage
- Erprobung des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers auf der Referenzanlage

## 1.4 Ausblick auf Phase 3

Im Rahmen des Projekts «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 5» [6] ist ein Wärmepumpenprüfstand für dynamische Untersuchungen an Sole/Wasser-Wärmepumpen im Labor des Instituts für Mess- und Regeltechnik der ETHZ aufgebaut worden. Dieser Prüfstand ist bereits im erwähnten Projekt für die Entwicklung von Algorithmen für Fehlerdiagnose an Wärmepumpen eingesetzt worden.

Für Phase 3 dieses Projekts ist für den Vergleich des energiekenlinienbasierten, laufzeitkenlinienbasierten und modellbasierten PBM-Reglers sowie des herkömmlichen Rücklauf-temperaturreglers ein Konzept für die Regelung des Prüfstands als Basis für die Emulation von Quelle (Erdsonde) und Senke (Gebäude) mit Hilfe von Simulationen ausgearbeitet worden. Die Erprobung des Regelkonzepts und die Realisierung der Emulation werden ab 2002 im Rahmen einer Dissertation in Angriff genommen. Der Doktorand wird dann auch die Phase 3 bearbeiten.

## 2. Referenzanlage

### 2.1 Beschreibung

Es lagen zwei typische Sanierungsobjekte vor, die als Referenzanlagen in Frage kamen. Aufgrund einer ausführlichen Evaluation wurde schliesslich die Anlage «Winterthur-Seen» als Referenzanlage ausgewählt, weil diese den Anforderungen am besten entsprach (Abbildung 1):

- Typisches Sanierungsobjekt, Baujahr 1986 (Wärmepumpenersatz nach 15 Jahren)
- Häufig vorkommender EFH-Typ
- Luft/Wasser-Wärmepumpe (die Referenzanlage in Phase 1 war eine Sole/Wasser-Wärmepumpe)
- Gemischtes Wärmeabgabesystem Fussbodenheizung/Heizkörperheizung mit hohem Heizkörperanteil, separater Wärmezähler für die Heizkörperheizung möglich
- Wärmeabgabe kann mit unterschiedlichen Anteilen Fussbodenheizung und Heizkörperheizung betrieben werden
- Grosse Fensterflächen mit Süd-Orientierung, d. h. grössere Störenergie bei eher kleinerem Heizenergiebedarf (gute Wärmedämmung)
- Grosses Interesse des Bauherrn und Bereitschaft zur Mitarbeit

Die mutmassliche Auslegung des Wärmeabgabesystems im Jahre 1986 sah wie folgt aus:

- SIA-Wärmeleistungsbedarf 15 kW bei  $-11^{\circ}\text{C}$  Aussentemperatur
- 50% Fussbodenheizung  $38/28^{\circ}\text{C}$  bei  $-11^{\circ}\text{C}$  Aussentemperatur
- 50% Heizkörperheizung  $45/35^{\circ}\text{C}$  bei  $-11^{\circ}\text{C}$  Aussentemperatur

Die für die Messungen massgebende hydraulische Schaltung zeigt Abbildung 2.



Abbildung 1: Referenzanlage Winterthur-Seen von Südosten; das Wohnzimmer (grosse Fenster im EG) bekommt morgens und nachmittags Sonne, das Büro auf der Nordseite bekommt keine Sonne

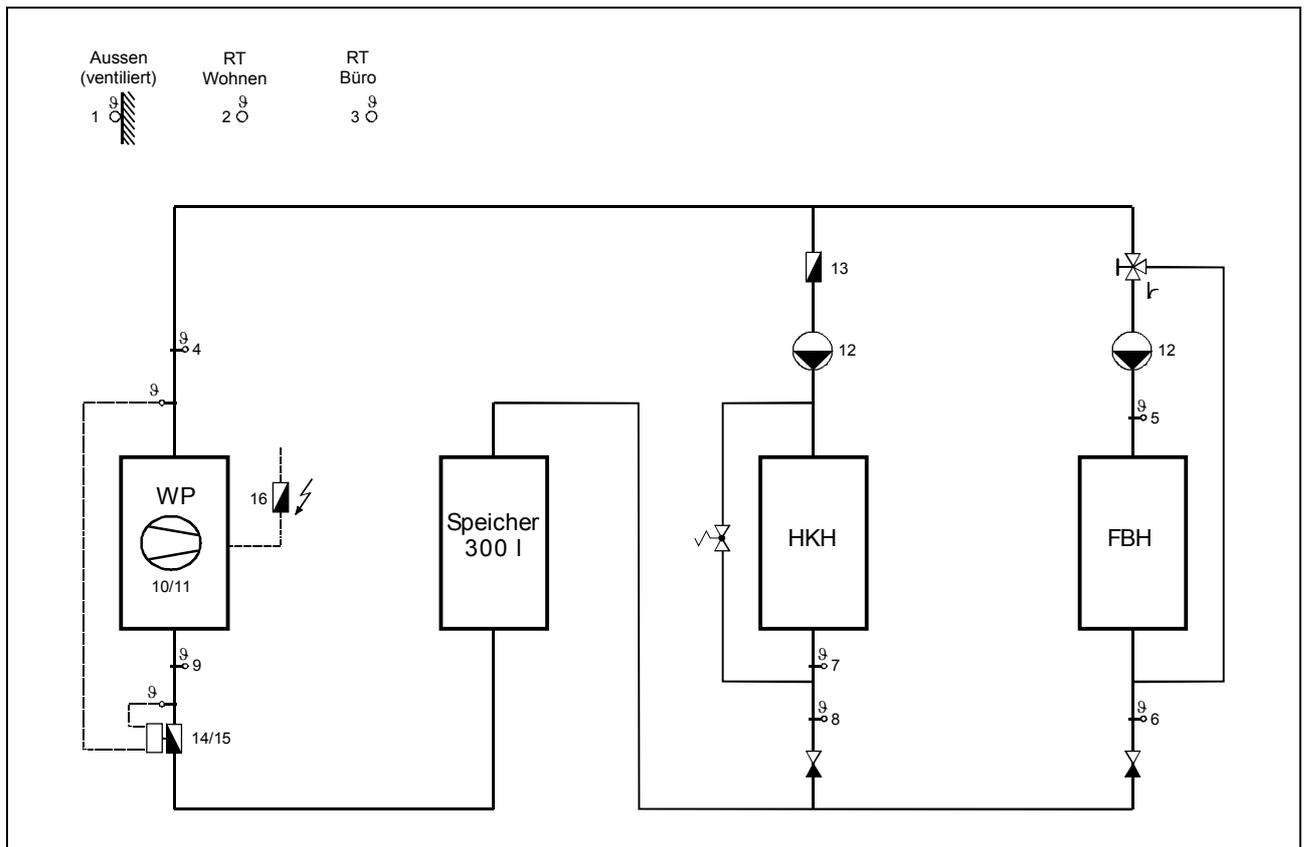


Abbildung 2: Prinzipschema (die Numerierung der Messstellen bezieht sich auf Tabelle 3)

Die Auslegung der neuen Wärmepumpe erfolgte aufgrund der Messungen an der alten Wärmepumpe bis Ende 2000:

- Temperaturkennlinien:
  - Vorlauftemperatur 38°C bei –15°C Aussentemperatur
  - Rücklauftemperatur Heizkörperheizung 34°C bei –15°C Aussentemperatur
  - Rücklauftemperatur Fussbodenheizung 32°C bei –15°C Aussentemperatur
  - Fusspunkt 19°C bei 15°C Aussentemperatur
- Energiekennlinie:
  - 240 kWh/d bei –15°C Aussentemperatur
  - 0 kWh/d bei 14°C Aussentemperatur (entspricht der Heizgrenze)
- Heizenergiebedarf zur Wassererwärmung:
  - 0 kWh/d, d. h. keine Wassererwärmung über die Wärmepumpe (wie bisher)
- Maximale Sperrzeit:
  - 0 h/d, d. h. keine Sperrzeit (wie bisher)

Ausgewählt wurde schliesslich die folgende Luft/Wasser-Wärmepumpe:

- Satag AW 113.1
- Schnittpunkt der Lastkennlinie (aus den obgenannten Messdaten berechnet) mit der Wärmepumpenkennlinie bei 9 kW und –12°C Aussentemperatur, d. h. monovalenter Betrieb bis –12°C Aussentemperatur möglich

## 2.2 Messkonzept

Am 13. November 2000 wurde die Referenzanlage mit einem Mess- und Datenaufzeichnungssystem ausgerüstet. Die Messung erfolgte bis Mitte Januar 2001 mit der bestehenden Wärmepumpenanlage und seit dem 17. Januar 2001 mit der neuen Anlage (Abbildung 2 und Tabelle 3).

Nr.	Messgrösse	Messort	Messbereich	Messfühler Messsignal	Max. Messfehler
1	Temperatur	Nordseite: Aussenluft (ventiliert)	-35...+125°C	Ni 1000	± 0,2 K
2	Temperatur (1)	Wohnzimmer EG: Raumluf	-40...+80°C	NTC	± 0,2 K
3	Temperatur (1)	Büro EG: Raumluf	-40...+80°C	NTC	± 0,2 K
4	Temperatur	Wärmepumpe: Verflüssiger-Austritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
5	Temperatur	Fussbodenheizung: Rücklauf	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
6	Temperatur	Heizkörperheizung: Rücklauf vor Überströmer	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
7	Temperatur	Heizkörperheizung: Rücklauf nach Überströmer	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
8	Temperatur	Wärmepumpe: Verflüssiger-Eintritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
9	Betriebszeit	Verdichter	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
10	Betriebszeit	Abtauen	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
11	Betriebszeit	Umwälzpumpen FBH + HKH	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
12	Elektrizität (2)	Wärmepumpe: Verdichter + Hilfsenergie		10 Imp. kWh	± 2%
13	Volumen (3)	Heizkörperheizung		1 Imp./Liter	± 3%
14	Wärme (4)	Wärmepumpe		1 Imp./kWh	± 4,5%
15	Volumen (4)	Wärmepumpe		10 Imp./m <sup>3</sup>	± 3%
(1) Autonome Temperatur-Logger					
(2) Wirkenergiezähler Mesuco mit Impulsausgang					
(3) Durchflusszähler DN 20 Aquametro					
(4) Wärmezähler DN 25 Neo Vac US-51305N mit Impulsausgängen für Energie und Volumen					
Messintervall:		10 Sekunden			
Aufzeichnungsintervall:		5 Minuten			

Tabelle 3: Messtellenliste (die Numerierung der Messstellen bezieht sich auf Abbildung 2)

## 2.3 Einstellung der Referenzanlage

### 2.3.1 Heizsaison 2000/2001

Die Referenzanlage wurde seinerzeit auf 50% Leistungsabgabe über die Fussbodenheizung und 50% Leistungsabgabe über die Heizkörperheizung ausgelegt. Dazu hätte die Heizkörperheizung mit höheren Vorlauf-/Rücklauftemperaturen (Auslegung: 45/35°C) und die Fussbodenheizung mit niedrigeren Vorlauf-/Rücklauftemperaturen (Auslegung: 38/28°C) betrieben werden müssen. Diese Betriebsart wurde nie benutzt.

Die Anlage wurde seit 1986 mit der gleichen Vorlauftemperatur für Fussboden- und Heizkörperheizung betrieben (Variante 1 in Tabelle 4). Damit ergab sich eine Leistungsaufteilung von etwa 33% für die Heizkörperheizung und 67% für die Fussbodenheizung. Während der ganzen Heizsaison 2000/2001 wurde die Anlage mit dieser Einstellung gefahren.

Die Referenzanlage wurde seit dem 17. Januar 2001 (Inbetriebsetzung der neuen Anlage) mit folgenden Reglereinstellungen betrieben, wenn der witterungsgeführten Rücklauftemperaturregler von Satag (Originalregler) benutzt wurde:

- Parallelverschiebung Heizkurve bei 0°C Aussentemperatur 28°C
- Heizkurven-Steilheit bei ≥ 0°C Aussentemperatur -0,45
- Heizkurven-Steilheit bei < 0°C Aussentemperatur -0,225
- Hysterese ± 2 K

### 2.3.2 Heizsaison 2001/2002

Während der Heizsaison 2001/2002 wurde die Leistungsaufteilung zugunsten der Heizkörperheizung geändert. Dazu wurden die Messwerte aus der Heizsaison 2000/2001 auf andere Betriebsarten hochgerechnet. (Varianten 2 und 3 in Tabelle 4). Eine Diskussion ergab folgendes Ergebnis:

**Variante 2 mit 100 % Heizkörperheizung:** Ein Raum hat nur Heizkörperheizung und einige Nebenräume haben nur Fussbodenheizung. Dadurch hätten sich Komfortprobleme ergeben, die den Bewohnern nicht zuzumuten gewesen wären. Ausserdem wäre die Vorlauftemperatur mit 51°C bei -10°C Aussentemperatur knapp über der Einsatzgrenze der Wärmepumpe (45°C bis -15°C bzw. 55°C bis -5°C) gelegen. Diese Variante wurde deshalb verworfen.

**Variante 3 mit 67% Heizkörperheizung und 33% Fussbodenheizung:** Diese Variante bringt, gegenüber Variante 1, immerhin eine Verdoppelung des Anteils der Heizkörperheizung bei einer Halbierung des Anteils der Fussbodenheizung. Diese Variante erwies sich als machbar. Allerdings musste dazu die Fussbodenheizung stark heruntergemischt werden, was mit dem bereits 1986 eingebauten Hand-Mischhahnen nicht ganz einfach war.

Variante	Bezeichnung	Heizkörperheizung			Fussbodenheizung		
		Leistung	Durchfluss	VL/RL-Temp. 24-h-Mittelwert	Leistung	Durchfluss	VL/RL-Temp. 24-h-Mittelwert
1	Messung 2000/2001 33% HKH 67% FBH	2,8 kW	0,9 m³/h	33/30,3°C	5,7 kW	0,9 m³/h	33/27,5°C
2	Verworfen Variante 100% HKH	8,5 kW	0,9 m³/h	51/42,9°C	–	–	–
3	Messung 2001/2002 67% HKH 33% FBH	5,7 kW	1,14 m³/h	42/37,7°C	2,8 kW	pri. 0,16 m³/h sek. 1,3 m³/h	42/26,9°C 28,7/26,9°C

*Tabelle 4: Varianten unterschiedlicher Betriebsarten; alle Angaben beziehen sich auf einen Auslesepunkt von -10°C Aussentemperatur*

Die Referenzanlage wurde am 11. Oktober 2001 neu abgeglichen. Wenn der witterungsgeführte Rücklauftemperaturregler von Satag (Originalregler) benutzt wurde, wurde sie mit folgenden Reglereinstellungen betrieben:

- Parallelverschiebung Heizkurve bei 0°C Aussentemperatur 35°C (zuvor 28°C)
- Heizkurven-Steilheit bei  $\geq 0^\circ\text{C}$  Aussentemperatur -0,8 (zuvor -0,45)
- Heizkurven-Steilheit bei  $< 0^\circ\text{C}$  Aussentemperatur -0,4 (zuvor -0,225)
- Hysterese  $\pm 4$  K (zuvor  $\pm 2$  K)

## 3. Energiekennlinienbasierte PBM

### 3.1 Bisherige Erfahrungen

In Phase 1 des vorliegenden Projekts [4] wurde die energiekenlinienbasierte PBM an einem typischen Neubauobjekt mit trägem Wärmeabgabesystem (nass verlegte Fussbodenheizung) während zweier Jahre erprobt. Sie lief völlig problemlos und der Sollwert der Raumtemperatur konnte immer ohne nennenswerte Abweichungen eingehalten werden.

Dieser erste energiekenlinienbasierte PBM-Regler war auf einem älteren Prozessrechner realisiert worden. Zuhanden der Industriepartner wurde aufgrund der in Phase 1 gewonnenen Erkenntnisse eine verbesserte Version des Regelalgorithmus erstellt und in [7] beschrieben.

### 3.2 Beschreibung Regelalgorithmus

#### 3.2.1 Grundsätzliche Ideen

Im Vergleich zum bisher in der Wärmepumpentechnik hauptsächlich eingesetzten witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregler liegen dem energiekenlinienbasierten PBM-Regler grundsätzlich die folgenden Ideen zugrunde:

1. Die bisherige «Heizkurve» (= Rücklauf temperatur in Funktion der Aussentemperatur) wird durch die «Energiekenlinie» (= Tages-Energiebedarf in Funktion der Aussentemperatur) ersetzt.
2. Die bisherigen Betriebsarten «Reduziert» und «Normal» werden durch «Niedertarif-Fenster» und «Hochtarif-Fenster» ersetzt.
3. Der Benutzer bekommt – neben der bisherigen Korrekturmöglichkeit «wärmer/kälter» – noch zusätzlich die Korrekturmöglichkeit «kostensparender/komfortabler».
4. Die Energiezufuhr im Niedertarif erfolgt möglichst am Ende der Niedertarifzeit, damit der Benutzer die Nacht nicht zu warm empfindet, aber am Morgen einen warmen Fussboden (bzw. warme Heizkörper) vorfindet.
5. Die Energiezufuhr im Hochtarif erfolgt bevorzugt am Ende der Hochtarifzeit, damit der Benutzer durch den Energieüberschuss der Niedertarifzeit den Morgen nicht zu warm empfindet, aber am Abend einen warmen Fussboden (bzw. warme Heizkörper) vorfindet.

#### 3.2.2 Messgrößen

Als Messgrösse wird für den energiekenlinienbasierten PBM-Regler – wenn man von Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen absieht – nur die Aussentemperatur benötigt. Diese Messgrösse muss dem Regler als 1-Stunden-Mittelwert und als 24-Stunden-Mittelwert (als Fenster mitgezogen) zur Verfügung stehen.

Es wird angenommen, dass die Überwachung der maximalen Verflüssigeraustrittstemperatur über den üblicherweise bereits vorhandenen Regelhochdruck realisiert werden kann. Ebenso wird angenommen dass alle weiteren Sicherheitsfunktionen und die Abtausteuerng in herkömmlicher Art und Weise realisiert werden können. Diese Funktionen werden deshalb hier nicht näher beschrieben.

### 3.2.3 Eingabegrößen

Die Bedienung des energiekennlinienbasierten PBM-Reglers soll nicht komplizierter sein als die Bedienung eines herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauftemperaturreglers. Die notwendigen Eingaben für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe, wie sie in der vorliegenden Beschreibung verwendet werden und wie sie im fertigen Regler realisiert werden könnten, zeigt Tabelle 5.

Eingabe durch	In der vorliegenden Beschreibung gem. [7]	Im fertigen Regler (Vorschlag)
WP-Hersteller bei der Auslieferung der Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Wärmepumpenkennlinie inkl. Abtauung</b></li> <li>■ <b>Wärmepumpenkennlinie exkl. Abtauung</b></li> </ul> Durch je 4 Punkte einzugeben; die Verflüssiger-Austrittstemperatur ist in der einzustellenden Wärmepumpenkennlinie pauschal zu berücksichtigen (keine Kurvenschar vorgesehen)	Wärmepumpenkennlinie inkl. Abtauung Wärmepumpenkennlinie exkl. Abtauung → Aus Bibliothek der lieferbaren Wärmepumpentypen abrufbar (berechnete Werte aus Töss-Messung)
Service-Monteur bei der Inbetriebsetzung der Anlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Energiekennlinie</b></li> </ul> Durch drei Punkte einzugeben (dritter Punkt zur Berücksichtigung einer allfälligen Verflachung gegen tiefere Aussentemperaturen)	Energiekennlinie definiert durch zwei Punkte (allenfalls fixe Verflachung gegen tiefere Aussentemperaturen): <ul style="list-style-type: none"> <li>– Heizgrenze (Heizenergiebedarf = 0)</li> <li>– Heizenergiebedarf bei -10°C                aber anschaulicher: gewünschte Laufzeit bei -10°C (Umrechnung in Heizenergiebedarf mit Hilfe der Wärmepumpenkennlinie)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Minimal-Pulslänge</b></li> <li>■ <b>Wunsch-Pulslänge</b></li> </ul> In [7] Wunsch-Pausenlänge = Wunsch-Pulslänge	Fixe Minimal-Pulslänge von z. B. 15 Minuten (keine Einstellung notwendig) Wunsch-Pulslänge → Aus Bibliothek abrufbar entsprechend Art und Auslegung von Wärmepumpe und Wärmeabgabesystem (Wunsch-Pausenlänge = Wunsch-Pulslänge)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Niedertarif-Beginn</b></li> <li>■ <b>Hochtarif-Beginn</b></li> </ul> In [7] fixe Niedertarifzeit 22.00-07.00	Niedertarifbeginn und Hochtarifbeginn gemäss örtlichem Elektrizitätswerk
	Maximale Verflüssigeraustrittstemperatur Nicht vorgesehen (kann vorläufig über den Regelhochdruck realisiert werden)	Maximale Verflüssigeraustrittstemperatur → Aus Bibliothek abrufbar entsprechend Art und Auslegung von Wärmepumpe und Wärmeabgabesystem
Benutzer während des Betriebs	Anpassung Energiekennlinie (siehe oben)	Drehknopf «wärmer/kälter»
	■ <b>Anteil Niedertarif</b>	Drehknopf «kostensparender/komfortabler»

Tabelle 5: Eingabegrößen für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe

### 3.2.4 Flussdiagramme

Die nachfolgenden Flussdiagramme gelten grundsätzlich für Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der Algorithmus kann aber problemlos auf Sole/Wasser-Wärmepumpen übertragen werden; hier entfällt die Abtauung und der Einfluss der Aussentemperatur auf die Heizleistung ist viel kleiner (genau genommen korrespondiert die Erholungszeit der Erdwärmesonden mit der Aussentemperatur).

Die Beschreibung des Regelalgorithmus in [7] erfolgte mit Hilfe einer EXCEL-Tabelle, mit welcher auch einfache Simulationen über das typische Verhalten des PBM-Reglers durchgeführt werden konnten (siehe dazu Abschnitt 3.3). Die Bezeichnungen, die in den nachfolgenden Flussdiagrammen verwendet wurden, sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Darin sind auch die Spaltenbezeichnungen der genannten EXCEL-Tabelle aufgeführt.

Das **Hauptprogramm** in Abbildung 7 zeigt den Ablauf eines Tages mit Niedertarif-Fenster (z. B. von 22.00 bis 07.00 Uhr) und Hochtarif-Fenster (z. B. von 07.00 bis 22.00 Uhr). Das Niedertarif-Fenster wird in den Unterprogrammen (Abbildung 8 bis Abbildung 10) ausführlich beschrieben. Der Ablauf im Hochtarif-Fenster erfolgt analog dem Niedertarif-Fenster und wird deshalb nicht nochmals beschrieben. Falls die geforderte Tagesenergie an Ende des Hochtarif-Fensters nicht erreicht wird (z. B. infolge eines Temperatursturzes) erfolgt ein Übertrag auf den nächsten Tag. Dieser Übertrag wird allerdings auf 10% begrenzt, um unsinnige Kummulationen zu vermeiden.

Im **Unterprogramm «Niedertarif-Fenster»** in Abbildung 8 ist zu beachten, dass der gewünschte Wärmeanteil, der im Niedertarif erzeugt werden soll, beliebig hoch gewählt werden kann (bis 100%), auch wenn keine Chance besteht, diesen bei tiefen Aussentemperatur auch tatsächlich zu erreichen. Ab einer bestimmten Aussentemperatur läuft die Wärmepumpe einfach durch und die nicht produzierte Wärme wird später im Hochtarif-Fenster erzeugt.

Das **Unterprogramm «Pulszahl»** in Abbildung 9 berechnet eine für den Wärmepumpenbetrieb sinnvolle Pulszahl:

- Bei einem Puls unter der Minimallaufzeit schaltet die Wärmepumpe nicht ein und die nicht produzierte Energie wird auf das Hochtarif-Fenster übertragen
- Ein einziger Puls kann knapp über der Minimallaufzeit liegen oder bei Maximalleistung einen durchgehenden Betrieb bedeuten (nur unterbrochen zur Abtauung oder durch eine allfällige EW-Sperre)
- Dazwischen ist die Pulszahl mit zunehmendem Energiebedarf zunächst ansteigend und später wieder absteigend

Sobald die Pulszahl festgelegt ist, wird im **Unterprogramm «Startzeit»** in Abbildung 10 die Startzeit so berechnet, dass die gewünschte Energie dem Gebäude auf das Ende der Niedertarifzeit vollständig zugeführt sein wird. Da sich die gewünschte Energie während der Nacht noch vergrößern kann (Temperatursturz) und noch eine allfällige Sperrzeit berücksichtigt werden muss, wird eine Zeitreserve von 20% der Soll-Laufzeit plus die voraussichtliche Sperrzeit eingerechnet.

Das **Unterprogramm «WP-Steuerung»** in Abbildung 11 besorgt die Wärmeberechnung aufgrund der Laufzeit und der Wärmepumpenkennlinie und schaltet die Wärmepumpe ein und aus.

<b>Kurzbezeichnung</b>	<b>[7]</b>	<b>Messgrössen</b>
AT	D	Aussentemperatur 1-Stunden-Mittelwert
AT24	E	Aussentemperatur 24-Stunden-Mittelwert
NTSperrzeit		Niedertarif-Sperrzeit vom Vortag (könnte auch Vorwoche sein)
HTSperrzeit		Hochtarif-Sperrzeit vom Vortag (könnte auch Vorwoche sein)
Übertrag		Übertrag zuwenig produzierter Energie vom Vortag (Begrenzung auf maximal 10%)
<b>Kurzbezeichnung</b>	<b>[7]</b>	<b>Eingabegrössen</b>
HeizleistungInklAbt(AT)		WP-Kennlinie inkl. Abtauung = Heizleistung inkl. Abtauung in Abhängigkeit der Aussentemp.
HeizleistungExklAbt(AT)		WP-Kennlinie exkl. Abtauung = Heizleistung exkl. Abtauung in Abhängigkeit der Aussentemp.
Energiebedarf24(AT24)		Energiekennlinie = Tages-Energiebedarf in Abhängigkeit der Aussentemp. (24-h-Mittelwerte)
MinimalPuls		Minimal-Pulslänge
WunschPuls		Wunsch-Pulslänge
WunschPause		Wunsch-Pausenlänge, in [7] WunschPause = WunschPuls
NTBeginn		Niedertarif-Beginn, in [7] fix 22.00 Uhr (könnte auch Wochentagabhängig sein)
HTBeginn		Hochtarif-Beginn, in [7] fix 07.00 Uhr (könnte auch Wochentagabhängig sein)
NTAnteil		Niedertarif-Anteil
<b>Kurzbezeichnung</b>	<b>[7]</b>	<b>Rechengrössen gemäss [7]</b>
NTLaufzeit	L	Maximal mögliche Niedertarif-Laufzeit berechnet mit Niedertarif-Sperrzeit vom Vortag
HTLaufzeit	M	Maximal mögliche Hochtarif-Laufzeit berechnet mit Hochtarif-Sperrzeit vom Vortag
Energiebedarf24	O	Tages-Energiebedarf gemäss Energiekennlinie (Niedertarif + Hochtarif)
NTenergiebedarf	P	Niedertarif-Energiebedarf
HeizleistungInklAbt	Q	Heizleistung inkl. Abtauung gemäss Wärmepumpenkennlinie
HeizleistungExklAbt		Heizleistung exkl. Abtauung gemäss Wärmepumpenkennlinie
SollLaufzeit	R	Soll-Laufzeit
PulszahlVar1	S	Pulszahl Variante 1
PulszahlVar2	T	Pulszahl Variante 2
PulszahlVar3	U	Pulszahl Variante 3
Pulszahl	V	Ausgewählte Pulszahl
Pulslänge	W	Pulslänge
Startzeit	Y	Startzeitpunkt des ersten Pulses
SollPulsEnergie		Aufsummierter Sollwert der Pulsenergie
IstPulsEnergie		Aufsummierter Istwert der Pulsenergie
WBZyklus		Wärmeberechnungs-Zyklus
NTPulszähler		Zähler für die Pulse in der Niedertarifzeit (bei Start auf null gesetzt)
HTPulszähler		Zähler für die Pulse in der Hochtarifzeit (bei Start auf null gesetzt)

*Tabelle 6: Zusammenstellung der in den Flussdiagrammen verwendeten Grössen*

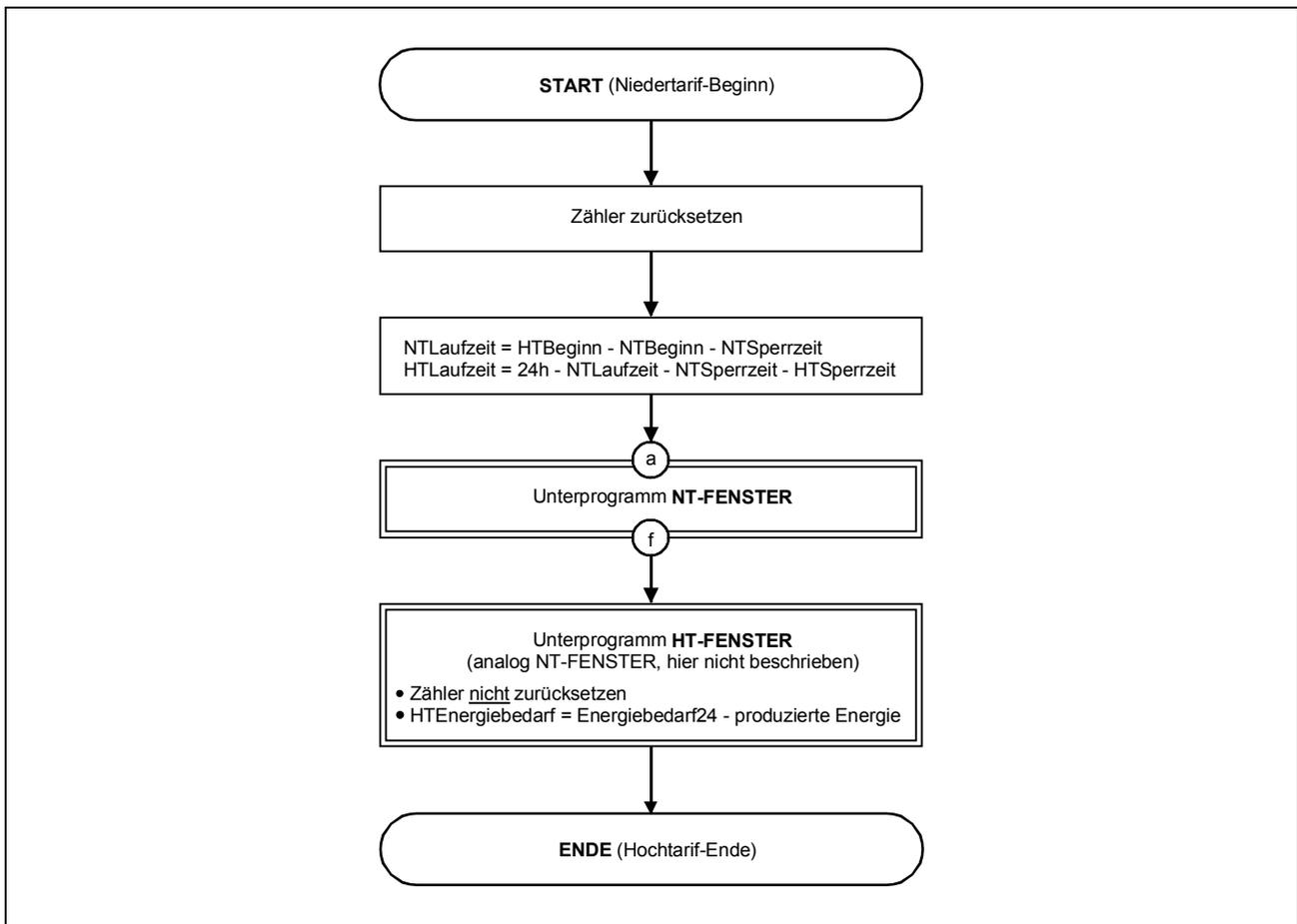


Abbildung 7: Hauptprogramm

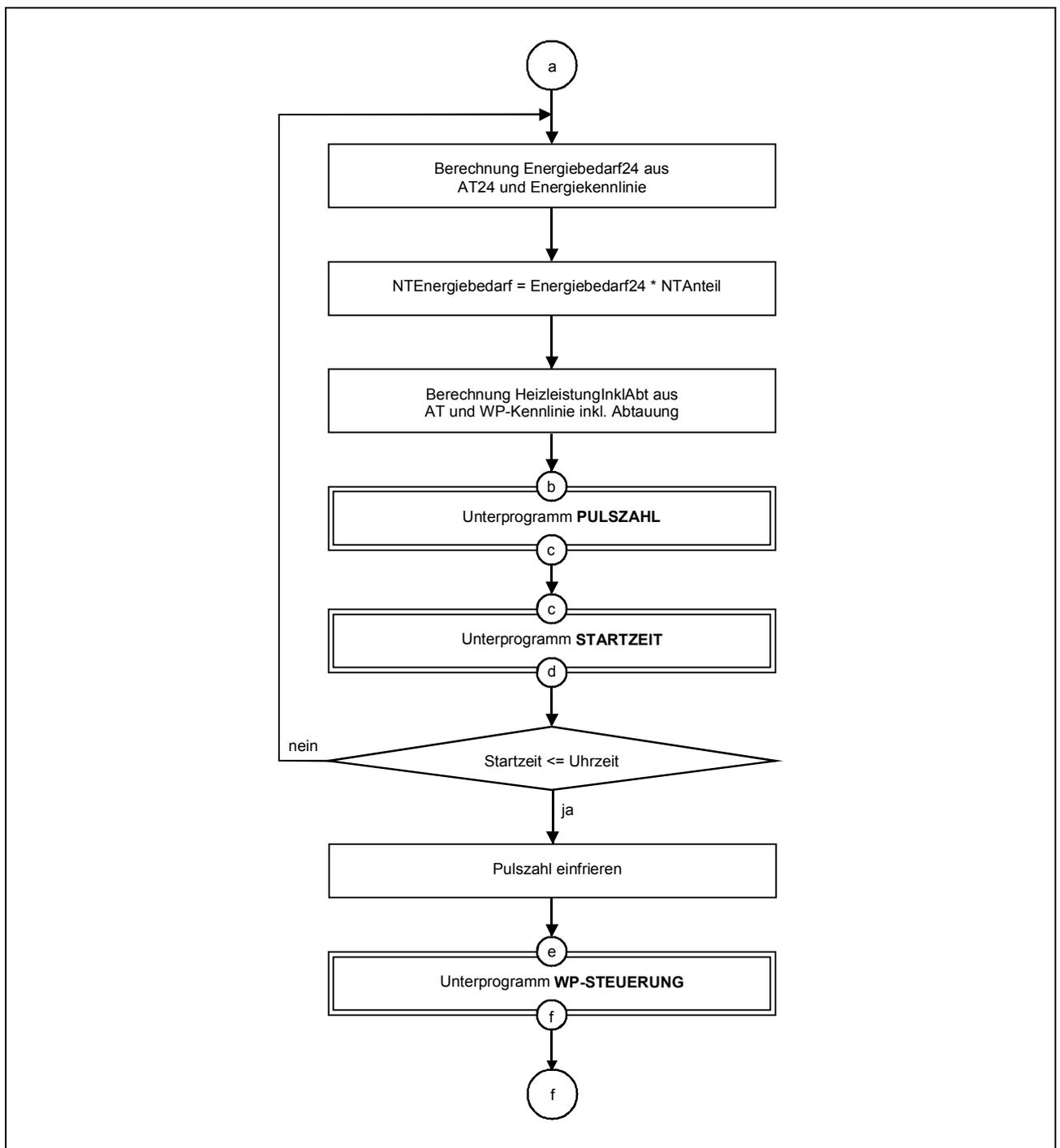


Abbildung 8: Unterprogramm«Niedertarif-Fenster»

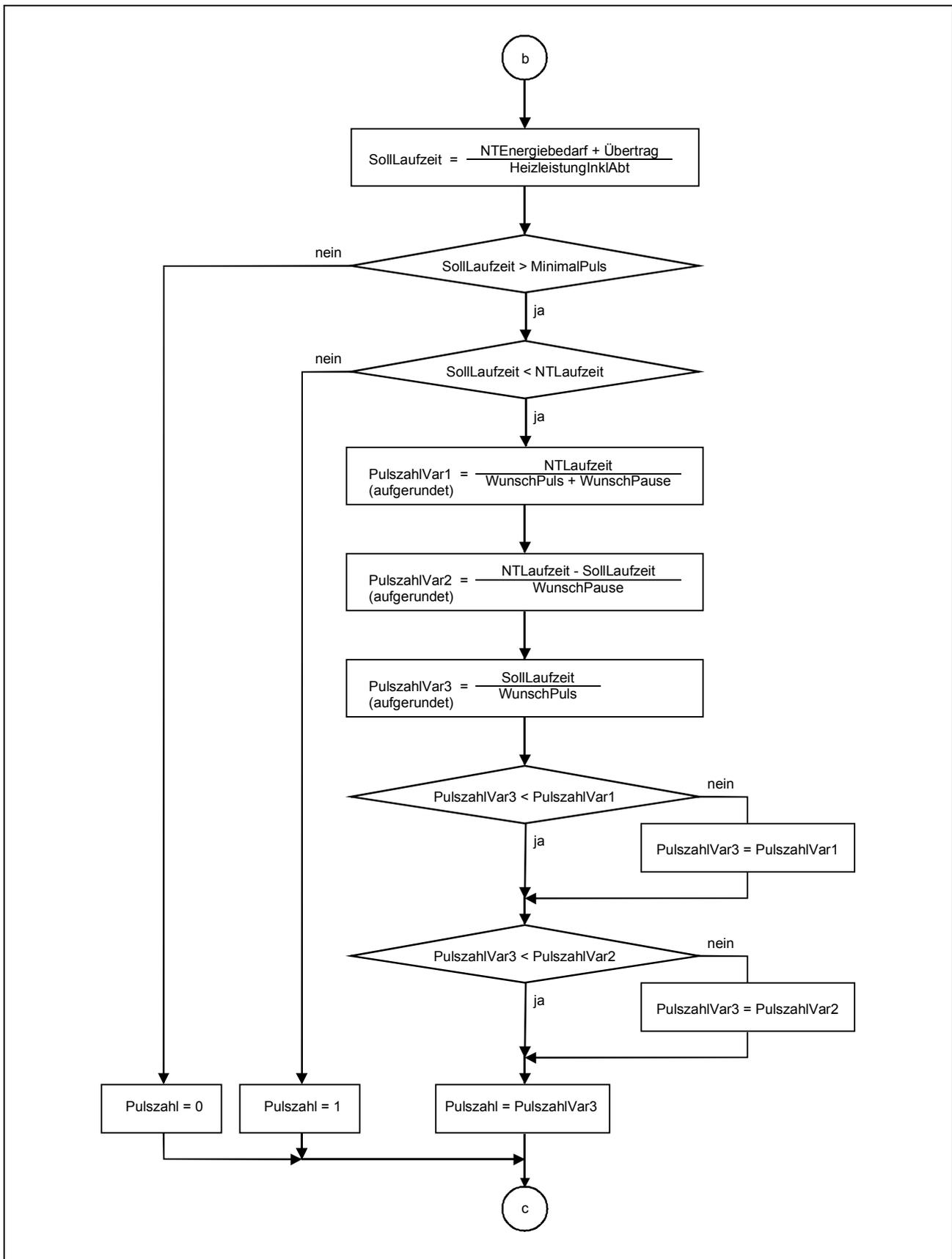


Abbildung 9: Unterprogramm «Pulszahl»

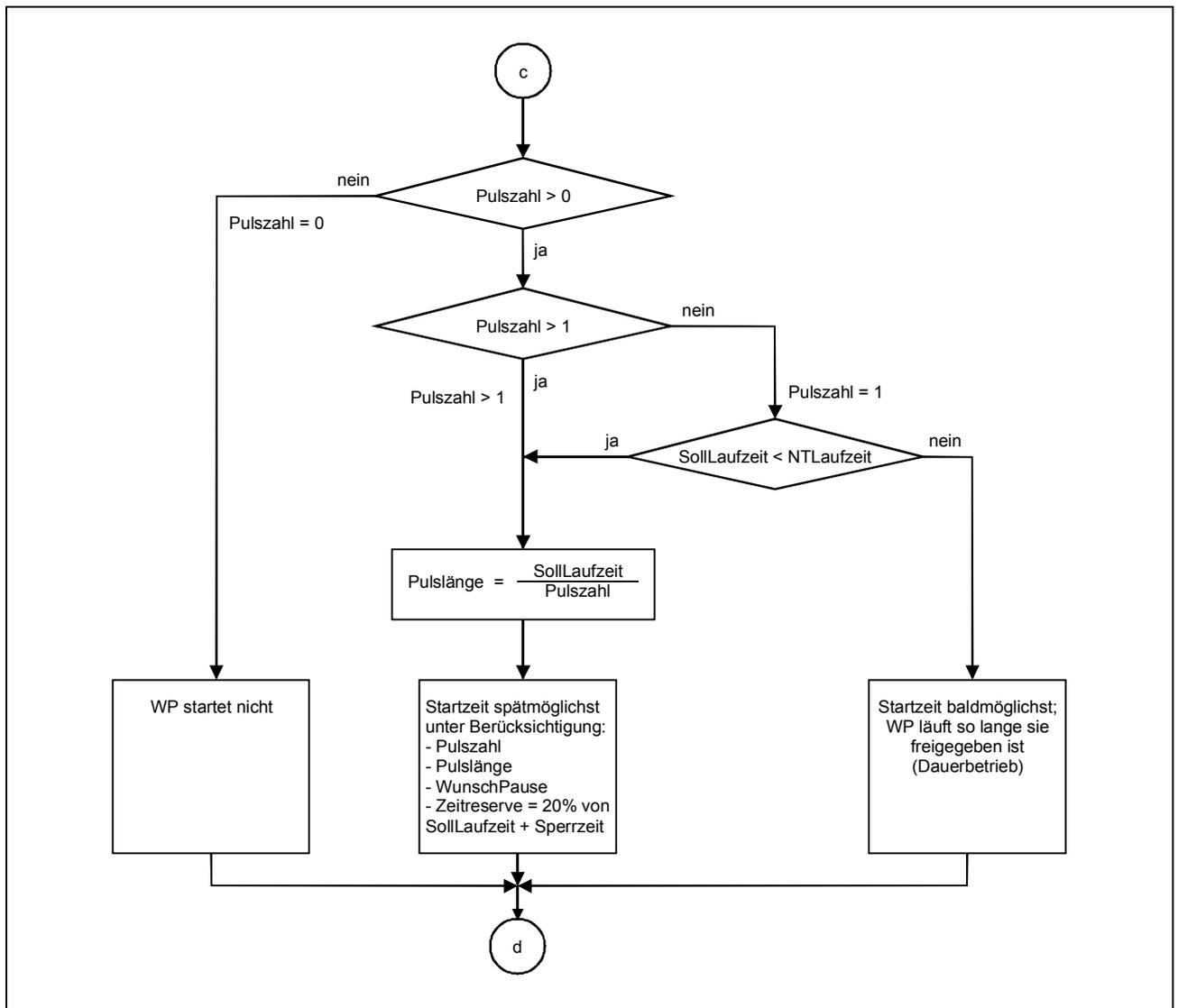


Abbildung 10: Unterprogramm «Startzeit»

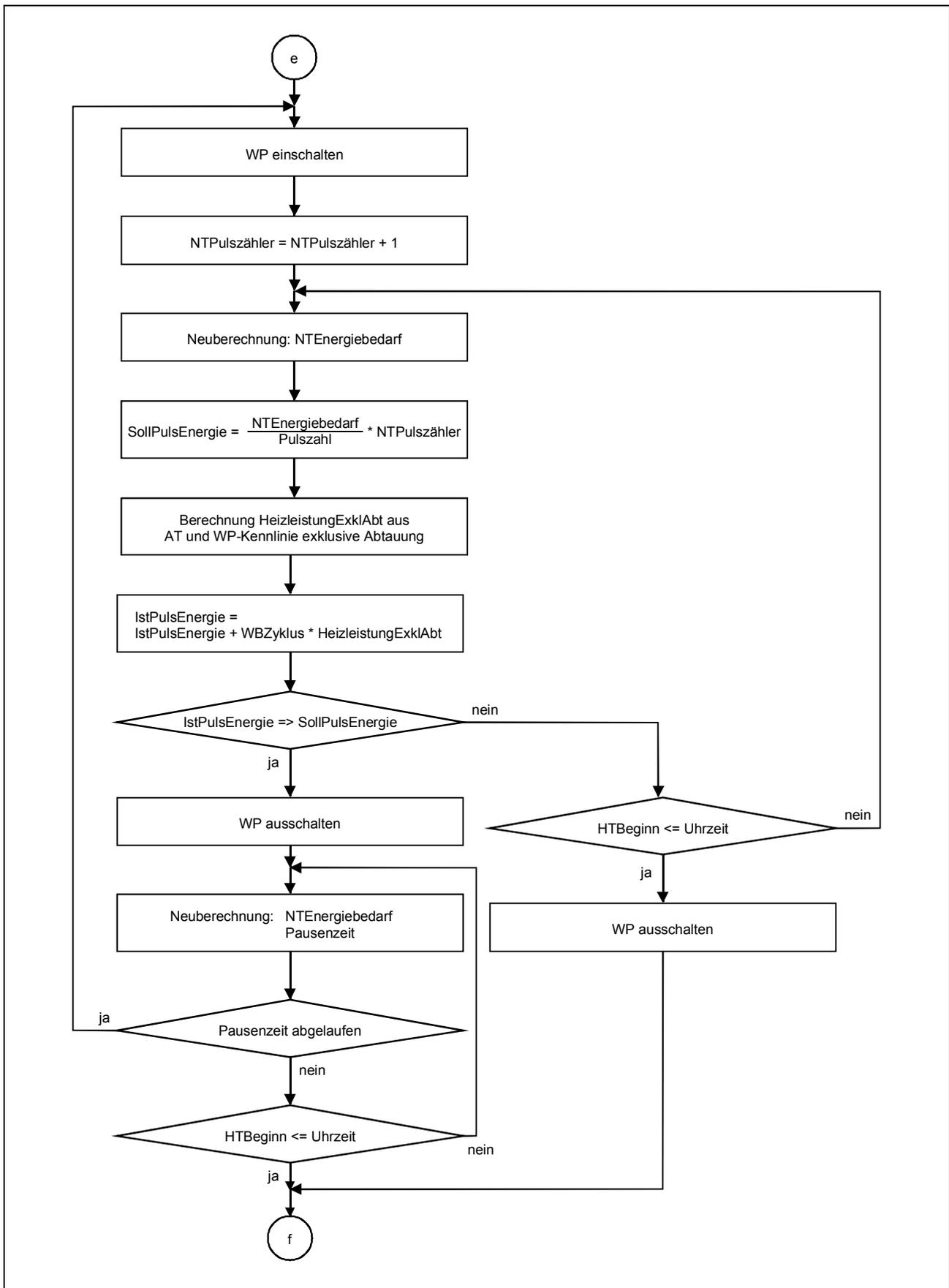


Abbildung 11: Unterprogramm «WP-Steuerung»

### 3.3 Simulationen

Mit Hilfe der in [7] beschriebenen EXCEL-Tabelle konnten einfache Simulationen über das typische Verhalten des PBM-Reglers durchgeführt werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einige Beispiele.

Den Berechnungen liegt der reale Aussentemperaturverlauf des Tages gemäss Abbildung 12 zugrunde. Im Laufe des Tages sinkt der 24-Stunden-Mittelwert der Aussentemperatur von 7°C auf 1°C.

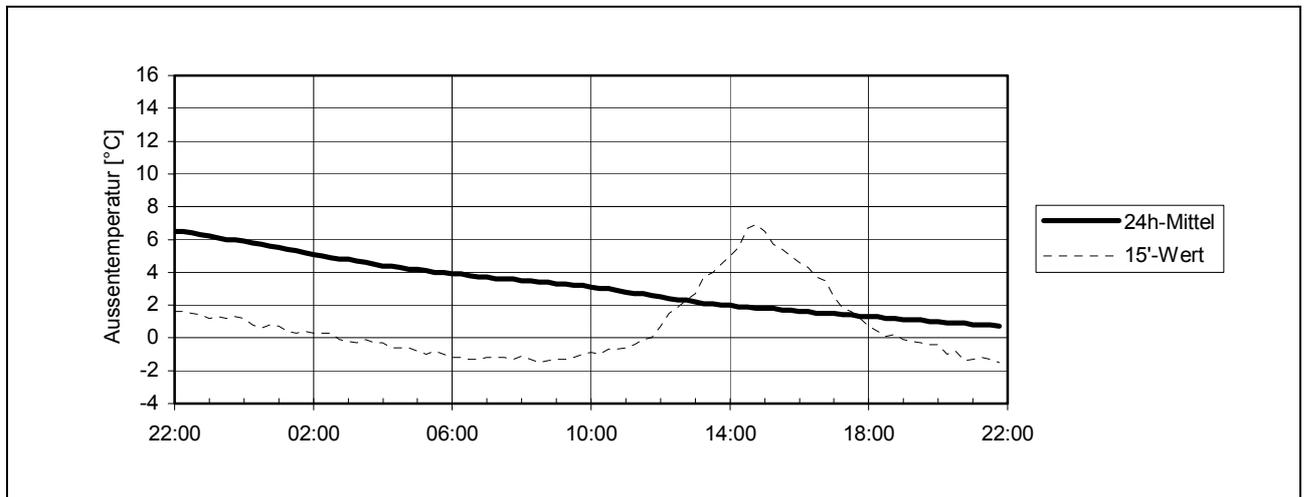


Abbildung 12: Aussentemperaturverlauf eines typischen Tages

Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigen nun das Verhalten des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers bei unterschiedlichen Einstellungen an diesem Tag. Der Sollwert der notwendigen Energiezufuhr steigt im Verlauf des Tages infolge des Temperatursturzes von 34 kWh/d auf 57 kWh/d. Es wurde eine EW-Sperre zwischen 22.00 und 24.00 Uhr angenommen.

- Abbildung 13: Typische Normaleinstellung mit 60 Minuten Wunsch-Pulslänge und 50% Niedertarifanteil. Ergibt relativ gleichmässig verteilte Pulse mit längerer Pause zu Beginn der Hochtarifzone.
- Abbildung 14: Typische Kostenspareinstellung mit 100% Niedertarifanteil. Die Wärmepumpe läuft die ganze Nacht ununterbrochen durch. Entsprechend lang wird die Pause am Morgen und kurz der Rest am Abend, der nicht mehr im Niedertarif produziert werden konnte und während des Tages noch hinzu kam (wegen des Temperatursturzes!).
- Abbildung 15: Extremeinstellung für zwei lange Pulse (50% Niedertarifanteil): Die Extremeinstellung der Wunsch-Pulslänge auf 900 Minuten hat zur Folge, dass sich nur je ein Puls am Ende der Nieder- und Hochtarifzone ergibt.

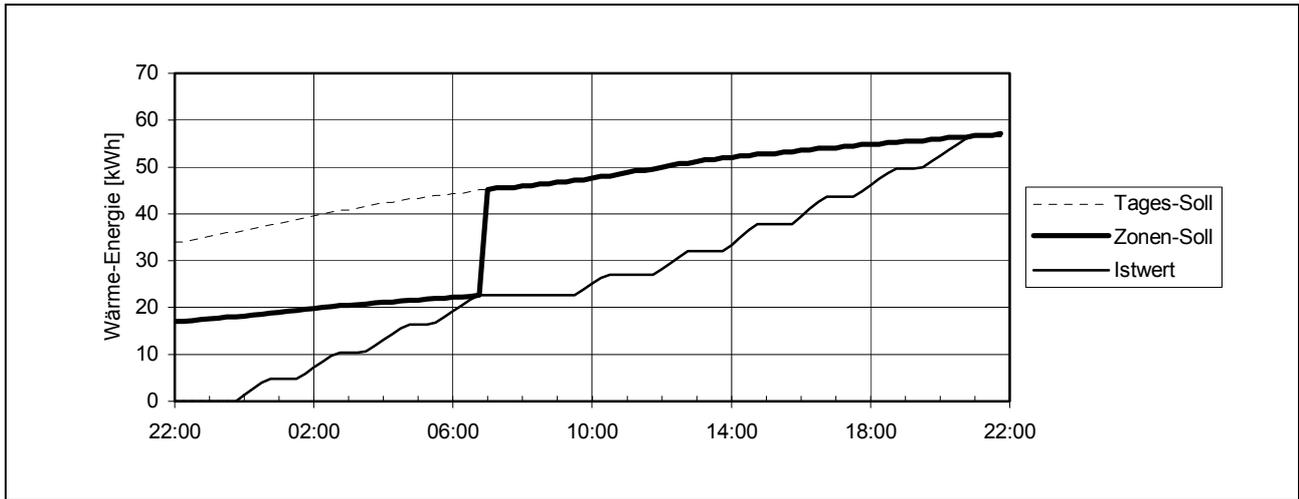


Abbildung 13: Typische Normaleinstellung

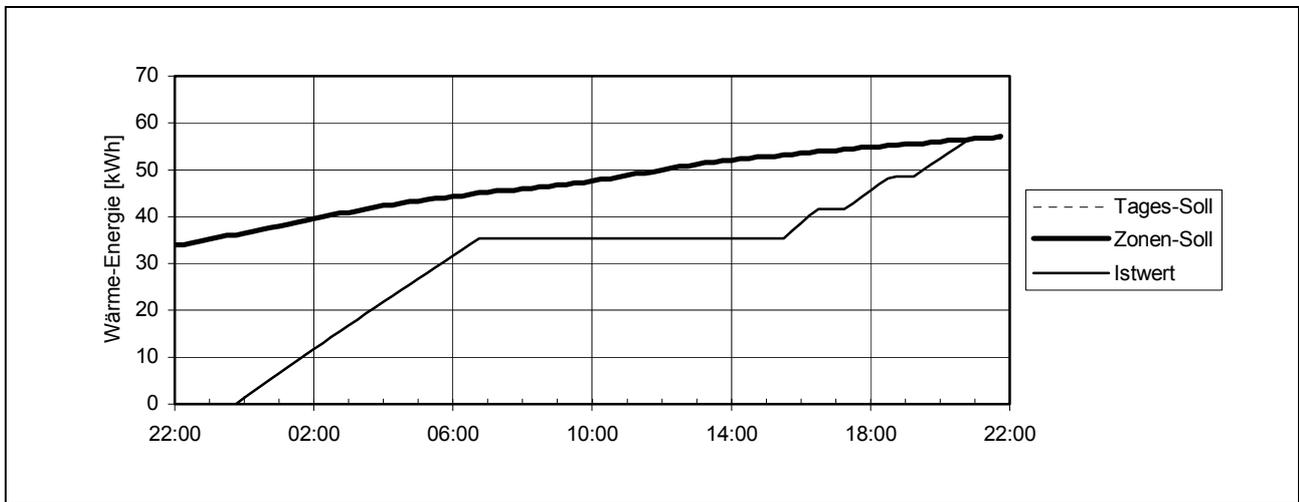


Abbildung 14: Typische Kostenspareinstellung

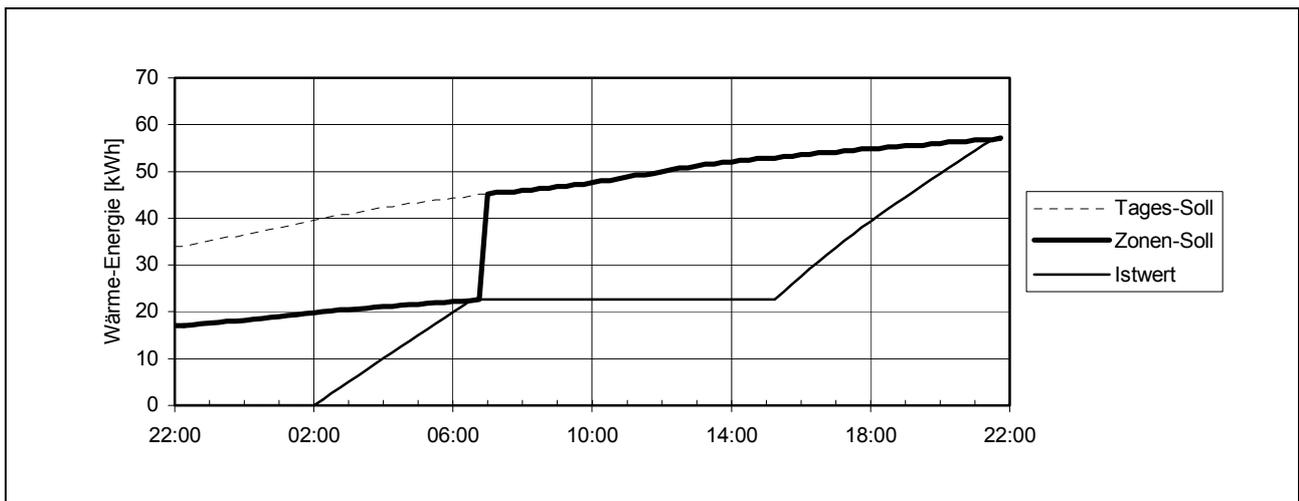


Abbildung 15: Extremeinstellung für zwei lange Pulse

## 4. Energiekennlinienbasierter PBM-Regler von Satag

### 4.1 Regelalgorithmus

Der energiekenlinienbasierte PBM-Regler von Satag wurde aufgrund von [7] realisiert und in [11] beschrieben. [11] stimmt weitgehend mit [7] und damit der Beschreibung von Kapitel 3 überein.

### 4.2 Implementierung

Die Programmierung und Implementierung des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers erfolgte durch Satag. Implementation und Tests waren Mitte März 2002 abgeschlossen.

### 4.3 Erprobung

Die Erprobung des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers von Satag erfolgte vom 17. März bis 14. April 2002.

Bei der Erprobung zeigte sich, dass der Regler zeitweise nicht wie vorgesehen arbeitete. Da der Programmentwickler beim Industriepartner nicht zur Verfügung stand, war die Behebung der Programmierfehler aufgrund einer Analyse der Messdaten leider nicht möglich. Da sich die Fehler aber offenbar teilweise kompensierten oder in der Trägheit der Anlage «untergingen», ergaben sich trotz der Mängel keine gravierenden Abweichungen der Raumtemperatur.

Im Hinblick auf die geplanten Erprobungen im Rahmen von Phase 3 sollten die Programmierfehler noch durch den Industriepartner behoben werden.

Einstellung der Zeitfenster:

- Niedertariffenster                    22.00-07.00 Uhr
- Hochtariiffenster                    07.00-22.00 Uhr

Einstellung der Energiekennlinie:

- Bei 0°C Aussentemperatur        140 kWh/d
- Steilheit                                -8,0 kWh/(d\*K)

Weitere Parameter:

- Wunsch-Pulslänge                    60 Minuten
- Anteil Niedertarif                    70 %

## 5. Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler von Siemens

### 5.1 Regelalgorithmus

Der Energiekennlinienbasierte PBM-Regler von Siemens wurde ebenfalls aufgrund von [7] realisiert. Er unterscheidet sich von [7] durch die folgenden Merkmale:

- Als Einstellgröße für den Endbenutzer wird anstelle der Energiekennlinie und der Wärmepumpenkennlinie die Wärmepumpenlaufzeit als Funktion der Aussentemperatur verwendet, im Folgenden als Laufzeitkennlinie bezeichnet
- Anstelle des 24-Stunden-Mittelwertes Verwendung der «gemischten Aussentemperatur» mit einstellbarer Gebäudezeitkonstante
- Es sind vier statt zwei Zeitfenster definierbar, in welche die Energiepulse verteilt werden

### 5.2 Implementierung

#### 5.2.1 PBM-Prototypregler



Abbildung 16: RVP300

Als Ausgangsbasis für die Entwicklung des PBM-Prototypreglers wurde der Regler RVP300 verwendet, eigentlich ein Kesseltemperaturregler mit Mischerheizkreis und Brauchwasserbereitung (Abbildung 16).

Eine Randbedingung für die Entwicklung des PBM-Prototypreglers war die möglichst weitgehende Verwendung der bestehenden Hardware, Softwarekonzepte und Bedienkonzepte. Aus diesem Grunde wurden gewisse Anpassungen am vorgegebenen Reglerentwurf [7] vorgenommen und auch gewisse Einschränkungen in Kauf genommen:

- Beschränkung auf die vorhandenen Ein- und Ausgänge (5 Fühlereingänge, 1 digitales Raumgerät, 4 digitale Eingänge, 11 Relaisausgänge)
- Verwendung der «gemischten Aussentemperatur» mit einstellbarer Gebäudezeitkonstante anstelle des 24-Stunden-Mittelwertes
- Der Anschluss eines Raumtemperaturfühlers soll weiterhin möglich sein (Raumtemperatureinfluss mit Wirkung auf die Energiekennlinie bzw. die Laufzeitkennlinie)
- Einfache Raumtemperatursollwertkorrektur mit Drehknopf
- Auch die Brauchwasserladung mit Ladepumpe soll weiterhin möglich sein

Auf die Implementierung einer Abtaustuerung wurde verzichtet. Aus diesem Grunde wurde für die Erprobung die Schnittstelle zwischen Siemens-Regler und Wärmepumpe so ausgestaltet, dass die Abtaustuerung weiterhin vom Satag-Regler ausgeführt wurde.

#### 5.2.2 Laufzeitkennlinie statt Energiekennlinie

Mit der Kenntnis der Wärmepumpenkennlinie und der Energiekennlinie kann der PBM-Regler die Laufzeit selbständig berechnen. Einstellbar sind in diesem Falle die Wärmepumpenkennlinie und die gebäudespezifische Energiekennlinie. Wenn der Wärmepumpenhersteller seine Kennlinie genau kennt, kann diese bereits auf dem Regler eingestellt werden, so dass sich der Installateur nur noch um die Einstellung der Energiekennlinie bemühen muss.

Wenn die Wärmepumpenkennlinie jedoch nicht voreingestellt ist, bedingt deren Einstellung und die Einstellung der Energiekennlinie einen höheren Einstellaufwand. Auch allfällige Korrekturen, welche im Laufe des Betriebs durch den Endbenutzer vorgenommen werden müssen, sind nicht unbe-

dingt einfach zu erklären («Was soll wo verändert werden?»). Aus diesem Grunde wurde der Ansatz verfolgt, anstelle der Energiekennlinie und der Wärmepumpenkennlinie die Laufzeitkennlinie als Einstellgrösse zu verwenden, wobei die Laufzeit wie folgt definiert ist:

$$\text{Laufzeit [h/d]} = \frac{\text{Wärmebedarf aus Energiekennlinie [kWh/d]}}{\text{Heizleistung aus Wärmepumpenkennlinie [kW]}}$$

Wie bei der herkömmlichen Heizkurve kann die Laufzeitkennlinie bei verschiedenen Aussentemperaturen definiert werden. Bei der vorliegenden Ausführung kann sie durch vier bzw. fünf Punkte eingestellt werden: vier einstellbare Aussentemperaturen mit den entsprechenden Laufzeiten und die Heizgrenze, wo die WP nicht mehr laufen soll (Abbildung 17).

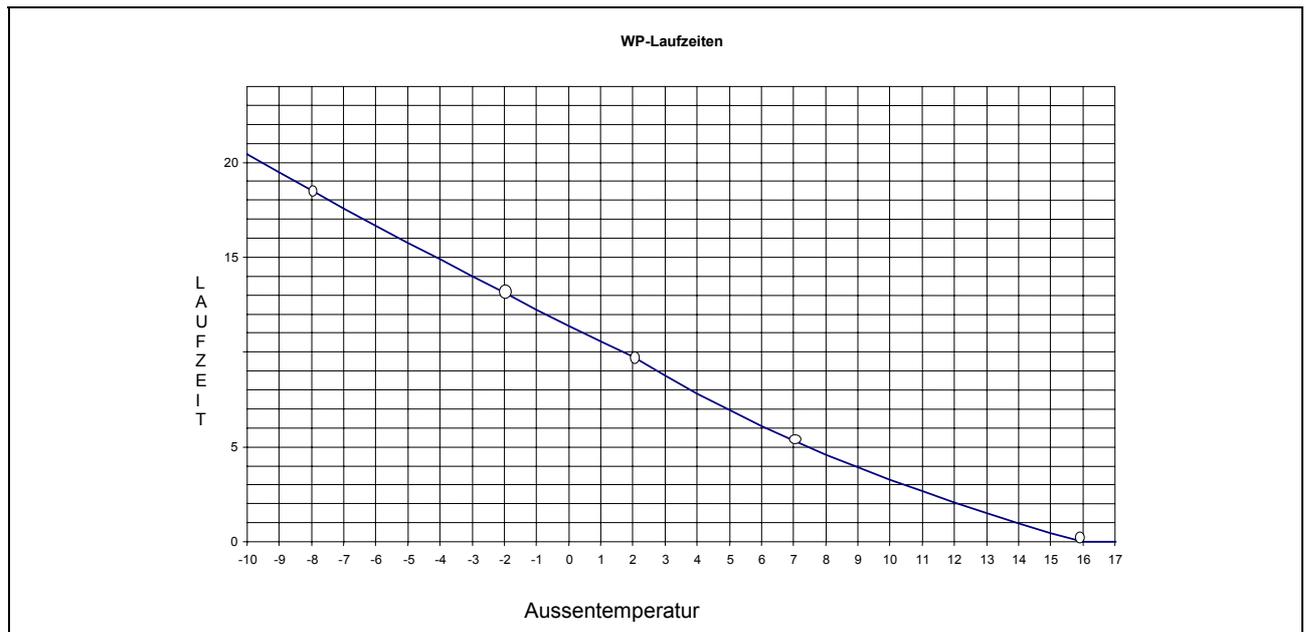


Abbildung 17: Laufzeitkennlinie

Die Laufzeitkennlinie gilt für einen Raumtemperatursollwert von 20°C. Durch die Veränderung des Raumtemperatursollwertes am Drehknopf kann der Endbenutzer auf einfache Weise die Raumtemperatur anpassen, ohne dass er an der Laufzeitkennlinie eine Änderung vornehmen muss. Eine Raumtemperatursollwertkorrektur entspricht einer Parallelverschiebung der Energiekennlinie und wird vom Regler in eine entsprechende Verschiebung der Laufzeitkennlinie umgerechnet.

Wenn die Raumtemperatur nur bei hohen oder nur bei tiefen Aussentemperaturen nicht eingehalten wird, muss die Korrektur – wie bei der Heizkurve – an der Laufzeitkennlinie vorgenommen werden.

### 5.2.3 Aufteilung der Pulse auf 4 Zeitfenster

Der Tag kann in 4 Zeitfenster eingeteilt werden, wobei jedem Fenster ein Soll-Energieanteil bzw. Laufzeitanteil in Prozent zugeordnet werden kann. So kann die Verteilung der Pulse den Kosten- und Komfortbedürfnissen des Endbenutzers einfach angepasst werden.

Zusätzliche Einstellparameter sind:

- Wunsch-Pulslänge
- Wunsch-Pausenlänge
- Minimal-Pulslänge
- Minimal-Pausenlänge

Aufgrund der Energieanteile pro Zeitfenster und der zusätzlichen Einstellparameter werden die notwendigen Pulse in die vier Zeitfenster verteilt. Die Abtaufunktion kann die Ausführung der Pulse zu beliebigen Zeiten unterbrechen, wobei dies vom Regler erkannt wird, und der noch fehlende Puls wird gleich anschliessend an die Abtaufunktion ausgeführt. In der folgenden Pause werden die Anzahl der Pulse und die Pulsdauer neu berechnet.

Auf der Kleinspannungsseite wurden die folgenden Ein- und Ausgänge verwendet:

- Aussentemperaturfühler
- Vorlauftemperaturfühler (zur Begrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur)
- Rücklauftemperaturfühler (für konventionelle Rücklauftemperaturregelung mit Heizkurve)
- Brauchwassertemperaturfühler
- Soletemperaturfühler
- Raumgeräteanschluss (Draht oder Funk)
- Hochdruckwächter
- EW-Sperre
- Durchflusswächter Sole
- Rückmeldung «Verdichter läuft auf Heizbetrieb»

Und auf der Netzspannungsseite:

- Wärmepumpe Stufe 1
- Wärmepumpe Stufe 2
- Heizkreispumpe
- Brauchwasserladepumpe
- Solepumpe

#### **5.2.4 Abweichungen gegenüber dem Flussdiagramm in Kapitel 3**

■ Wie bereits mehrfach erwähnt, wird an Stelle der Energiekennlinie und der Wärmepumpenkennlinie die Laufzeitkennlinie verwendet. Die eingestellte Laufzeit entspricht der Laufzeit ohne Abtauung. Da die Rückmeldung «Verdichter läuft auf Heizbetrieb» auf den Regler zurückgeführt wird, wird ein durch die Abtauung (oder durch eine Störung) unterbrochener Puls erkannt. Die fehlende Laufzeit wird nach Abschluss der Abtaufunktion ausgeführt.

■ Anstelle des 24-Stunden-Mittelwertes wird die sogenannte «gemischte Aussentemperatur» verwendet, welche sich aus dem Mittelwert der aktuellen Aussentemperatur und der gedämpften Aussentemperatur mit einstellbarer Zeitkonstante und einstellbarem Mischverhältnis errechnet (Abbildung 19). Die Laufzeitberechnung erfolgt kontinuierlich. Veränderungen in der Aussentemperatur werden laufend berücksichtigt, indem die ausgeführten Pulse laufend der «gemischten Aussentemperatur» angepasst werden.

■ Im Gegensatz zum Flussdiagramm im Kapitel 3 wird nur ein gestarteter Puls eingefroren, die Pulszahl innerhalb eines Fensters jedoch nicht. Nach dem Abschluss eines Pulses wird in der Pausenzeit die Zahl und die Zeitdauer der noch auszugebenden Pulse neu berechnet. Aus diesem Grunde sind Unterbrechungen durch die Abtaufunktion, durch eine Brauchwasserladung oder eine EW-Sperre nicht sehr störend.

■ Zum Beginn des vierten Fensters (auf der Referenzanlage um 22 Uhr) erfolgt der Übertrag der fehlenden Laufzeit «auf den nächsten Tag». Dieser Übertrag ist auf 240 Minuten begrenzt um ein «Wind-Up» zu verhindern.

■ Gemäss Flussdiagramm im Kapitel 3 wird für die Startzeitberechnung eines Pulses eine Zeitreserve von 20% eingerechnet. In der vorliegenden Implementierung wird keine Zeitreserve vorgehalten. Fehlende Laufzeit wird «unbegrenzt» ins nächste Fenster übertragen und auch dort ausgeführt.

■ Anstelle eines Niedertarif-Fensters und eines Hochtarif-Fensters sind vier Zeitfenster mit einstellbarem Laufzeitanteil einstellbar. Durch die Wahl eines kleinen Laufzeitanteils, kann ein Fenster definiert werden, welches nur wenige Pulse zulässt, wenn die gewünschte Laufzeit in den andern Fenstern Platz findet. Durch die Einstellung von 0% kann sogar ein Fenster definiert werden, in welchem die Wärmepumpe nie läuft. (z. B. bei bekannter EW-Sperrzeit).

Das Flussdiagramm in Abbildung 18 zeigt die Berechnung der Pulszahl und des Einschaltzeitpunktes in einem Fenster.

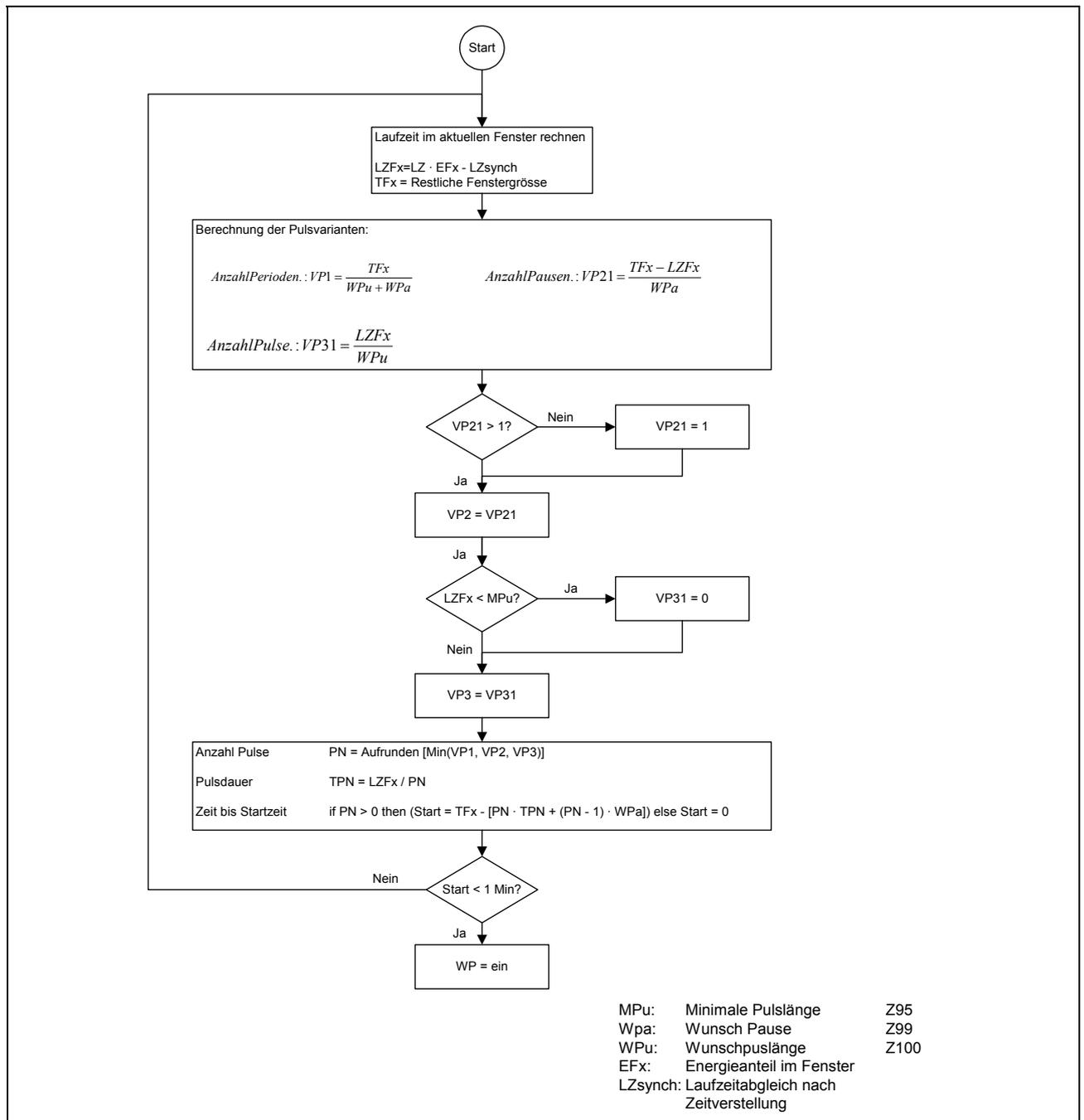


Abbildung 18: Berechnung Pulszahl und Einschaltzeitpunkt. Hinweis: Das Flussdiagramm stimmt weitgehend mit Abbildung 9 und Abbildung 10 überein. Zu beachten ist jedoch, dass  $TFx$  hier die restliche Fenstergröße ist, während in Abbildung 9 hier die maximal mögliche NT-Laufzeit einzusetzen ist.

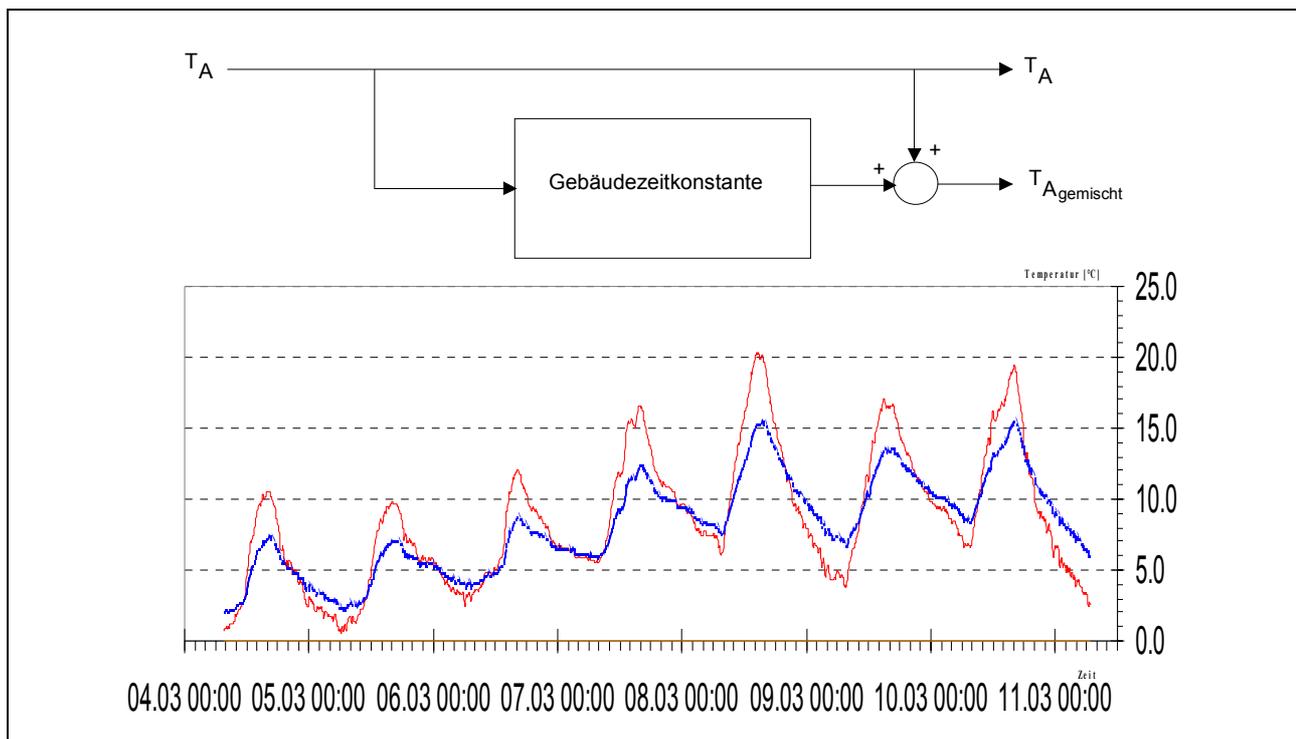


Abbildung 19: Die ungedämpfte Kurve zeigt den Momentanwert der Aussentemperatur und die gedämpfte Kurve die «gemischte Aussentemperatur»

### 5.3 Erprobung

Die Erprobung des Siemens-Reglers erfolgte vom 24. Januar bis 28. Februar 2002 und nochmals vom 15. bis 30. April 2002. Der Regler arbeitete immer einwandfrei.

Einstellung der Zeitfenster und des Laufzeitanteils:

– Fenster 1	07:00 – 12:00	10 %
– Fenster 2	12:00 – 17:00	10 %
– Fenster 3	17:00 – 22:00	10 %
– Fenster 4	22:00 – 07:00	70 %

Einstellung der Laufzeitkennlinie:

– Heizgrenze	16°C	(0h)
– Stützpunkt 1	7°C	5:20 h
– Stützpunkt 2	2°C	9:45 h
– Stützpunkt 3	-3°C	14:00 h
– Stützpunkt 4	-8°C	18:30 h

Weitere Parameter:

– Wunsch-Pulslänge	80 min
– Wunsch-Pausenlänge	60 min
– Minimal-Pulslänge	15 min
– Minimal-Pausenlänge	20 min
– Vorlaufzeit Pumpe vor Einschalten Verdichter	30 sec
– Begrenzung Verflüssiger-Austrittstemperatur	60°C
– Pumpennachlaufzeit	1 min
– Gebäudezeitkonstante «gemischte Aussentemperatur»	20 h
– Mischungsverhältnis	50/50%

## 6. Modellbasierte PBM

### 6.1 Generelles Konzept

Der modellbasierte PBM-Regler berücksichtigt als einziger Regler durch ein semiphysikalisches Modell die thermische Tägheit des Wärmeabgabesystems und des Gebäudes sowohl für eine Optimierung der vom Haus benötigten Wärmepakete als auch für deren optimale Verteilung über der Zeit in Abhängigkeit des prädiktierten Aussenlufttemperaturverlaufs.

Die im modellbasierten PBM-Regler verwendete Methode wird als LQ-MPC bezeichnet. Dabei steht MPC für modellbasierte prädiktive Regelung (Model Predictive Control) während LQ darauf hinweist, dass das verwendete physikalische Modell durch ein lineares (L) Differentialgleichungssystem beschrieben wird und dass das Optimierungskriterium quadratisch (Q) ist. Dieses Verfahren wurde bereits im Schlussbericht der Phase 1 dieses Projekts beschrieben [4]. Eine für die vorliegende Phase 2 des Projekts aktuelle Beschreibung des Verfahrens wurde in [10] und [12] veröffentlicht. die nachfolgend auch kurz vorgestellt wird.

Das implementierte Reglermodul besteht aus vier Hauptteilen: Beobachter, Wettervorhersage, LQ-MPC und Pulsbreitenmodulation. Sie werden weiter unten in den Abschnitten 6.4 bis 6.7 beschrieben. In Abschnitt 6.2 wird zunächst das Hausmodell vorgestellt, das einerseits für den Entwurf des Beobachters und andererseits für den LQ-MPC-Algorithmus verwendet wird. In Abschnitt 6.3 wird ausserdem gezeigt, dass dieses Hausmodell gemeinsam mit einem einfachen Wärmepumpenmodell für die Optimierung der in der Pulsbreitenmodulation (Abschnitt 6.7) verwendeten Periodendauer herangezogen werden kann.

### 6.2 Hausmodell

Für die Erstellung des Hausmodelles wurde die im Projekt «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen» [6] entwickelte Modellierung übernommen. Das verwendete Hausmodell besteht aus drei thermischen Speichern: Das Heizungswasser in den Rohren mit der Rücklaufstemperatur  $\vartheta_{RL}$  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:

$$\rho_W V_{HCW} \cdot \dot{\vartheta}_{RL}(t) = \dot{Q}_{FB}^*(t) - \dot{Q}_{WB}^*(t),$$

$$\rho_B V_{BCB} \cdot \dot{\vartheta}_B(t) = \dot{Q}_{WGB}^*(t) - \dot{Q}_{WB}^*(t) - \dot{Q}_{BR}^*(t),$$

$$\rho_G V_{GCG} \cdot \dot{\vartheta}_R(t) = \dot{Q}_{WGR}^*(t) - \dot{Q}_{BR}^*(t) - \dot{Q}_{RA}^*(t).$$

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:

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

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

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

Die äusseren und die inneren Wärmestromgewinne im Raum  $\dot{Q}_{WGR}^*(t)$  und im Boden  $\dot{Q}_{WGB}^*(t)$  stellen gemeinsam mit der Aussenlufttemperatur  $\vartheta_L(t)$  die Störgrössen dieses Systems dar. Der aufgrund der Enthalpiedifferenz abgegebene Wärmestrom  $\dot{Q}_{FB}(t)$  wird direkt als Steuergrösse betrachtet. Er wird durch die Vorlauftemperatur  $\vartheta_{VL}(t)$ , die Rücklauftemperatur  $\vartheta_{RL}(t)$  und den Umwälzvolumenstrom  $V_H(t)$  wie folgt bestimmt:

$$\dot{Q}_{FB}^* (t) = \rho_W \dot{V}_H(t) c_W \cdot [\vartheta_{VL}(t) - \vartheta_{RL}(t)]$$

Das durch die obigen drei gekoppelten Differentialgleichungen beschriebene Modell wird nachfolgend für das Generieren des modellbasierten PBM-Regleralgorithmus (vgl. Kapitel 6.5) als Zustandsraummodell dargestellt:

$$\dot{x}(t) = \tilde{A} \cdot x(t) + \tilde{B}_u \cdot u(t) + \tilde{B}_{z1} \cdot z_1(t) + \tilde{B}_{z2} \cdot z_2(t) + \tilde{B}_{z3} \cdot z_3(t),$$

$$y(t) = C \cdot x(t),$$

mit

$$u(t) = \dot{Q}_{FB}^* (t) : \text{Steuergrösse,}$$

$$z_1(t) = \vartheta_L(t), \quad z_2(t) = \dot{Q}_{WGB}^* (t) \quad \text{und} \quad z_3(t) = \dot{Q}_{WGR}^* (t) : \text{Störgrössen,}$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} \vartheta_{RL}(t) \\ \vartheta_B(t) \\ \vartheta_R(t) \end{bmatrix} : \text{Zustandsvektor, } y(t) = \vartheta_R(t) : \text{Ausgangsgrösse}$$

und die Systemmatrizen:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\kappa_{WB}}{\rho_W V_{HCW}} & \frac{\kappa_{WB}}{\rho_W V_{HCW}} & 0 \\ \frac{\kappa_{WB}}{\rho_B V_{BCB}} & -\frac{(\kappa_{WB} + \kappa_{BR})}{\rho_B V_{BCB}} & \frac{\kappa_{BR}}{\rho_B V_{BCB}} \\ 0 & \frac{\kappa_{BR}}{\kappa_{RA}} \cdot \frac{1}{T_G} & \frac{1}{\kappa_{RA} \cdot T_G} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_u = \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_W V_{HCW}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B}_{z1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_G} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_{z2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho_B V_B c_B} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \tilde{B}_{z3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{K_{RA} \cdot \tau_G} \end{bmatrix}.$$

Dabei wurde die Zeitkonstante des Gebäudes als

$$\tau_G = \frac{\rho_G V_G c_G}{K_{RA}}$$

eingeführt.

Obwohl das Testobjekt eine Kombination von Fussbodenheizung und Heizkörperheizung besitzt, genügt das oben angegebene Modell dritter Ordnung ohne getrennte Modellierung der zwei Wärmeabgabesysteme zur Beschreibung des thermischen Verhaltens.

### 6.3 Optimierung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation

Um die optimale Laufzeit und damit die optimale Periodendauer der Pulsbreitenmodulation zu ermitteln, wurden Simulationen mit dem im vorigen Kapitel vorgestellten Hausmodell und einem einfachen Wärmepumpenmodell durchgeführt. Dabei wurde das statische Verhalten der Wärmepumpe durch die vom Hersteller gelieferten Kennlinien für die Heizleistung resp. für die elektrische Leistungsaufnahme in Funktion von Aussenlufttemperatur und Kondensatoraustrittstemperatur modelliert. Das dynamische Verhalten der Wärmeabgabe wurde durch ein Verzögerungselement erster Ordnung beschrieben (Zeitkonstante 60 s), während für die elektrische Leistungsaufnahme ein Verhalten ohne Dynamik angesetzt wurde.

Bei konstanter Aussenlufttemperatur steigt nach dem Einschalten der Wärmepumpe die Verflüssiger-Austrittstemperatur langsam an. Dadurch erhöht sich gemäss Wärmepumpenkennlinie die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Leistung ebenfalls langsam, während der abgegebene Wärmestrom der Wärmepumpe nach relativ kurzer Zeit (ca. 60 s) den stationären Betrieb erreicht. Die momentane Leistungszahl  $\varepsilon(t)$  (vgl. Abbildung 20) erreicht dadurch schon nach kurzer Zeit sein Maximum (mit ‘\*’ markiert).

Der energetische Wirkungsgrad  $\eta(t)$ , welcher im Hinblick auf einer Maximierung der Arbeitszahl für die optimale Laufzeit massgebend ist, erreicht jedoch erst nach längerer Zeit den höchsten Wert (mit ‘x’ markiert) und verläuft relativ flach an dieser Stelle.

Weitere Simulationen für verschiedene Aussenlufttemperaturen ergeben dann die in Abbildung 21 dargestellte energetisch optimale Laufzeit  $\Delta t_{on,opt}$  in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur. In der gleichen Abbildung ist auch die zugehörige optimale Periodendauer  $\Delta t_{peri,opt}$  dargestellt, die gemäss folgender Beziehung berechnet wurde:

$$\Delta t_{peri,opt}(\vartheta_L) \cdot \dot{Q}_{Bed}^*(\vartheta_L) = \Delta t_{on,opt}(\vartheta_L) \cdot \dot{Q}_{WP}^*(\vartheta_L).$$

Dabei ist  $\dot{Q}_{Bed}^*(\vartheta_L)$  der bei konstanter Aussentemperatur  $\vartheta_L$  vom Haus benötigte Wärmestrom zur Erhaltung einer konstanten Raumtemperatur und  $\dot{Q}_{WP}^*(\vartheta_L)$  der von der Wärmepumpe bei  $\vartheta_L$  gelieferte Wärmestrom. Da diese Wärmeleistung nicht gemessen wird, aber sowohl für die Pulsbrei-

tenmodulation als auch für den Beobachter (siehe Kapitel 6.4) gebraucht wird, muss sie aus den Kenndaten der Wärmepumpe bestimmt werden. Da die Aussen- und die Vorlauftemperatur bekannt sind, ist dies möglich, sofern die Kenndaten mit den tatsächlichen Leistungen übereinstimmen.

Zur Zeit ist aus Implementationsgründen eine Pulsbreitenmodulation mit variabler Periodendauer noch nicht möglich. Daher wurde die Periodendauer fest auf zwei Stunden eingestellt. Der Grund für diese Wahl ist der flache Verlauf um und nach dem optimalen Wert für die Laufzeit.

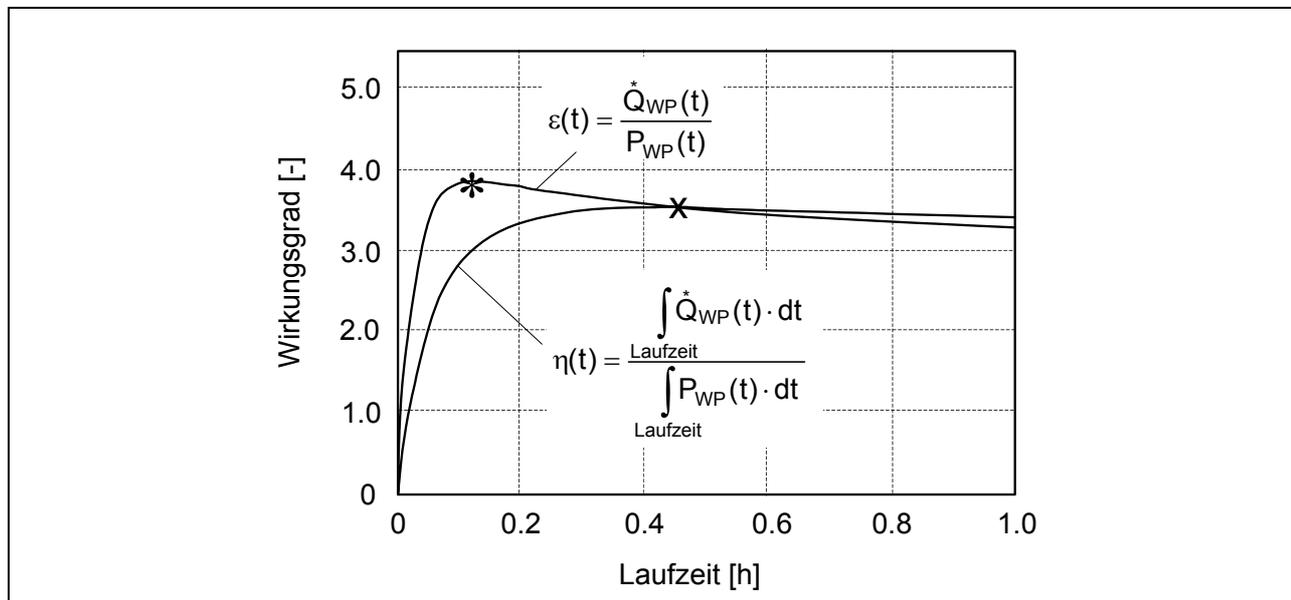


Abbildung 20: Verlauf von Leistungszahl (COP)  $\varepsilon(t)$  und energetischem Wirkungsgrad  $\eta(t)$  nach dem Einschalten der Wärmepumpe für eine konstante Aussenlufttemperatur

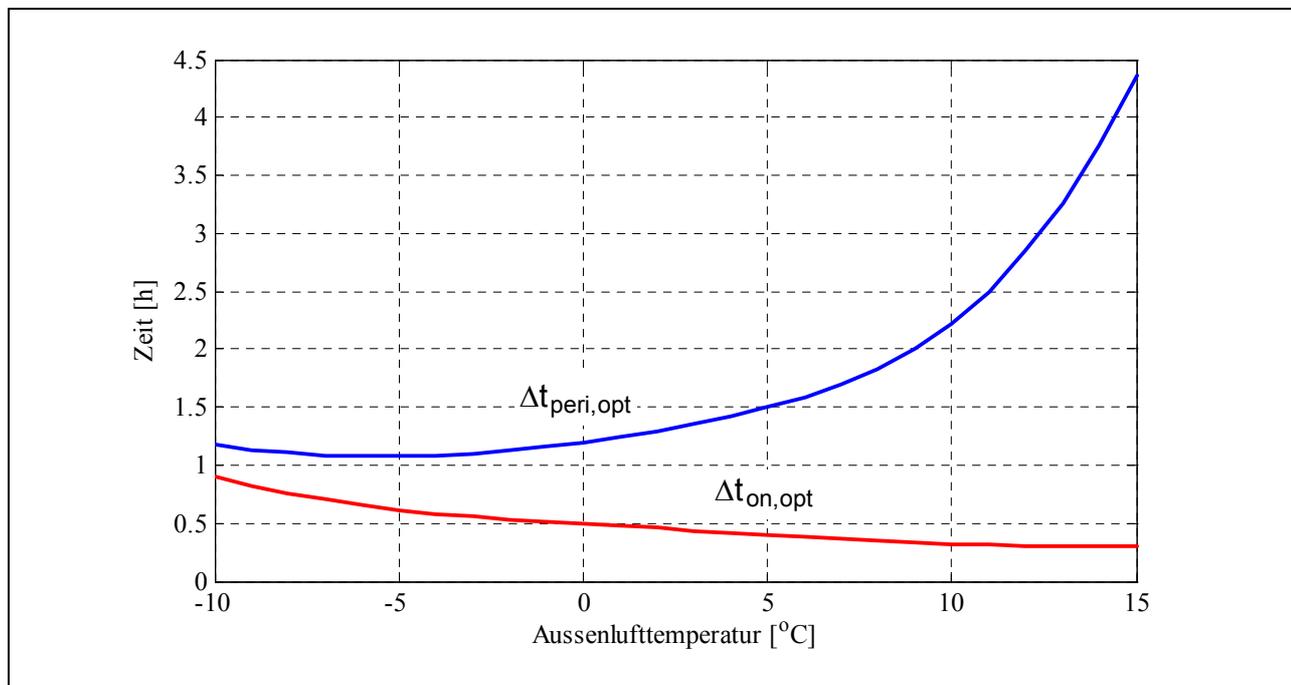


Abbildung 21: Optimale Laufzeit und Periodendauer der Wärmepumpe

## 6.4 Beobachter

Für den verwendeten Optimierungsalgorithmus ist es notwendig, dass alle Zustandsgrößen (Rücklauf-, Fussboden- und Raumtemperatur) verfügbar sind. Da aber nur die Rücklauf-temperatur gemessen wird, muss mit einem Beobachter die fehlenden Größen berechnet werden. Dazu wird ein Kalmanfilter verwendet [8]. Dieses benutzt das Systemmodell, um aus der gemessenen Rücklauf- und Aussentemperatur sowie der geschätzten Wärmeleistung der Wärmepumpe die fehlenden Größen zu bestimmen. Eingestellt wurde das Filter so, dass für Messdaten die beobachtete Raumtemperatur möglichst gut mit der Messung übereinstimmt. Dazu ist es nötig, dass der Beobachter mit einer kürzeren Taktzeit läuft als die Optimierung. Als Taktzeit wurde eine Minute gewählt.

## 6.5 Wettervorhersage

Für die Vorhersage des Aussentemperaturverlaufes wird das in [4] beschriebene Prinzip verwendet: Der zukünftige Verlauf ist gleich wie der Verlauf der letzten 24 Stunden. Korrigiert wird die so erhaltene Prognose mit einer Parallelverschiebung der Kurve so, dass die vorhergesagte Temperatur für den momentanen Zeitpunkt gleich der wirklichen, gemessenen Temperatur ist:

$$\hat{\vartheta}_L(t_k) = \vartheta_L(t_k - 24h) + [\vartheta_L(t_0) - \vartheta_L(t_0 - 24h)],$$

wobei  $t_0$  die aktuelle Zeit und  $t_k$  ein beliebiger Prädiktionszeitpunkt innerhalb des Prädiktionshorizonts darstellt.

## 6.6 Optimierung

Der zentrale Teil ist der in Phase 1 des Projektes entwickelte LQ-MPC. In Phase 1 wurde im Gütekriterium noch die Differenz zwischen dem optimierten Wärmebedarf und dem zur aktuellen Aussenlufttemperatur gehörenden statischen Wärmebedarf für die Optimierung verwendet. Dies wurde nun so abgeändert, dass der absolute Stromverbrauch bestraft wird. Neu werden der COP der Wärmepumpe, die Sperrzeiten und die Tarifstruktur in der Optimierung berücksichtigt. Dabei wird der zukünftige COP anhand des prädiktierten Verlaufes der Aussenlufttemperatur und der Herstellerdaten für die Wärmepumpe bestimmt. Durch Berücksichtigung dieser Daten kann der Bedarf an elektrischer Energie oder die Stromkosten – je nach Wunsch – minimiert werden, ohne dass der Wärme-komfort beeinträchtigt wird. Der Ausgang des LQ-MPC-Algorithmus ist die während der nächsten Periodendauer optimale thermische Energie, welche dem Gebäude zugeführt werden muss.

Der Zeithorizont wurde bei 24 Stunden belassen, die Periodendauer wurde, wie weiter oben beschrieben, auf zwei Stunden gesetzt.

Für die Implementierung in den SATAG-Regler wurde ausserdem die Optimierungsaufgabe zeitdiskret für eine Abtastperiode von zwei Stunden formuliert, so dass deren Lösung direkt als zeitdiskreter LQ-MPC-Algorithmus resultiert. Dieser Algorithmus wird vollständigkeithalber nachfolgend vorgestellt.

Das Ziel der Optimierung ist dabei die Minimierung des folgenden quadratischen Güteindex für den Prädiktionshorizont  $t_{\text{horiz}} = N \cdot t_{\text{peri}}$ ,  $N \in \mathbb{N}$  ( $t_{\text{horiz}} = 24 \text{ h}$ ,  $t_{\text{peri}} = 2 \text{ h}$  und  $N = 12$ ):

$$J(\hat{Q}_{\text{Bed}}^*) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \left\{ R_k \hat{Q}_{\text{Bed},k}^{*2} + Q_k (T_{R,k} - T_{R\text{soll},k})^2 \right\},$$

wobei  $\dot{Q}_{\text{Bed},k} = u_k$  (Steuergrösse) und  $T_{R,k} = y_k$  (Ausgangsgrösse) durch die folgende zeitdiskrete Beschreibung des im Kapitel 6.2 vorgestellten (zeitkontinuierlichen) Hausmodells miteinander verknüpft sind:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + B_u \cdot u_k + B_{z1} \cdot z_{1,k},$$

$$y_k = C \cdot x_k,$$

wobei  $A$ ,  $B_u$  und  $B_{z1}$  die zeitdiskrete Systemmatrizen, die im Sinne von Halteglied nullter Ordnung zu den im Kapitel 6.2 eingeführten zeitkontinuierlichen Systemmatrizen  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}_u$  und  $\tilde{B}_{z1}$  äquivalent sind.

Somit stellen diese zeitdiskrete Gleichungen die Nebenbedingungen für die Minimierung des Gütekriteriums  $J(\dot{Q}_{\text{Bed}})$ . Mit der Wahl der Faktoren  $R_k$  und  $Q_k$  (siehe weiter unten) kann für die Minimierungsaufgabe die Komfort gegenüber der Heizleistung nach Wunsch gewichtet werden.

Die minimierende Lösung ist aus der optimalen Regelung bekannt und setzt sich gemäss [8] aus einer Steuerung (der erste Summand) und einer Regelung (der zweite Summand):

$$u_k = \dot{Q}_{\text{Bed},k} = -R_k^{-1} B_u^T (A^T)^{-1} \cdot (C^T Q_k T_{R,k} - w_k) - R_k^{-1} B_u^T (A^T)^{-1} \cdot (P_k - C^T Q_k C) \cdot x_k,$$

wobei die Grösse  $w_k$  im Steuerungsterm durch eine rekursive Berechnung über den Prediktionshorizont rückwärts mit Hilfe der folgenden rekursive Gleichung erhalten wird:

$$w_k = \left[ A^T - A^T P_{k+1} \cdot \left( I - B_u \left[ R_k + B_u^T P_{k+1} B_u \right]^{-1} B_u^T P_{k+1} \right) \cdot B_u R_k^{-1} B_u^T \right] \cdot w_{k+1} \\ + C^T Q_k \vartheta_{R\text{soll},k} - A^T P_{k+1} \cdot \left( I - B_u \left[ R_k + B_u^T P_{k+1} B_u \right]^{-1} B_u^T P_{k+1} \right) \cdot B_{z1} \hat{\vartheta}_{L,k}$$

$$w_N = C^T Q_N \vartheta_{R\text{soll},N}.$$

Dabei charakterisieren  $\vartheta_{R\text{soll},k}$  und  $\vartheta_{L,k}$  den Sollverlauf für die Referenzraumtemperatur resp. die mit Wettervorhersage (vgl. Kapitel 6.4) prädizierte Aussenlufttemperatur. Die Matrix  $P_k$  wird mit Hilfe der folgenden Matrix-Riccati-Gleichung ebenfalls rekursiv über den Prediktionshorizont rückwärts berechnet:

$$P_k = C^T Q_k C + A^T P_{k+1} A - A^T P_{k+1} B_u \left[ R_k + B_u^T P_{k+1} B_u \right]^{-1} B_u^T P_{k+1} A \text{ mit } P_N = C^T Q_N C.$$

Der Zustandsvektor  $x_k$  im zweiten Summand der optimalen Steuergrösse (Regelungsterm) wird mit Hilfe eines Kalmanfilters geschätzt (vgl. Kapitel 6.3).

**Wahl der Gewichtungsfaktoren:** Aus der LQ-Optimierungstheorie [8] ist bekannt, dass für die Optimierung nur das Verhältnis der beiden Gewichtungsfaktoren relevant ist. Daher wurde der Gewichtungsfaktor  $Q_k$  auf eins gesetzt. Für den Gewichtungsfaktor  $R_k$  wurde eine Grundeinstellung von  $10^{-4}$  gewählt.

Die Wärmepumpe arbeitet bei höheren Aussenlufttemperaturen effizienter und weist höhere COP-Werte auf. Um aus diesem Grund die Wärmepakete über den Prädiktionshorizont in den Zeitabschnitten mit höher prädizierten Aussenlufttemperaturen zu verschieben, wurde die Grundeinstellung durch die prädizierten COP-Werte der Zeitpunkte  $t_k$  im Prädiktionshorizont dividiert.

Für das Berücksichtigen der Tarifstruktur wurden die korrigierten  $R_k$ -Werte über den Prädiktionshorizont nochmals durch Multiplikation mit den normierten Tarifstruktur (Niedertarifwerte gleich eins!) korrigiert.

## 6.7 Pulsbreitenmodulation

Die Pulsbreitenmodulation schaltet die Wärmepumpe zu Beginn einer Periodendauer ein, sofern der Wärmebedarf eine Laufzeit von mindestens 15 Minuten erfordert, und lässt die Wärmepumpe solange in diesem Zustand, bis die geforderte Energie abgegeben wurde. Danach wird die Wärmepumpe bis zum Beginn einer neuen Periode ausgeschaltet. Da der abgegebene Wärmestrom vom Satag-Regler nicht erfasst wird, muss über die Leistungskennlinien der Wärmepumpen der abgegebene Wärmestrom bestimmt werden.

$$u_{WP} = \begin{cases} 1 & \text{Wärmepumpe EIN, solange } \int_t^* \dot{Q}_{hp}(T_{out}(t), T_s(t)) \cdot dt \leq \dot{Q}_{req,0} \cdot t_{peri} \\ 0 & \text{Wärmepumpe AUS anschliessend bis zum Beginn einer neuen Periode} \end{cases}$$

Damit die abgegebene Wärme ziemlich genau der von der Optimierung geforderten Wärme entspricht, wurde auch für die Pulsbreitenmodulation eine Taktzeit von 1 Minute gewählt. Ein Vergleich von gelieferter und geforderter Wärme in kürzeren Zeitabschnitten macht keinen Sinn, da durch die Schätzung der gelieferten Wärme über die Leistungskennlinien ein nicht zu unterschätzendes Fehlerrisiko besteht. Ausserdem würden die sonst schon knappe Rechenkapazität des verwendeten Mikroprozessors weiter belastet.

# 7. Modellbasierter PBM-Regler von SATAG

## 7.1 Regelalgorithmus

Der anfänglich in MATLAB implementierte Regleralgorithmus wurde für die Implementierung in den Satag-Regler nach C konvertiert<sup>1</sup>. Dabei wurden die Schnittstellen zum bestehenden Satag-Regler so definiert, dass die Logik- und Sicherheitsstruktur von Satag übernommen werden konnte. Der Algorithmus für die Berechnung musste wegen der kleinen Rechen- und Speicherleistung (gegenüber eines heute üblichen Computers) des von Satag verwendeten Mikroprozessors bezüglich Zeit- und Platzbedarf optimiert werden.

## 7.2 Implementierung

Der modellbasierte PBM-Regler wurde über klar definierte Schnittstellen eingebunden. Durch die modulare Bauweise des originalen Reglers war dies mit wenig Aufwand möglich. Der Regler hat folgende Eingänge:

- Aussentemperatur in  $1/10$  °C
- Vorlauf- und Rücklauf-temperatur in  $1/10$  °C
- Sollwert für die Raumtemperatur in  $1/10$  °C
- Binäre Signale für Kompressor ein, Abtauen, Niedertarif und Sperrzeiten

Und die Ausgänge sind:

- Anzahl Kompressoren ein
- Anzeige auf dem Display für Kontrollzwecke (beobachtete Temperaturen, optimale Wärme für die laufende Periode, gelieferte Wärme während der laufenden Periode und momentane geschätzte Wärmeleistung der Wärmepumpe)

Einziges zur Zeit von aussen verstellbarer Parameter ist der Sollwert für die Raumtemperatur. Alle anderen Parameter sind hartkodiert. Bei einer Änderung dieser Werte muss das Programm neu kompiliert und auf den Chip gebrannt werden.

Der Ausgang «Anzahl Kompressoren ein» wird auf "1" gesetzt, wenn die Wärmepumpe laufen soll, und auf "0", wenn dies nicht der Fall ist. Da eine Einschaltlogik eingehalten werden muss, beginnt die Wärmepumpe nicht sofort mit der Produktion von Wärme, wenn der Regler den Ausgang «Anzahl Kompressoren ein» auf "1" setzt. Daher wird über den Eingang «Kompressor ein» detektiert, wann die Wärmepumpe wirklich läuft. Da der Kompressor auch beim Abtauen in Betrieb ist, dabei aber keine nutzbare Wärme produziert wird, muss dieser Fall über den Eingang «Abtauen» abgefangen werden. Die Eingänge «Niedertarif» und «Sperrzeit» geben an, ob zur Zeit einer dieser beiden Zustände zutrifft. Damit kann die Prädiktion dieser Zustände automatisch an sich ändernde Bedingungen angepasst werden.

Für Testzwecke wurden in MATLAB die gleichen Schnittstellen definiert, wie sie am realen System vorhanden sind. Damit konnte die C-Variante einfach auf richtiges Funktionieren getestet werden.

Auf dem Mikroprozessor der Wärmepumpe wurden der originale und der zu testende Regler parallel implementiert. So hätte der Hausbesitzer die Möglichkeit gehabt, bei Problemen während der Testphase auf den originalen Regler zu wechseln.

---

<sup>1</sup> Programmlisting in C für den modellbasierten PBM-Regler: Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Mess- und Regeltechnik, 8092 Zürich (siehe Impressum).

### **7.3 Erprobung in der Heizsaison 2000/2001**

Die erste Version des modellbasierten PBM-Reglers wurde vom 22. Februar bis 13. März 2001 in der Referenzanlage Winterthur-Seen erfolgreich getestet. Die gewünschte Raumtemperatur von 20°C wurde trotz stark schwankender Aussentemperatur sehr gut eingehalten.

Ein Problem ergab sich aus einer Unstimmigkeit zwischen den verwendeten Leistungskennlinien und der tatsächlichen Leistung der Wärmepumpe. Die Optimierung wurde auf Minimierung der Kosten eingestellt. Daher wird versucht, möglichst viel Wärme in den Niedertarifperioden zu erzeugen. Da nun die Regelung von einer um ungefähr 20% höheren Lieferleistung ausging als dies der Fall war, wurde während der Niedertarifzeit nicht die geforderte Wärme geliefert. Über die beobachtete Raumtemperatur wurde dann, allerdings erst mit einiger Verzögerung, festgestellt, dass es im Haus zu kalt ist. Daher musste im Hochtarif noch Wärme nachproduziert werden. Dies hat die Betriebskosten höher gehalten als erwartet. Der Komfort wurde dadurch allerdings nicht beeinträchtigt.

Kleinere Schönheitsfehler sind aufgetreten bei der Ausgabe der reglerinternen Daten auf den Bildschirm. Durch einen Formatierungsfehler der Ausgabedaten wurden bei zu hohen Werten zum Teil negative Werte angezeigt. Dies hatte auf den Betrieb der Wärmepumpe keinen Einfluss. Der Benutzer vermutete ausserdem noch Quereinflüsse der Parameter des originalen Reglers auf den getesteten Regler.

### **7.4 Erprobung in der Heizsaison 2001/2002**

Zum Betrieb des modellbasierten PBM-Reglers von Satag musste als erstes die Parameteridentifikation mit dem neu eingestellten Wärmeabgabesystem durchgeführt werden. Seit dem 11. Oktober 2001 standen zwar die Messdaten der neuen Betriebsart zur Verfügung, aber diese Messdaten lagen bis Ende Oktober knapp an der Heizgrenze. Deshalb konnte die Parameteridentifikation und die Neuprogrammierung des modellbasierten PBM-Reglers erst im November durchgeführt werden.

Bei den neu ermittelten Parametern ist eine eindeutige Änderung der Wärmeabgabeparameter zu erkennen. Die Simulation zeigt jedoch beim Einschalten der Wärmepumpe die einzelnen Temperaturspitzen in der Raumtemperatur nicht auf.

Der Regler wurde mit den neuen Parametern aufgesetzt. Gleichzeitig erfolgte eine Reduktion der Periodendauer von drei auf zwei Stunden, da dies einen ökonomischeren Betrieb der Wärmepumpe gewährleistet. Der in der Heizperiode 2000/2001 festgestellte Fehler bei der Ausgabe von Kontrollwerten auf den Reglermonitor wurde behoben.

Online-Änderung verschiedener Parameter können nun direkt am Regler vorgenommen werden. Dies betrifft die Eingabe der Modellparameter, der Periodendauer, der Sperr- und Niedertarifzeiten sowie der Wahl, ob der Regler die Betriebskosten oder den Energieverbrauch optimieren soll. Weiter können nun die Daten der eingesetzten Wärmepumpe aus der von Satag implementierten, reglerinternen Datenbank übernommen werden.

Die Erprobung des modellbasierten PBM-Reglers von Satag erfolgte vom 4. bis 23. Januar 2002 und vom 2. bis 16. März 2002.

## 8. Diskussion

### 8.1 Fragestellung

In Abschnitt 1.1 wurden die Vorteile der Pulsbreitenmodulation (PBM) gegenüber der herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung ausführlich dargelegt:

1. Längere mittlere Laufzeit der Wärmepumpe und Einhaltung Minimallaufzeit
2. Höherer Niedertarifanteil
3. Eingabe der abstrakten Rücklauf temperatur-Heizkurve entfällt
4. Koppelung Heizkurve/Zeitprogramm entfällt
5. Koppelung Heizkurve/Wassererwärmung entfällt
6. Keine Probleme mit tiefen und flachen Heizkurven
7. Keine Fehler durch Momentanwert-Witterungsführung an Tagen mit grosser Temperaturdifferenz
8. Kleinerer Hilfsenergieverbrauch durch Pumpenabschaltung

Alle Vorteile gegenüber der herkömmlichen Rücklauf temperaturregelung sind systembedingt durch das völlig andere Regelkonzept vom PBM gegeben. Deshalb könnte man durchaus den Standpunkt vertreten, dass die Vorteile von PBM gar nicht weiter bewiesen werden müssen, weil die Beweisführung in Abschnitt 1.1 eigentlich genügen sollte.

Selbstverständlich ergeben sich aber bei jeder neuen Technik auch neue Fragen, insbesondere bezüglich zusätzlichem Aufwand und allfälligen Nachteilen gegenüber der alten Technik. Im vorliegenden Fall stellen sich hauptsächlich die folgenden vier Fragen:

- a) Ist PBM nicht aufwendiger als die herkömmliche Rücklauf temperaturregelung und können die neuen PBM-Regelkonzepte überhaupt in heutige Regler implementiert werden?
- b) Können die genannten Vorteile von PBM nicht ebenso mit «Tricks» bei der herkömmlichen Rücklauf temperaturregelung erreicht werden?
- c) Welche Nachteile ergeben sich mit PBM gegenüber der herkömmlichen Rücklauf temperaturregelung?
- d) Welcher der erprobten PBM-Regler (oder Kombinationen davon) ist die beste Lösung?

Frage a wurde durch die vorangehenden Kapitel hinreichend beantwortet: PBM ist nicht aufwendiger als herkömmliche Rücklauf temperaturregelung und die Implementierung in herkömmliche Regler ist problemlos möglich. Der Weg zu einem brauchbaren PBM-Regler ist allerdings nicht ganz einfach.

Im vorliegenden Kapitel soll vor allem versucht werden, die Fragen b und c zu beantworten.

Für Frage d muss auf Phase 3 verwiesen werden. Erst mit dem ETHZ-Wärmepumpenprüfstand wird es möglich sein, einen objektiven Vergleich zwischen den einzelnen Regelkonzepten anzustellen.

### 8.2 «Tricks» bei der Rücklauf temperaturregelung

#### 8.2.1 Minimallaufzeit durch Abschaltverzögerung

Solange reguläre Verhältnisse bezüglich Durchfluss und Temperaturen am Verflüssiger vorliegen, kann auch mit einer Rücklauf temperaturregelung eine Minimallaufzeit von beispielsweise 15 Minu-

ten erzwungen werden, indem eine entsprechende Abschaltverzögerung der Wärmepumpe eingebaut wird (in vielen Reglern als Zusatzfunktion eingebaut).

Durch richtige Auswahl der Schaltung und korrekte Auslegung sollte sich auch ohne Abschaltverzögerung eine Minimallaufzeit in der Grössenordnung von 15...20 Minuten ergeben. Eine Abschaltverzögerung kaschiert also nur Planungsfehler!

Ausserdem bedeuten solche mehr oder weniger unkontrollierbaren Zeitfunktionen immer auch eine Störung der durch die Heizkurve vorgegebenen Energiezufuhr zum Gebäude.

Nur mit PBM ergeben sich vernünftige Laufzeiten über den ganzen Einsatzbereich der Wärmepummenanlage und es ist weitgehend garantiert, dass die gewollte Energiemenge auch tatsächlich innert 24 Stunden zugeführt wird.

## 8.2.2 Normalbetrieb in der Nacht und reduzierter Betrieb am Tag

Durch Umkehrung der Zeitprogrammsteuerung von «Normalbetrieb am Tag und reduziertem Betrieb in der Nacht» zu «Normalbetrieb in der Nacht und reduziertem Betrieb am Tag» kann auch mit einem herkömmlichen Rücklauftemperaturregler eine erhöhte Niedertarifnutzung erreicht werden.

Die Einstellung und Anpassung der Heizkurve dürfte allerdings einiges Kopfzerbrechen bereiten, denn bei unterschiedlich grossen Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht ergeben sich ungewollte Fehler bei der Energiezufuhr.

Ein weiteres Problem dieser Methode ist der Umstand, dass die Wärmepumpe überdimensioniert sein muss, weil ja am Tag bewusst zuwenig Energie zugeführt wird, damit in der Nacht umso mehr Niedertarifenergie produziert werden kann. Natürlich könnte man bei sehr kalten Temperaturen auf Tag und Nacht Normalbetrieb umschalten, aber jede Änderung an der Zeitprogrammsteuerung bedeutet auch eine erneute Anpassung der Heizkurve!

PBM besorgt die Bevorzugung der Niedertarifenergie flexibel: Die gewollte Energiemenge wird tatsächlich innert 24 Stunden zugeführt und dies ohne Überdimensionierung der Wärmepumpe.

## 8.3 Diskussion der Messresultate

Tabelle 22 gibt eine Übersicht der nachfolgend diskutierten Regelkonzepte.

Regelkonzept	Regler	Wärmeabgabe	Zeitraum	Abbildung
Rücklauftemperaturregler	Satag Thermotechnik AG Originalregler	33% FBH	Donnerstag 15.11.01	Abbildung 23
		67% HKH	12.11.-25.11.01	Abbildung 24
Energiekennlinienbasierte PBM-Regelung	Gabathuler AG Prozessrechner	100% FBH	Donnerstag 18.03.99	Abbildung 25
		(Waltalingen)	09.03.-08.04.99	Abbildung 26
	Satag Thermotechnik AG Version EB1	33% FBH	Sonntag 17.03.02	Abbildung 27
		67% HKH	17.03.-13.04.02	Abbildung 28
Laufzeitkennlinienbasierte PBM-Regelung	Siemens Building Technologies AG Version LB1	33% FBH	Dienstag 19.02.02	Abbildung 29
		67% HKH	25.01.-28.02.02	Abbildung 30
		33% FBH 67% HKH	Dienstag 12.02.02 10.02.-17.02.02 (Ferien)	Abbildung 31 Abbildung 32
Modellbasierte PBM-Regelung	Satag Thermotechnik AG Version MB1	67% FBH	Donnerstag 08.03.01	Abbildung 33
		33% HKH	22.02.-13.03.01	Abbildung 34
	Satag Thermotechnik AG Version MB2	33% FBH	Samstag 05.01.02	Abbildung 35
		67% HKH	04.01.-23.01.02	Abbildung 36
		33% FBH	Freitag 08.03.02	Abbildung 37
		67% HKH	02.03.-15.03.02	Abbildung 38

Tabelle 22: Übersicht

### 8.3.1 Rücklauftemperaturregler – 33% FBH / 67% HKH – November 01

Beim vorliegenden witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauftemperaturregler handelt es sich um den mit der Wärmepumpe gelieferten Originalregler der Referenzanlage Winterthur-Seen. Diese Messresultate sollen vor allem zum Vergleich mit den neu erprobten PBM-Reglern dienen. Die Heizkurve war gut auf die Referenzanlage abgestimmt und die Zeitprogrammsteuerung wurde nicht benutzt.

**Typischer Tag (Abbildung 23):** Bei konstant kalter Aussentemperatur, meist unter 0°C, ergeben sich 5 lange Pulse (unterbrochen durch 13 Abtauungen), gleichmässig über den Tag verteilt. Der Niedertarifanteil beträgt 43%. Die Raumtemperaturen reagieren jeweils deutlich auf die 5 Pulse.

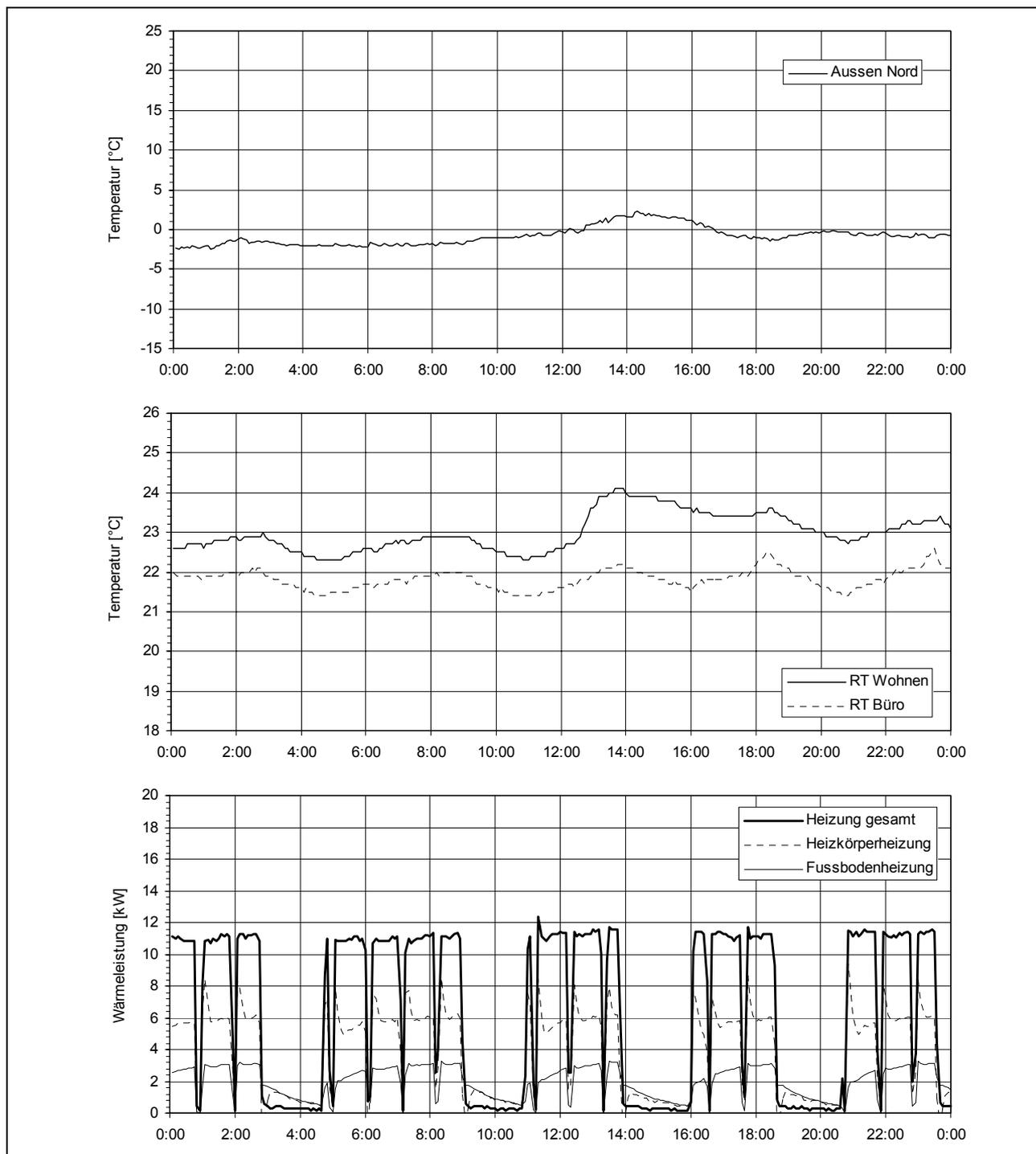


Abbildung 23: Rücklauftemperaturregler, Donnerstag 15.11.01

Am Nachmittag ergibt sich beim Wohnzimmer eine zusätzliche Erhöhung infolge Sonneneinstrahlung.

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 24 untere Diagramme):** Der Beobachtungszeitraum ist mit 2 Wochen im Vergleich zu den übrigen Regelstrategien relativ kurz; es stand keine längere, zusammenhängende Periode im vor allem interessierenden Betrieb mit 33% FBH / 67% HKH zur Verfügung. Die Aussentemperatur schwankt relativ wenig um 0°C; typisches Novemberwetter mit wenig Sonne.

**Häufigkeit der Raumtemperaturen (Abbildung 24 oberes Diagramm):** Die Raumtemperaturen zeigen eine gleichmässige Häufigkeitsverteilung, wobei das nach Norden orientierte Büro etwa 1 K tiefer liegt als das nach Süden orientierte Wohnzimmer; beim Wohnzimmer ergibt sich nur ein relativ kleiner «Fuss» bei 24°C, da die Sonneneinstrahlung im Beobachtungszeitraum verhältnismässig gering war.

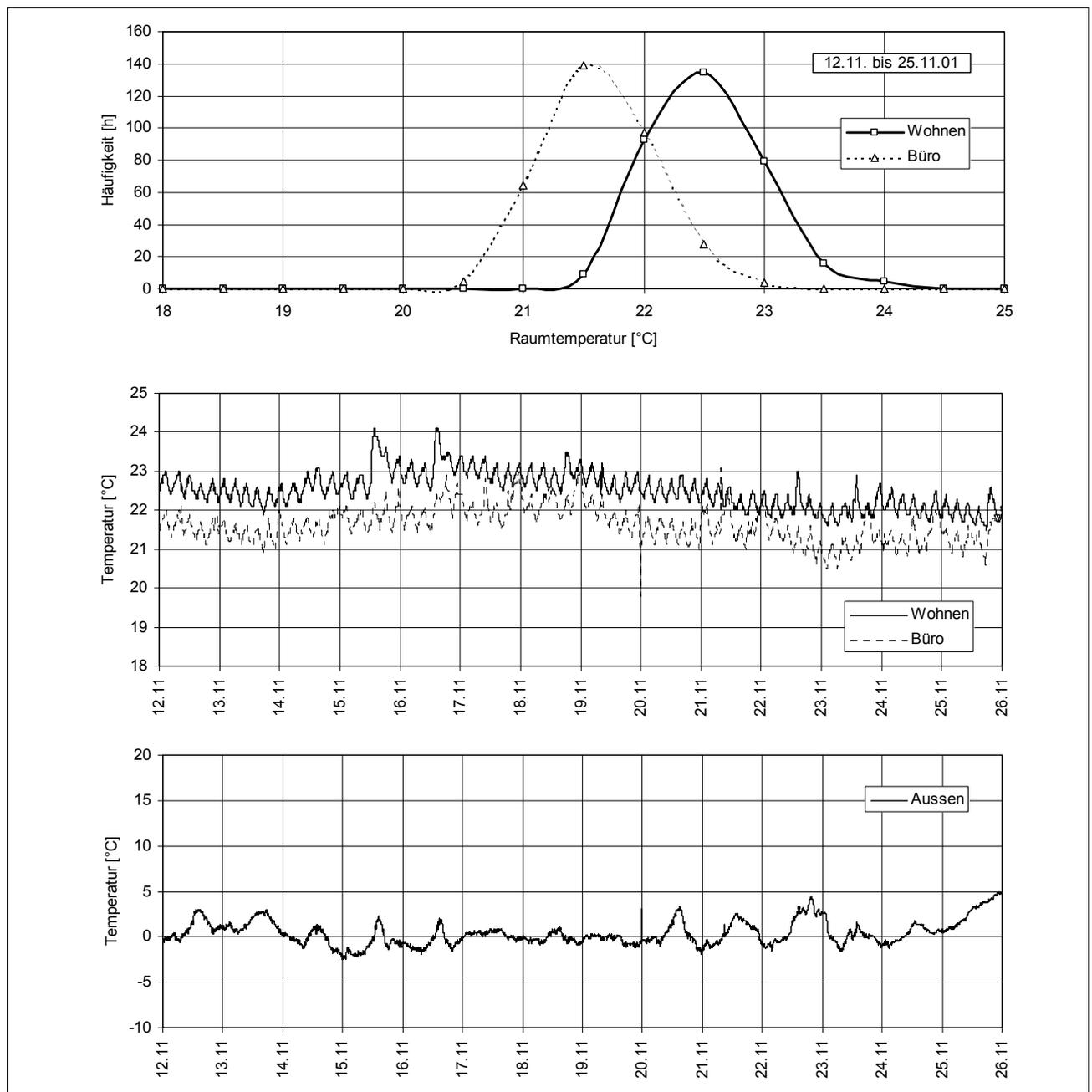


Abbildung 24: Rücklauftemperaturregler, 12.11.-25.11.01

### 8.3.2 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler – 100% FBH – März/April 99

Die Messdaten dieses Reglers stammen aus Phase 1 des vorliegenden Projekts [4]. Der energie-kennlinienbasierten PBM-Reglers war auf einem älteren Prozessrechner realisiert worden und wurde an einem typischen Neubauobjekt mit trägem Wärmeabgabesystem (nass verlegte Fussbodenheizung), ohne Speicher, aber mit Warmwasserbereitung erprobt (Sole/Wasser-Wärmepumpe). Dieser Regler wird nochmals gezeigt, weil damit ein Vergleich der trägen Referenzanlage Waltalingen aus Phase 1 mit der flinkeren Referenzanlage Winterthur-Seen aus Phase 2 möglich ist.

**Typischer Tag (Abbildung 25):** Nach Abschluss der Warmwasserbereitung (gestrichelt), wird dem Haus ab etwa 03.30 die Niedertarifenergie in zwei Pulsen zugeführt. Genau auf das Ende der Nie-

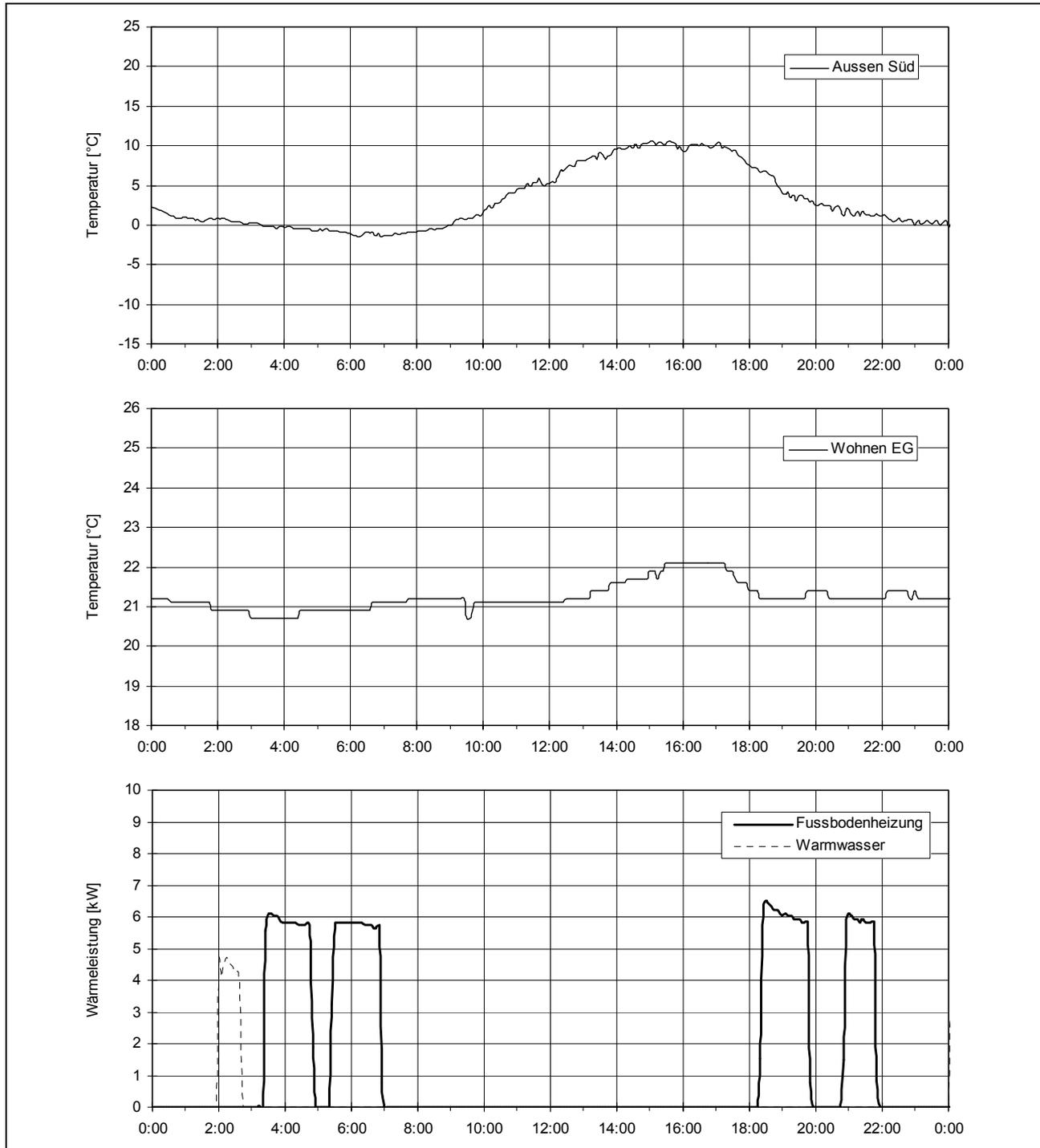


Abbildung 25: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler, Waltalingen, Donnerstag 18.03.99

dertarifzeit um 07.00 Uhr ist der gewünschte Anteil Niedertarif von 55% (+ Warmwasser) zugeführt. Die Pulse sind im Raumtemperaturverlauf praktisch nicht erkennbar. Am Nachmittag ergibt sich infolge Sonneneinstrahlung eine Erhöhung der Raumtemperatur von 21 auf 22°C.

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 26 untere Diagramme):** Der gewählte Beobachtungszeitraum von einem Monat weist relativ grosse Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht auf und es war oft sonnig. Der Peak am 27. März ist auf eine Benutzung des Cheminée zurückzuführen.

**Häufigkeit der Raumtemperatur (Abbildung 26 oberes Diagramm):** Die Raumtemperatur bleibt trotz der grossen Aussentemperaturschwankungen und langen Pausen in der Energiezufuhr sehr konstant. Ein kleiner «Fuss» in der Häufigkeitsverteilung bei 22°C zeigt die geringe Störung durch Sonneneinstrahlung bei dieser Referenzanlage (Beschattung durch Balkon über dem Wohnzimmerfenster).

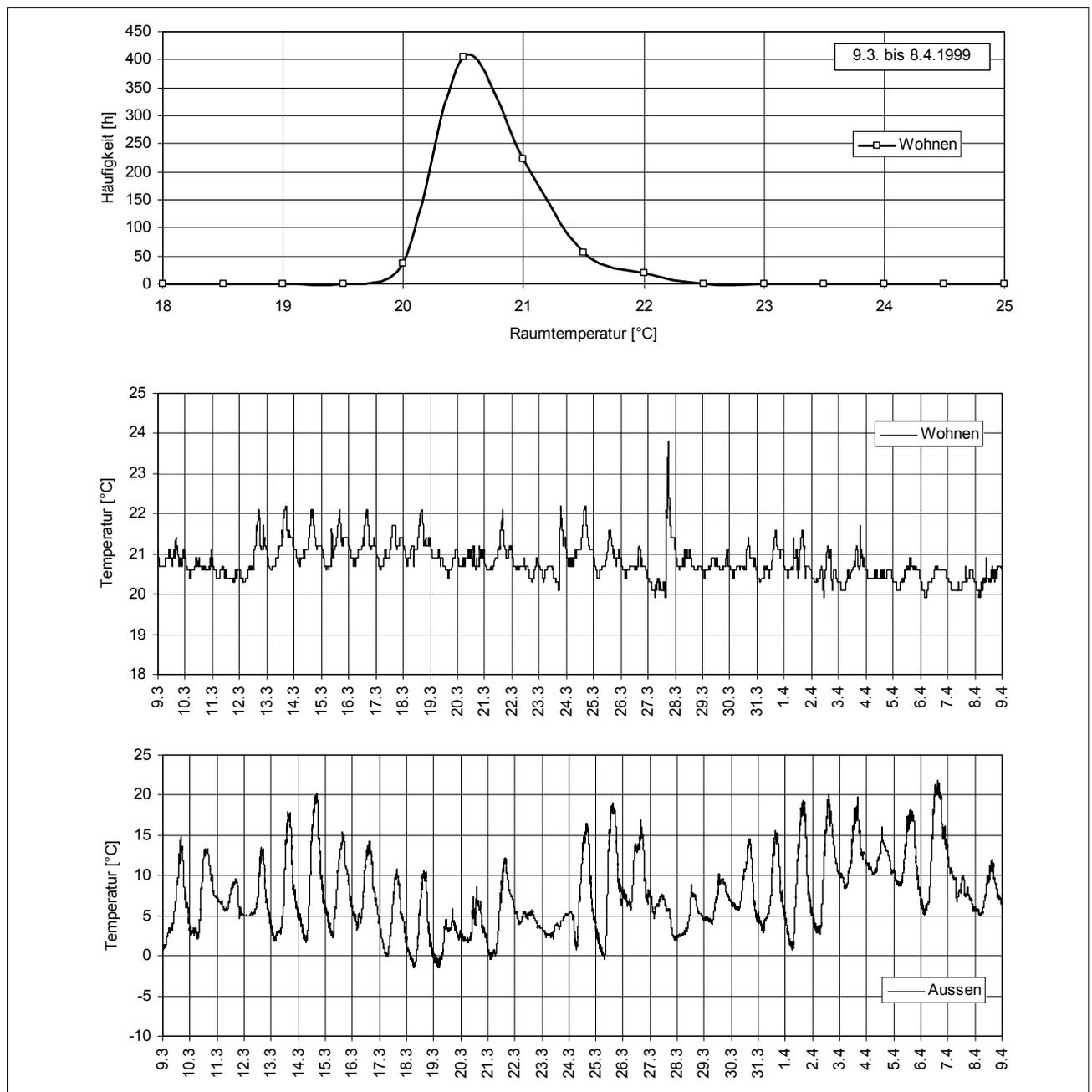


Abbildung 26: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler, Waltalingen, 09.03.99

### 8.3.3 Energiekennlinienbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – März/April 02

Bei der Erprobung zeigte sich, dass der Regler zeitweise nicht wie vorgesehen arbeitete. Da der Programmentwickler beim Industriepartner nicht zur Verfügung stand, war die Behebung der Programmierfehler leider nicht möglich. An dem in Abbildung 27 dargestellten Tag arbeitete der Regler einwandfrei.

**Typischer Tag (Abbildung 27):** Etwas nach 00.00 Uhr wird dem Haus die Niedertarifenergie in vier Pulsen zugeführt (3 Abtauungen). Genau auf das Ende der Niedertarifzeit, um 07.00 Uhr, ist der gewünschte Anteil Niedertarif von 70% zugeführt. Der verbleibende Hochtarifanteil wird am Abend ab 18.00 Uhr (programmierte Wunsch-Startzeit) in einem Puls zugeführt (1 Abtauung). Im

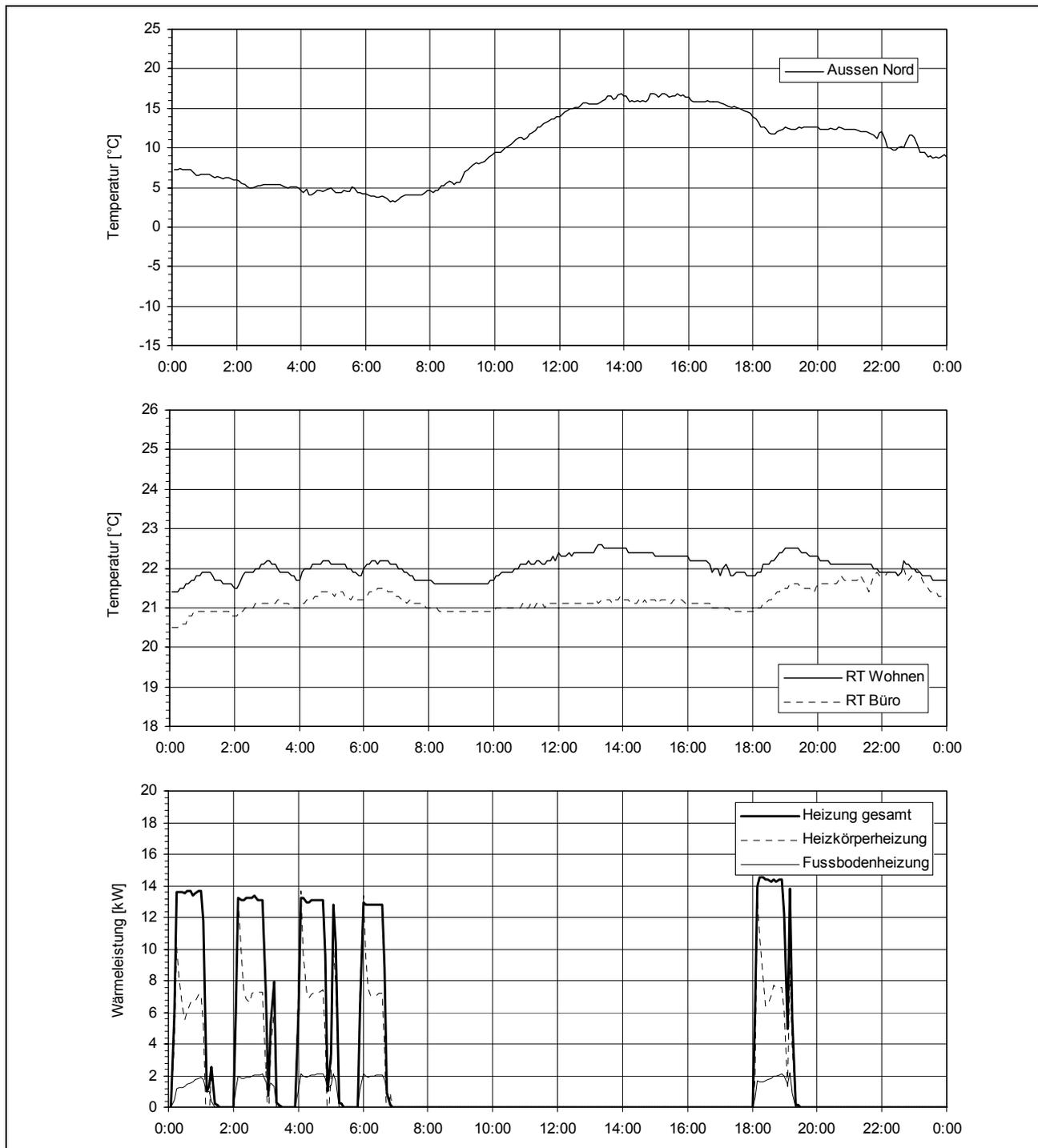


Abbildung 27: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler, Sonntag 17.03.02

Gegensatz zur trägen Referenzanlage Waltalingen (Abbildung 25) reagieren hier die Raumtemperaturen deutlich auf die Pulse. Am Nachmittag zeigt sich eine Erhöhung der Raumtemperatur im Wohnzimmer infolge Sonneneinstrahlung.

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 28 untere Diagramme):** Der Beobachtungszeitraum von fast einem Monat ist mit demjenigen aus Phase 1 (Abbildung 26) vergleichbar, mit relativ grossen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht und häufigem Sonnenschein.

**Häufigkeit Raumtemperaturen (Abbildung 28 oberes Diagramm):** Im Vergleich zur Häufigkeitsverteilung des Rücklauftemperaturreglers (Abbildung 24) sind die Raumtemperaturschwankungen grösser, allerdings ist auch die Störung durch Sonneneinstrahlung grösser. Insbesondere die am Kopf abgeflachte Kurve des Wohnzimmers ist auffallend. Alles in allem sind die Schwankungen jedoch wesentlich weniger gravierend als aufgrund der Mängel zu befürchten war. Die Fehler kompensierten sich offenbar teilweise oder gingen in der Trägheit der Anlage unter.

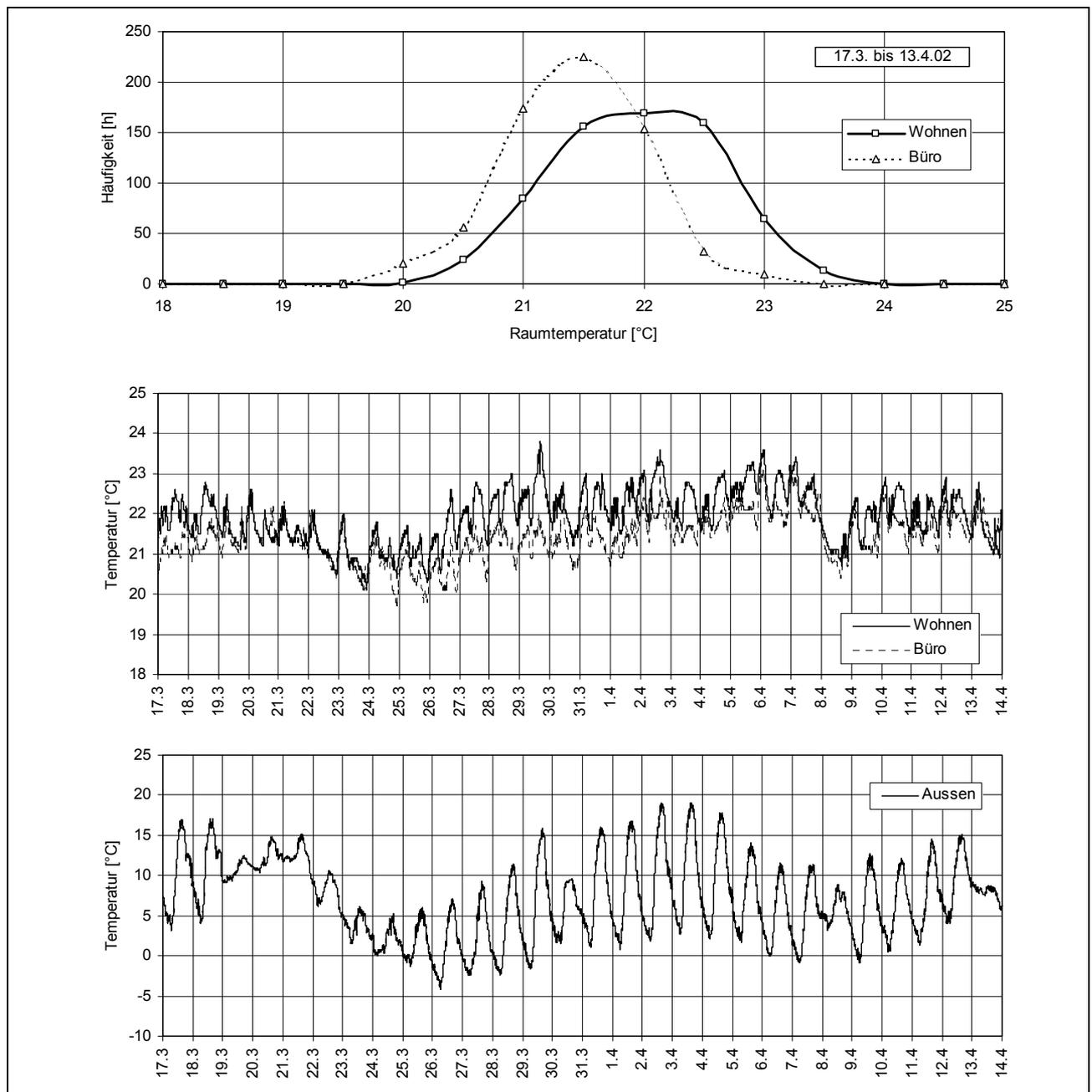


Abbildung 28: Energiekennlinienbasierter PBM-Regler, 17.03-13.04.02

### 8.3.4 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – Jan./Feb. 02

Der laufzeitbasierte PBM-Regler arbeitete seit Inbetriebsetzung immer einwandfrei. Die Abtausteu-  
erung war in diesem Regler noch nicht realisiert und erfolgte deshalb noch über einen Originalregler  
der Wärmepumpe.

**Typischer Tag (Abbildung 29):** Während der Niedertarifzeit wird der gewünschte Niedertarifan-  
teil von 70% in 4 Pulsen (Puls vom Vortag analog dem Puls nach 22.00 Uhr) so zugeführt, dass der  
Vorgang um 07.00 Uhr abgeschlossen ist (ca. 6 Abtauungen). Als Besonderheit war dieser Regler  
auf 3 Hochtariffenster programmiert. Die verbleibenden 3 mal 10% werden deshalb über drei gleich  
grosse Pakete jeweils am Ende der drei Hochtarif-Fenster zugeführt. Im Gegensatz zum Regler in

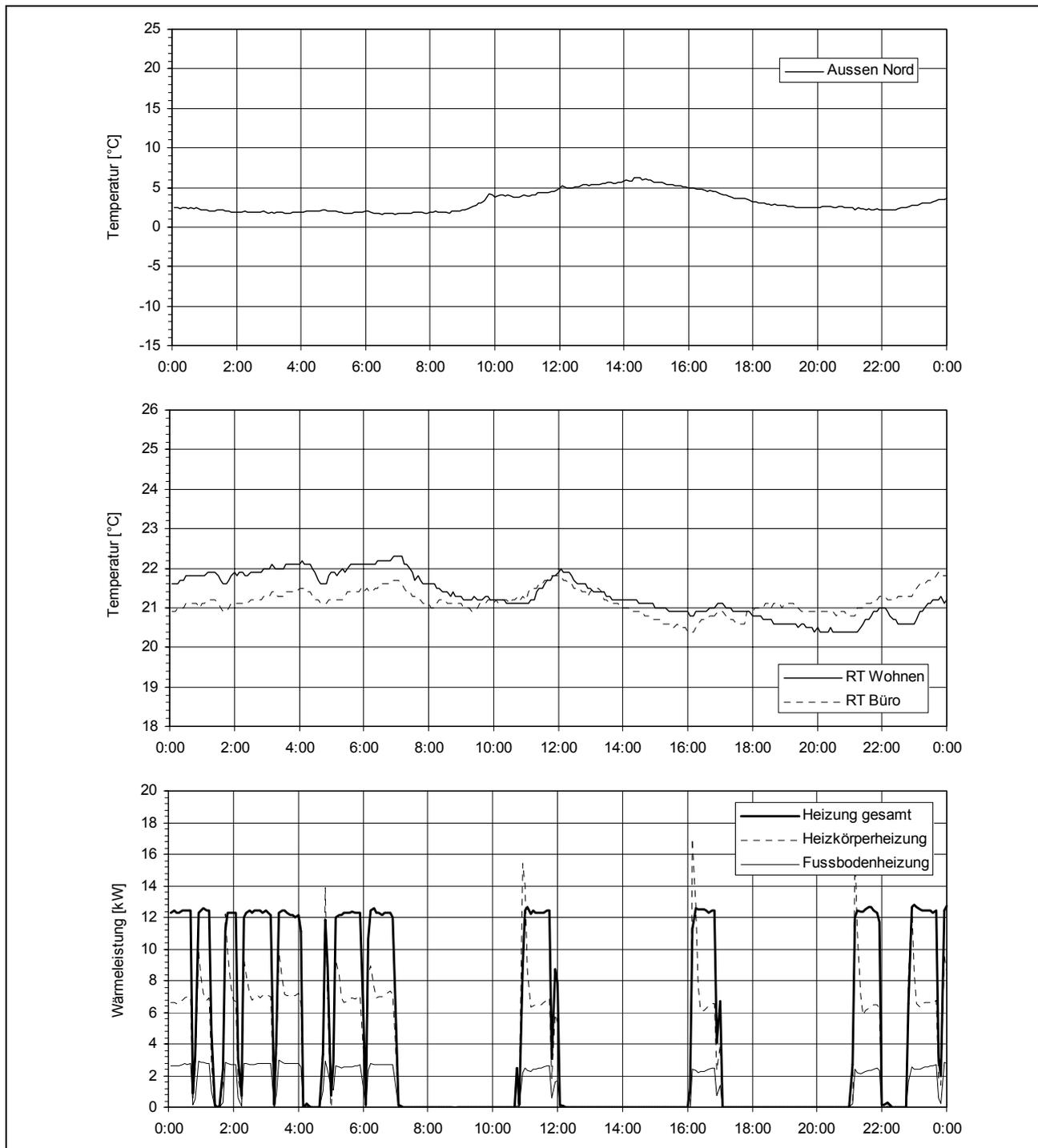


Abbildung 29: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler, Dienstag 19.02.02

der trägen Referenzanlage Waltalingen (Abbildung 25) reagieren auch hier die Raumtemperaturen deutlich auf die Pulse. Die Erhöhung der Raumtemperatur durch die erhöhte Niedertarifproduktion beträgt aber lediglich 1 K. Diese Komfortverschlechterung ist erstaunlich gering, bei 70% Niedertarifanteil im Vergleich zu den 43% beim Rücklauf temperaturregler.

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 30 untere Diagramme):** Der Beobachtungszeitraum beträgt fast 5 Wochen, wobei die Ferienwoche (10.-17.02.02) im oberen Diagramm nicht berücksichtigt wurde.

**Häufigkeit Raumtemperaturen (Abbildung 30 oberes Diagramm):** Die Schwankung der Raumtemperatur im Büro ist mit derjenigen des Rücklauf temperaturregler (Abbildung 24) vergleichbar. Die Raumtemperaturschwankung im Wohnzimmer ist etwas grösser; sie zeigt einen deutlichen «Fuss» bei 23...25°C infolge Sonneneinstrahlung.

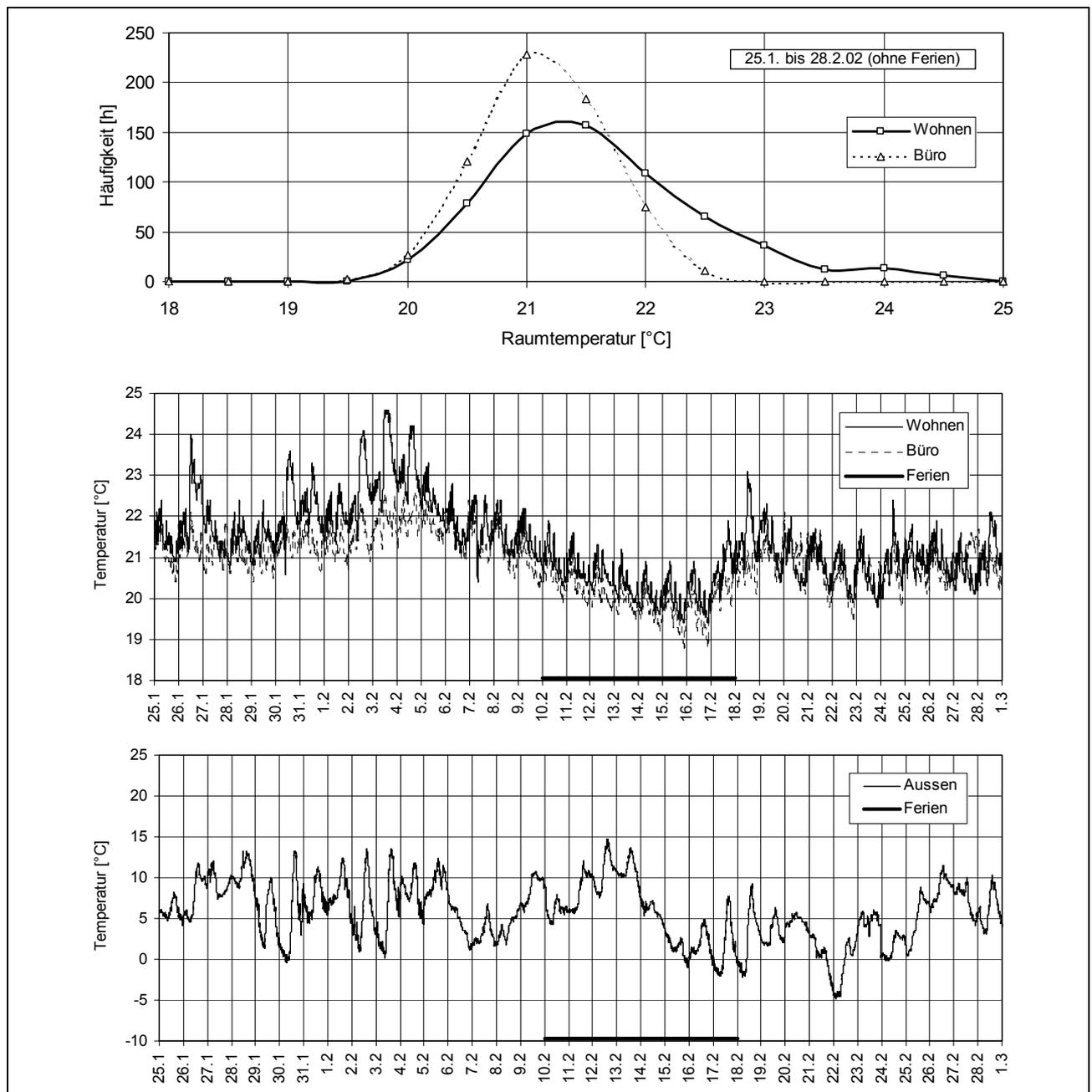


Abbildung 30: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler, 25.01-28.02.02

### 8.3.5 Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – Ferien

Vom 10. bis 17. Februar waren die Bewohner in den Ferien und die Rolläden waren geschlossen. Während dieser Zeit waren die Störungen durch innere Wärme und Sonneneinstrahlung also stark reduziert.

**Typischer Tag (Abbildung 31):** An diesem Ferientag wird der gewünschte Niedertarifanteil von 70% in 3 Pulsen so zugeführt, dass der Vorgang am Ende der Niedertarifzeit um 07.00 Uhr abgeschlossen ist (4 Abtauungen). Die verbleibenden 30% werden über zwei Pakete jeweils am Ende des ersten und dritten Hochtarif-Fensters zugeführt. Im zweiten Hochtarif-Fenster wurde die Minimal-Pulslänge nicht erreicht und der Energieanteil wurde ins dritte Hochtarif-Fenster übertragen.

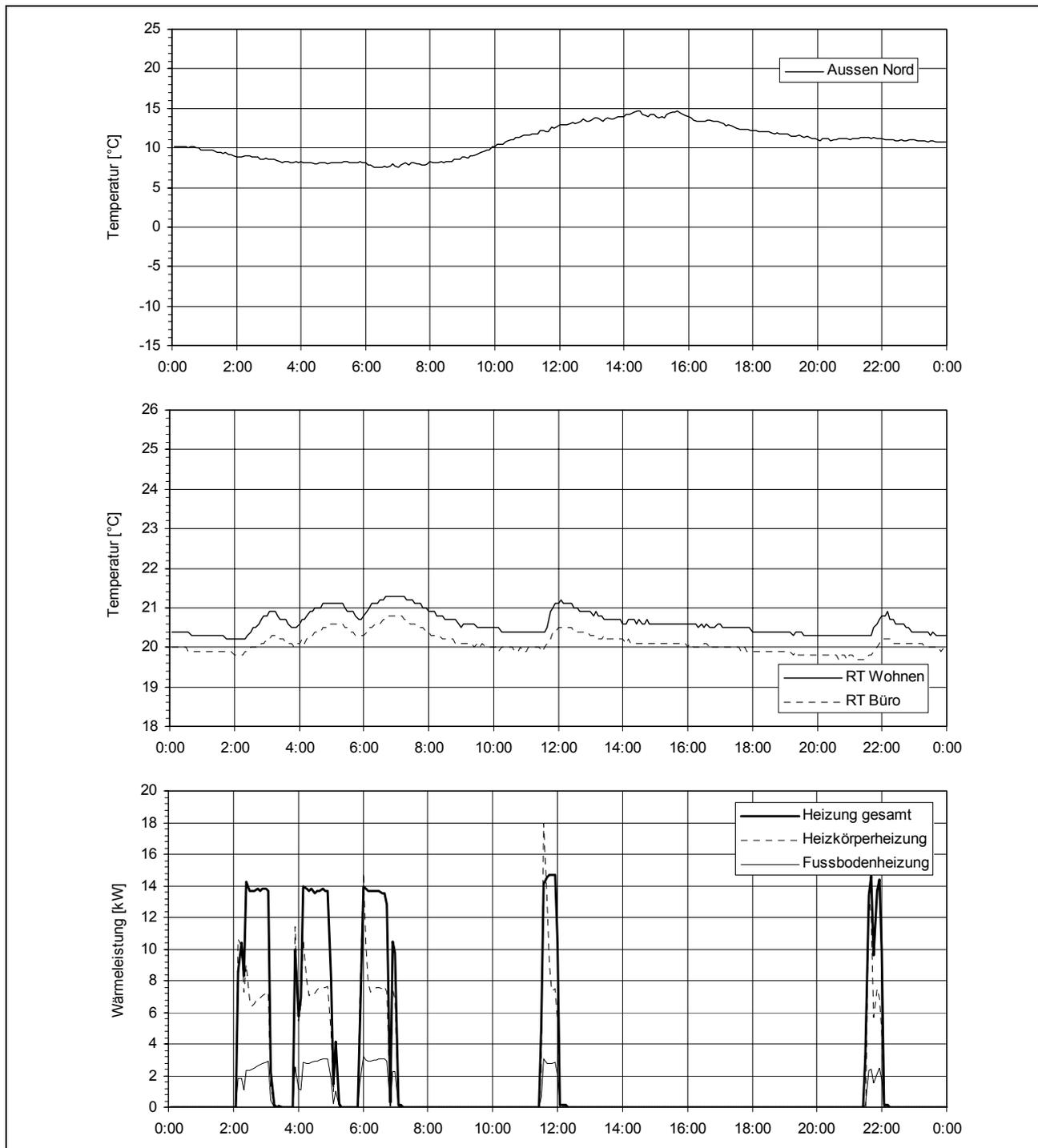


Abbildung 31: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler, Dienstag 12.02.02 (Ferien)

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 32 untere Diagramme):** Die unteren beiden Diagramme sind identisch mit denjenigen aus Abbildung 30. Der Beobachtungszeitraum für das obere Diagramm ist hier nur die Ferienwoche vom 10. bis 17.02.02.

**Häufigkeit Raumtemperaturen (Abbildung 32 oberes Diagramm):** Die Raumtemperaturen sind hier infolge der reduzierten Wärmegewinne gegenüber Abbildung 30 um 1 K tiefer. Die Schwankung der Raumtemperatur im Wohnzimmer ist deutlich kleiner und mit derjenigen im Büro vergleichbar. Die Häufigkeitskurven sind hier mit denjenigen des Rücklauf temperaturreglers in Abbildung 24 vergleichbar.

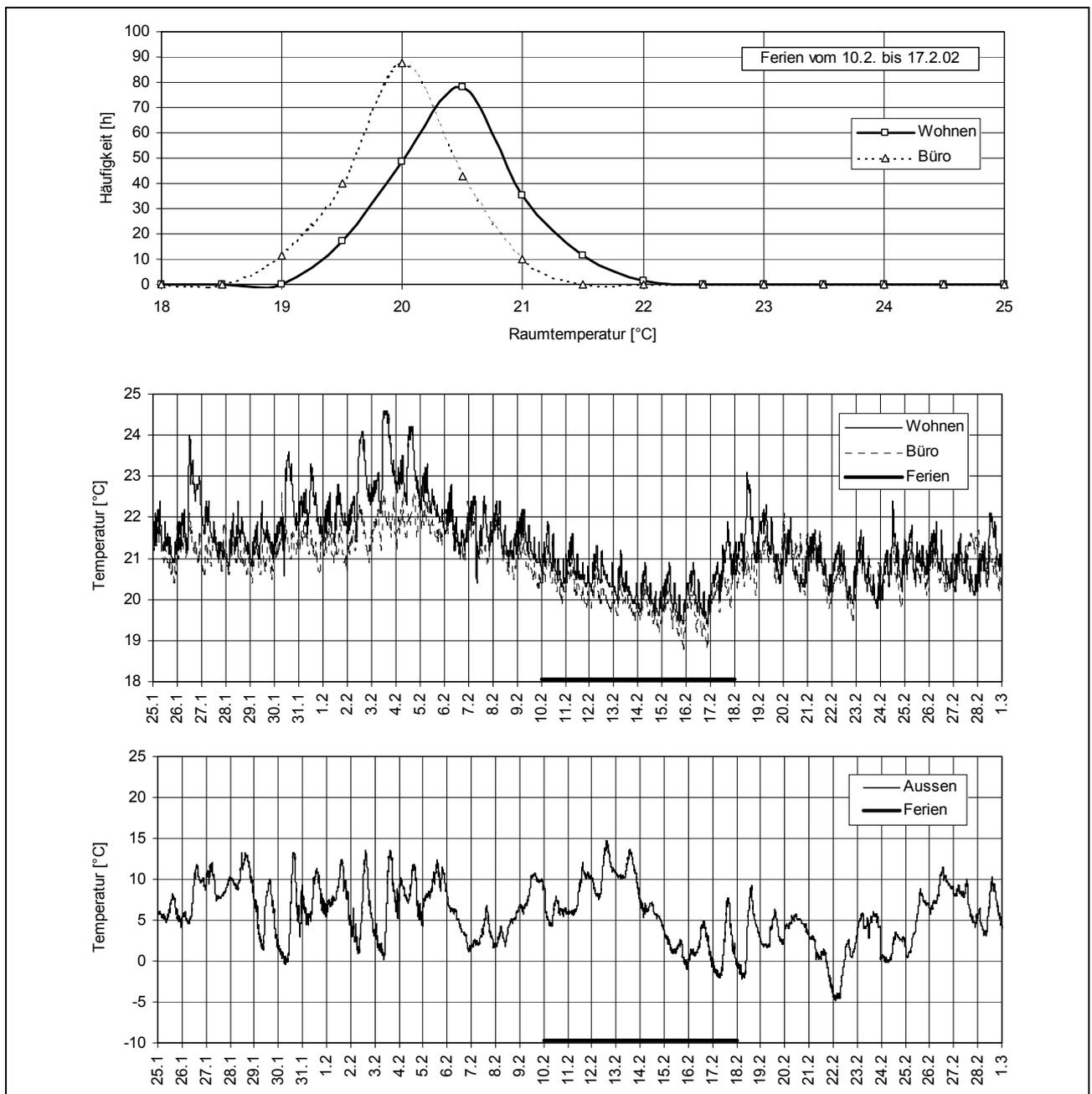


Abbildung 32: Laufzeitkennlinienbasierter PBM-Regler, 10.-17.02.02 (Ferien)

### 8.3.6 Modellbasierter PBM-Regler – 67% FBH / 33% HKH – Feb./März 01

Nur vom modellbasierten PBM-Regler stehen Messdaten mit hohem Fussbodenheizungsanteil von 67% zur Verfügung. Zu beachten ist hier, dass der PBM-Regler nach diesen Versuchen nochmals modifiziert wurde.

**Typischer Tag (Abbildung 33):** Die Energiezufuhr erfolgt hier in der Niedertarifzeit bis 07.00 Uhr und gleich anschliessend zu Beginn der Hochtarifzeit. Durch den höheren Fussbodenheizungsanteil reagiert die Raumtemperatur wesentlich träger als bei den bisher diskutierten PBM-Reglern aus Phase 2.

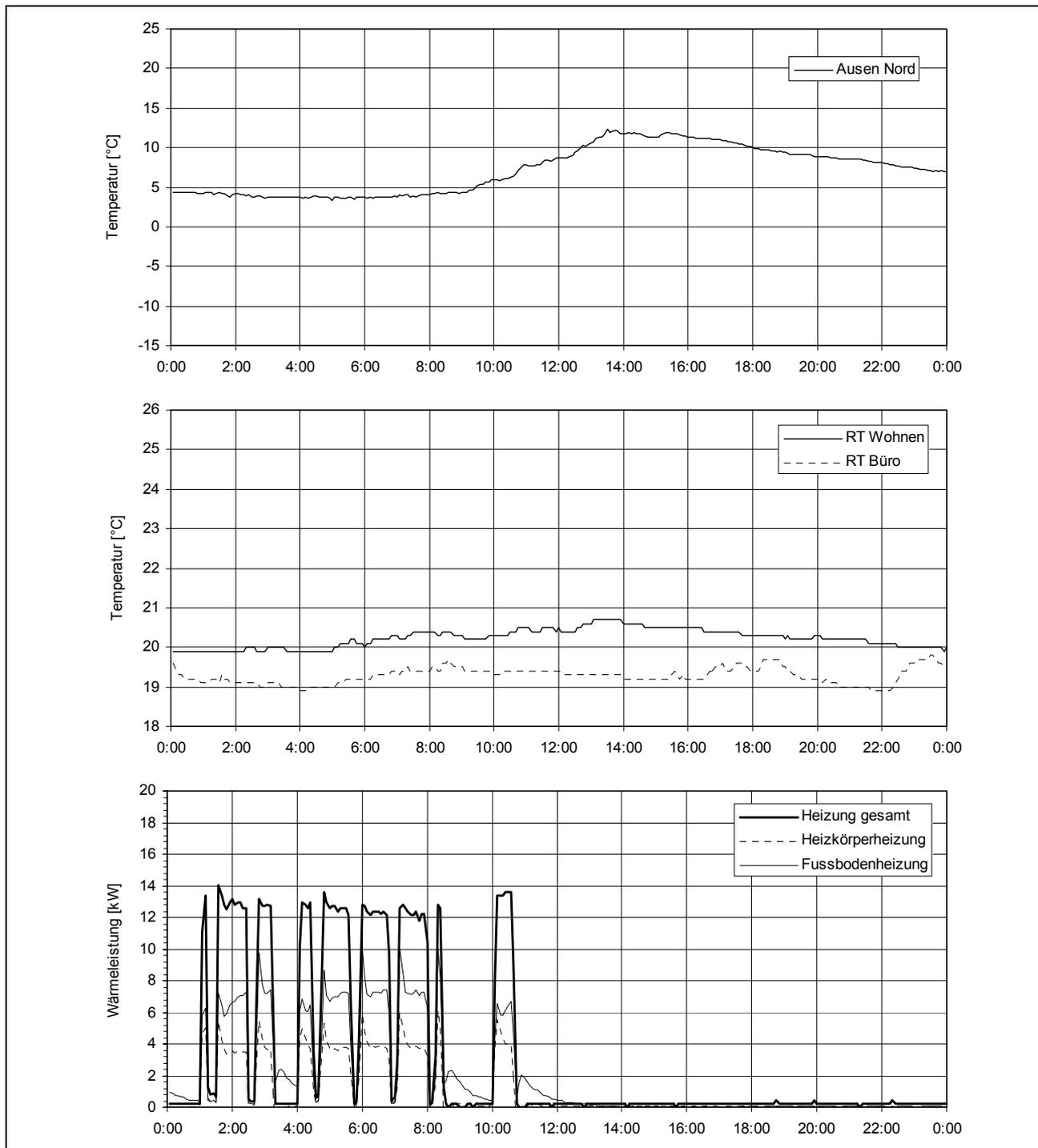


Abbildung 33: Modellbasierter PBM-Regler, Donnerstag 08.03.01

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 34 untere Diagramme):** Der Beobachtungszeitraum beträgt etwa 3 Wochen. Die Aussentemperatur liegt zu Beginn zeitweise noch deutlich unter  $0^{\circ}\text{C}$  und steigt dann auf Werte um  $10^{\circ}\text{C}$  an.

**Häufigkeit Raumtemperaturen (Abbildung 34 oberes Diagramm):** Der Regler war auf eine Soll-Raumtemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  programmiert. Diese wird im Wohnzimmer erreicht, während das Büro um 1 K tiefer liegt (bei den späteren Versuchen mit diesem Regler wurde der Sollwert auf Wunsch der Bewohner etwas höher eingestellt). Die Schwankungen der Raumtemperatur sind ausserordentlich gering. Die Häufigkeitsverteilung im Wohnzimmer ist mit derjenigen der sehr trägen Referenzanlage Waltalingen in Abbildung 26 vergleichbar.

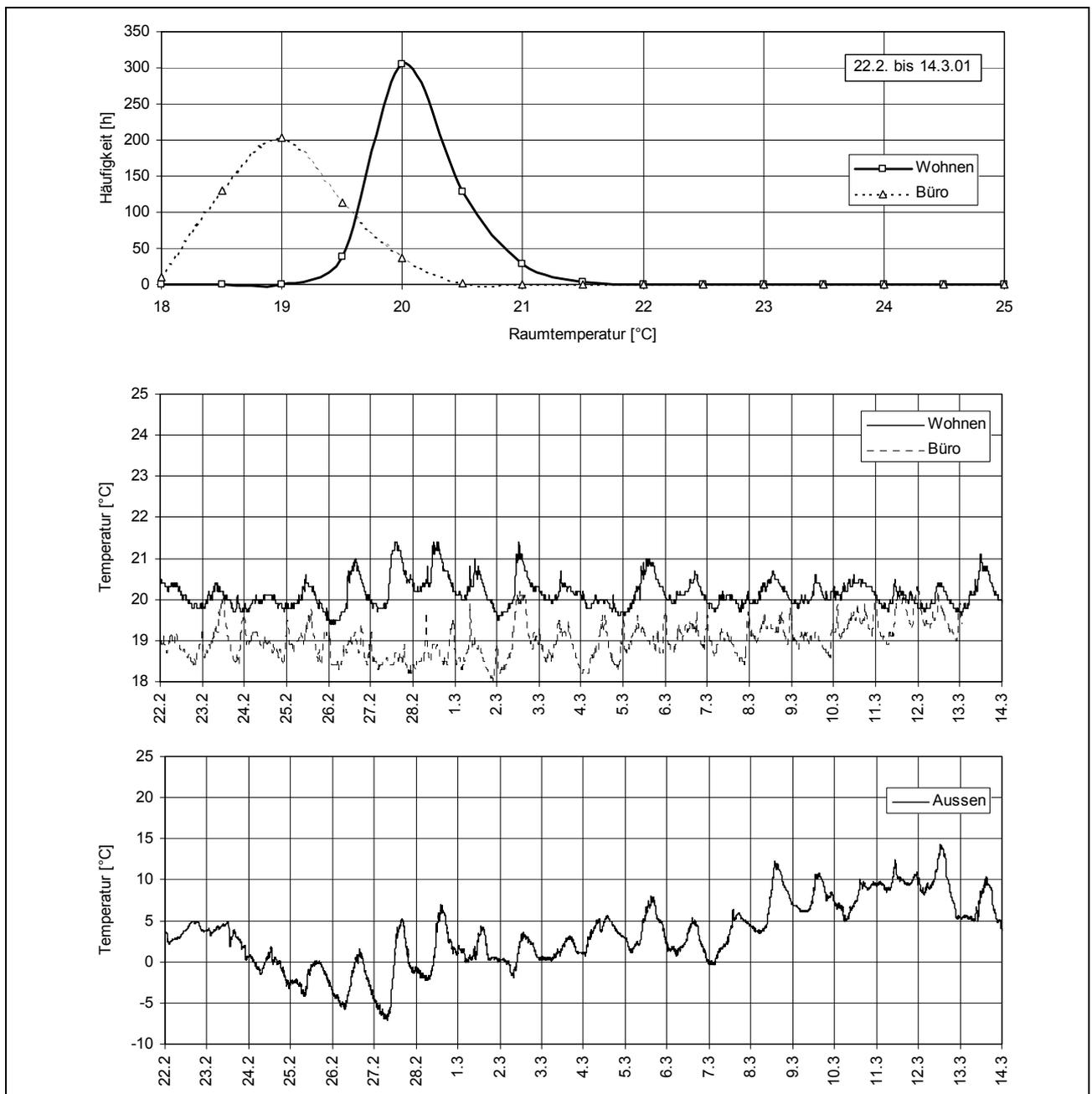


Abbildung 34: Modellbasierter PBM-Regler, 22.02.-14.03.01

### 8.3.7 Modellbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – Januar 02

Im Januar 2002 wurde der modifizierte modellbasierten PBM-Regler an der Referenzanlage mit hohem Heizkörperheizungsanteil von 67% betrieben.

**Typischer Tag (Abbildung 35):** Dies ist der kälteste Tag dieser Versuchsperiode mit Aussentemperaturen bis  $-8^{\circ}\text{C}$ . Die Wärmepumpe läuft praktisch durch. Auffallend sind die Unterbrechungen durch die Abtauststeuerung alle 99 Minuten, obwohl eine Abtauung bei diesen tiefen Temperaturen mit trockener Luft gar nicht nötig wäre (dies hat zwar keinen Zusammenhang mit PBM, zeigt aber, dass eine Verbesserung der Abtauststeuerung, insbesondere bei tieferen Aussentemperaturen, wünschenswert wäre).

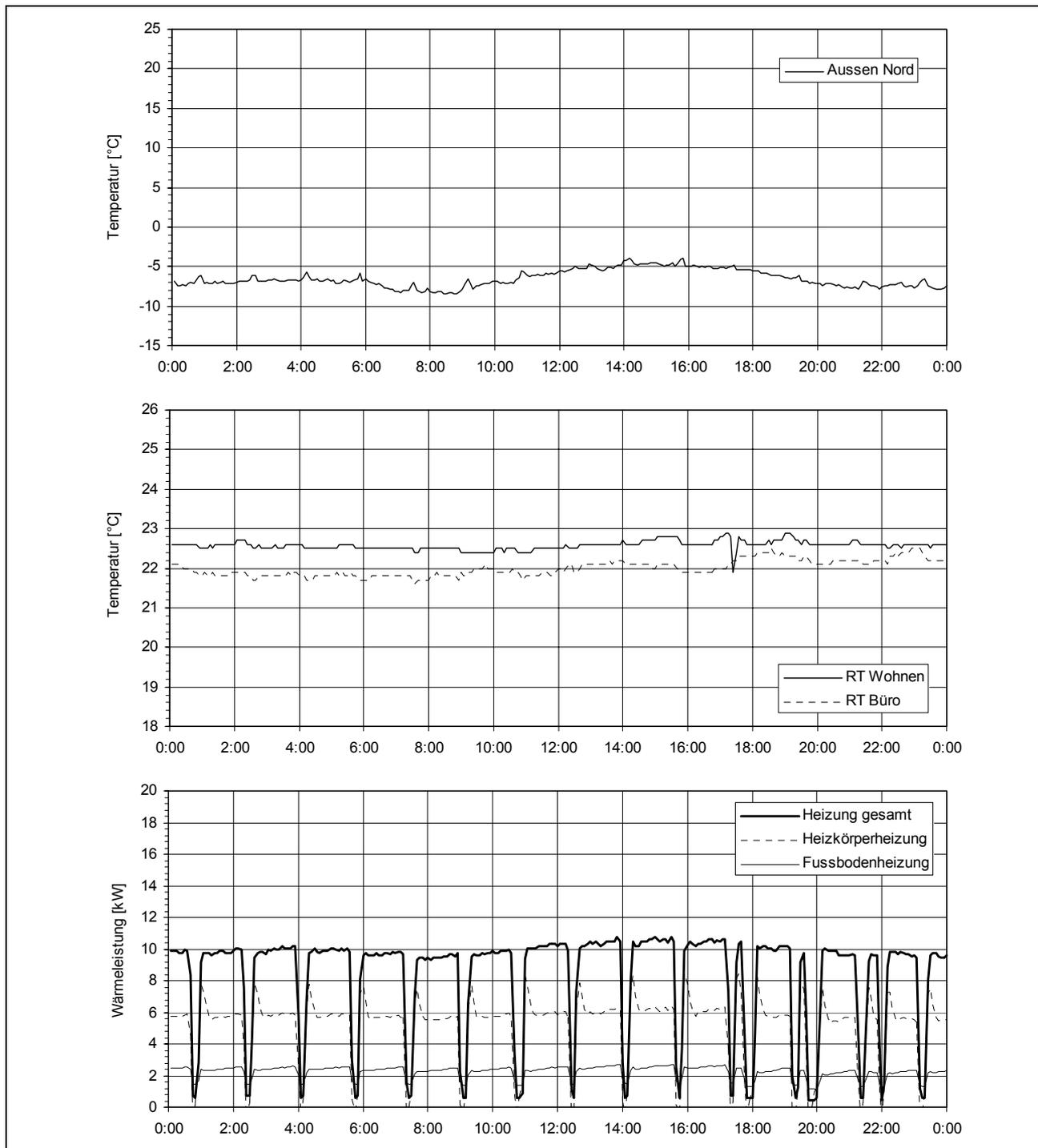


Abbildung 35: Modellbasierter PBM-Regler, Samstag 05.01.02

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 36 untere Diagramme):** Typischer Betrieb über drei Wochen während der kältesten Jahreszeit. Die Aussentemperaturen liegen zu Beginn unter  $-5^{\circ}\text{C}$  und steigen gegen das Ende des Beobachtungszeitraums auf knapp über  $5^{\circ}\text{C}$  an; die Sonneneinstrahlung war relativ klein.

**Häufigkeit Raumtemperaturen (Abbildung 36 untere Diagramme):** Die Häufigkeitsverteilung ist mit derjenigen des Rücklauftemperaturreglers in Abbildung 24 vergleichbar. Der relativ kleine «Fuss» um  $24^{\circ}\text{C}$  deutet auf geringe Sonneneinstrahlung hin.

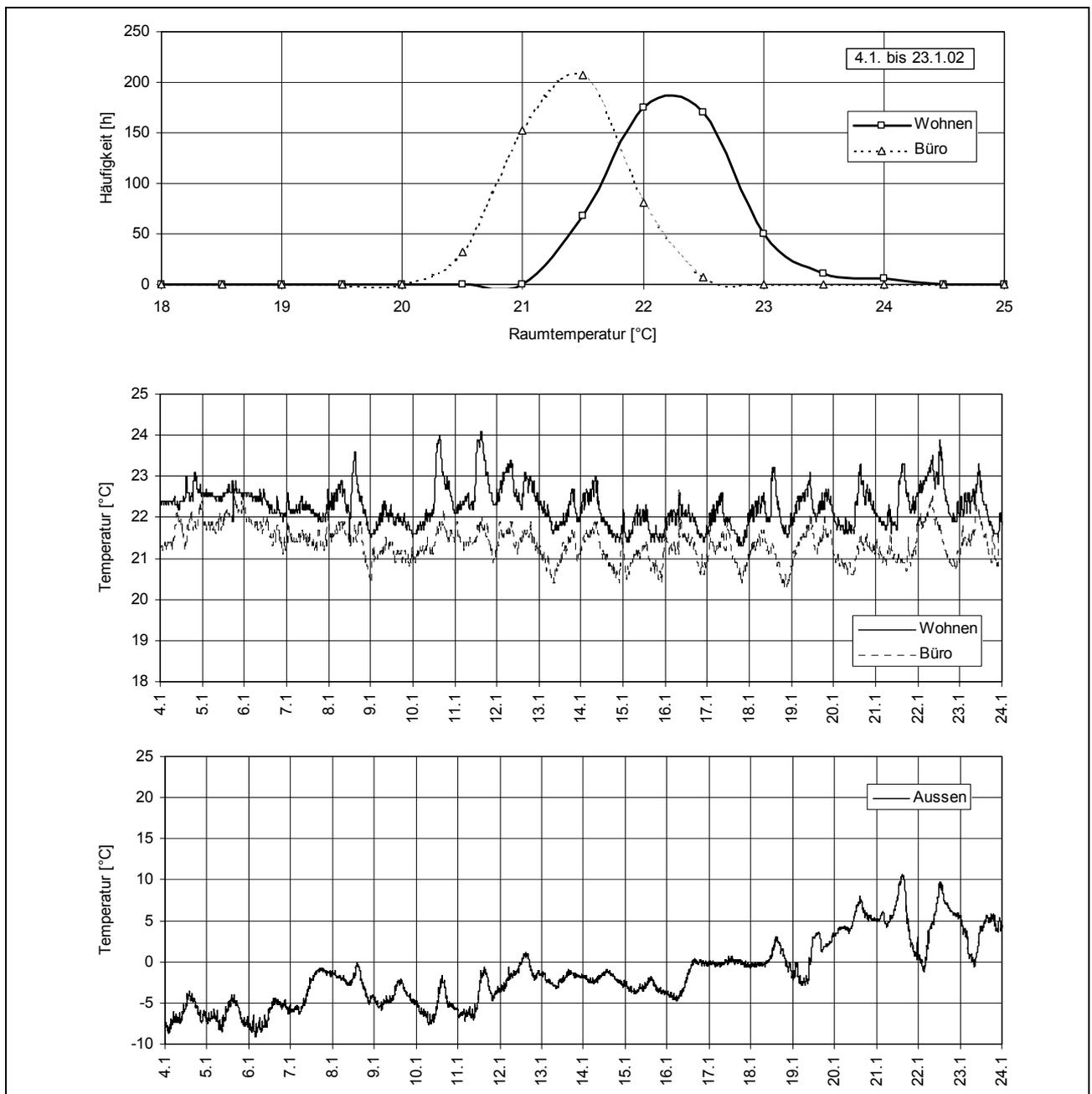


Abbildung 36: Modellbasierter PBM-Regler, 04.01.-23.01.02

### 8.3.8 Modellbasierter PBM-Regler – 33% FBH / 67% HKH – März 02

Nach dem Versuchsbetrieb im sehr kalten Januar 2002 konnte der modellbasierten PBM-Regler im März noch ein zweites Mal betrieben werden.

**Typischer Tag (Abbildung 37):** Dies ist ein typischer Tag mit stärkerer Sonneneinstrahlung. Die Raumtemperatur im Wohnzimmer steigt von 21,5°C auf 23°C an, während die Raumtemperatur im Büro konstant auf 21°C bleibt. In der Niedertarifzeit erfolgt die Energiezufuhr in 5 Paketen. Der Beobachter im PBM-Regler erkennt offenbar, dass die Raumtemperatur zu hoch ist und unterbricht am Nachmittag die Energiezufuhr. Erst am Abend erfolgt noch eine Hochtarif-Energiezufuhr in zwei kleineren Paketen.

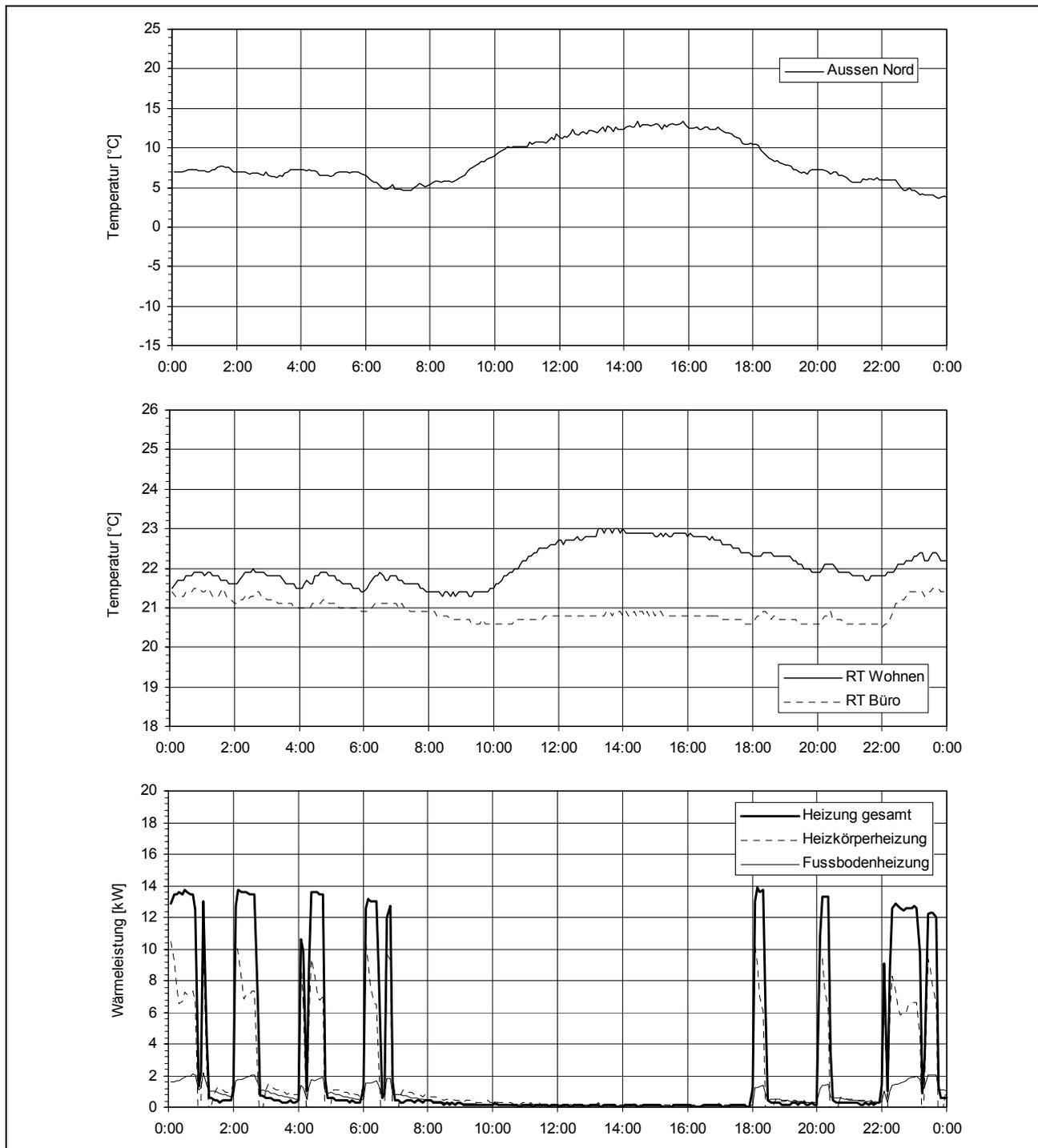


Abbildung 37: Modellbasierter PBM-Regler, Freitag 08.03.02

**Beobachtungszeitraum (Abbildung 38 untere Diagramme):** Typischer Betrieb über zwei Wochen im März. Die Aussentemperaturen liegen zu Beginn noch unter  $-5^{\circ}\text{C}$  und steigen gegen das Ende des Beobachtungszeitraums auf knapp über  $5^{\circ}\text{C}$  an. Auffallend sind die zahlreichen Tage mit Sonne (erkennbar an der Wohnzimmertemperatur im Vergleich zur Bürotemperatur).

**Häufigkeit Raumtemperaturen (Abbildung 38 obere Diagramme):** Bei der Häufigkeitsverteilung des Wohnzimmers sind die beiden «Füße» auffallend. Der obere wird durch die häufige Sonneneinstrahlung und der untere durch die tieferen Raumtemperaturen zu Beginn der Beobachtungszeit verursacht, bevor die Raumtemperatur gesamthaft durch die anhaltende Sonneneinstrahlung anstieg. Ansonsten sind die Kurven mit denjenigen des Rücklauf temperaturreglers (Abbildung 24) und der Januar-Messung (Abbildung 36) vergleichbar.

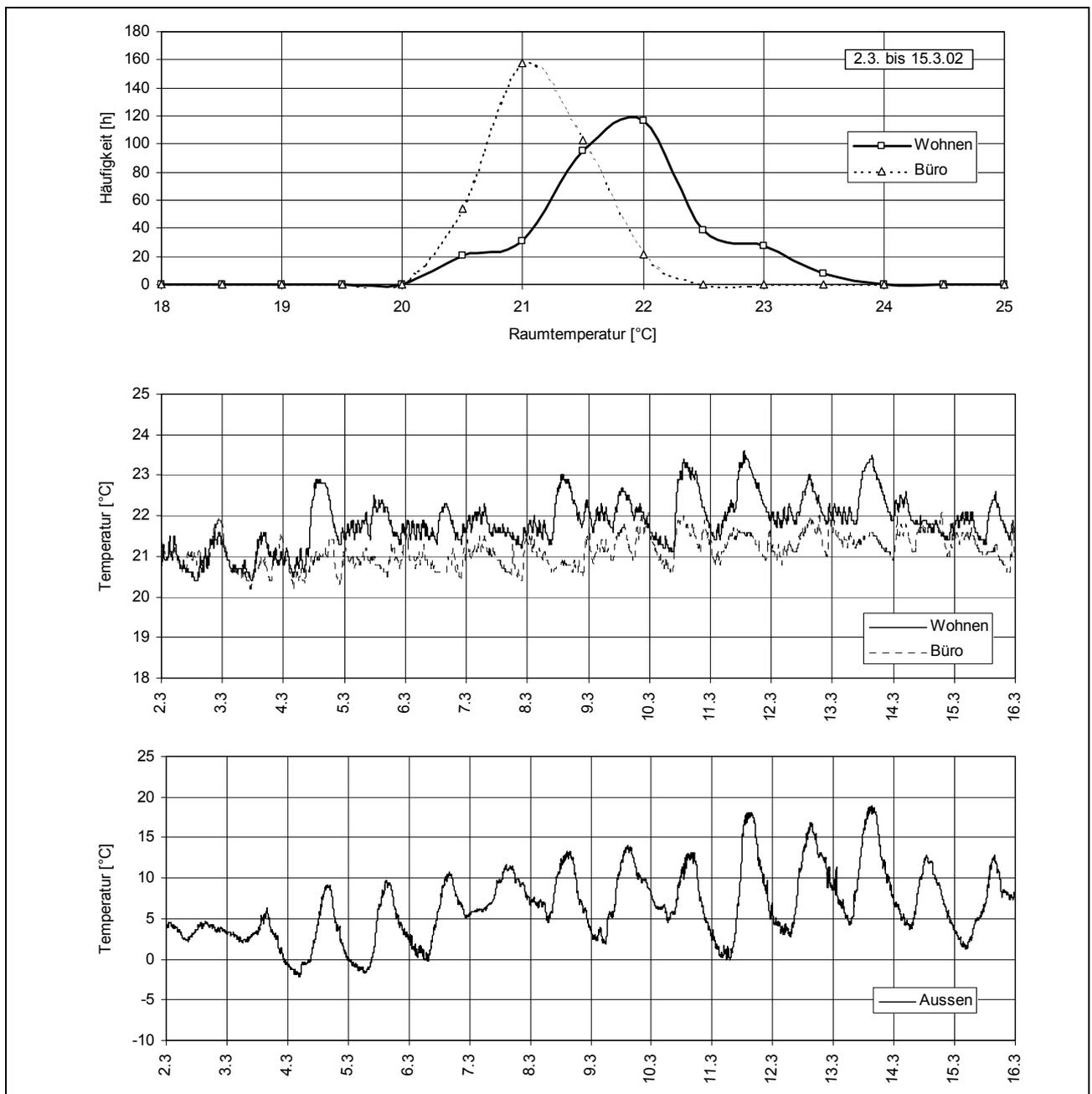


Abbildung 38: Modellbasierter PBM-Regler, 02.03.-16.03.02

### 8.3.9 Energiekennlinien

Interessant ist es nun, die Tageswerte der Energieproduktion in Abhängigkeit des Mittelwertes der Aussentemperatur und die daraus berechnete Energiekennlinie darzustellen und diese mit derjenigen zu vergleichen, die der Auslegung zugrunde gelegt wurde. Zur Erinnerung:

**Auslegekennlinie Winterthur-Seen = 240 kWh/d bei -15°C AT; Heizgrenze bei 14°C AT)**

■ **Rücklauftemperaturregler (Abbildung 39):** Relativ grosse Streuung der Tageswerte, die resultierende Energiekennlinie entspricht aber recht genau der Auslegekennlinie.

■ **Energiekennlinienbasierter PBM-Regler aus Phase 1 (Abbildung 40):** Hier liegt die Mehrzahl der Tageswerte exakt auf der am Regler eingestellten Energiekennlinie (Achtung: Referenzanlage Waltalingen mit Sole/Wasser-Wärmepumpe, hat nichts mit der oben aufgeführten Auslegekennlinie zu tun!). So muss es sein, wenn der Regler einwandfrei arbeitet, weil eben der Regler versucht, exakt die Energie entsprechend der eingestellten Energiekennlinie zuzuführen.

■ **Energiekennlinienbasierter PBM-Regler (Abbildung 41):** Hier müsste das Resultat analog Abbildung 40 aussehen. Die Tageswerte sind jedoch stark gestreut und die resultierende Energiekennlinie ist gegenüber der Auslegekennlinie deutlich zu tief. Einerseits zeigen sich hier die Programmierfehler dieses Reglers; andererseits zeigt die resultieren Raumtemperatur (Abbildung 28) aber auch, dass die Abweichungen offenbar nicht derart schlimm waren, dass es zu grösseren Kom-

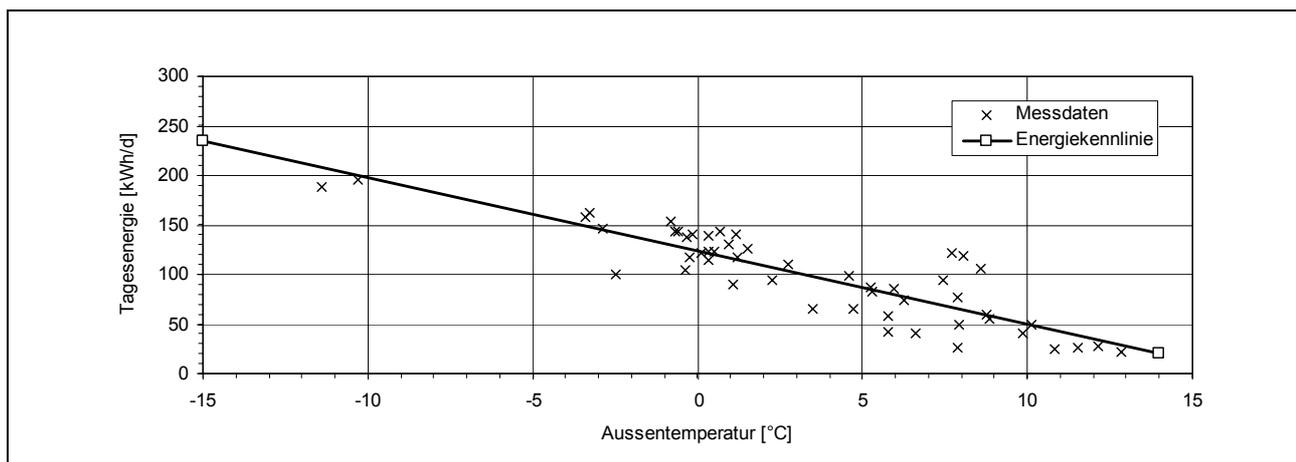


Abbildung 39: Energiekennlinie des Rücklauftemperaturreglers (Originalregler), 12.11.-25.11.01

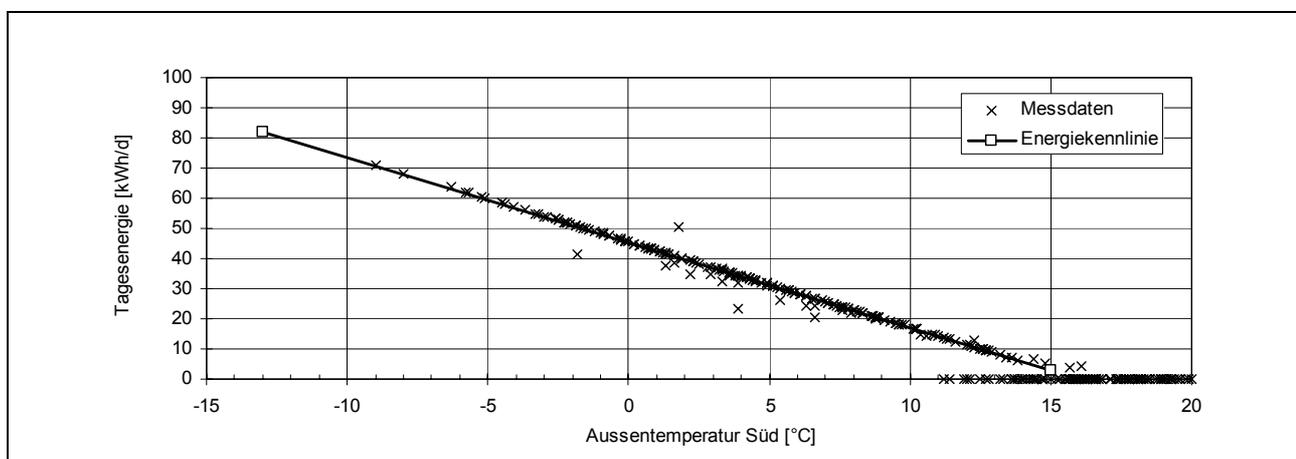


Abbildung 40: Energiekennlinie des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers aus Phase 1 (Referenzanlage Waltalingen mit Sole/Wasser-Wärmepumpe), 09.03.-08.04.99

fortmängeln geführt hätte.

■ **Laufzeitbasierter PBM-Regler (Abbildung 42):** Im Unterschied zum energiekennlinienbasierten PBM-Regler erfolgt hier die «Wärmezählung» nicht über die Laufzeit, den Momentanwert der Aussentemperatur und die Wärmepumpenkennlinie, sondern lediglich über die Laufzeit allein. Dies erklärt die grössere Streuung der Tageswerte. Die resultierende Energiekennlinie stimmt recht gut mit der Auslegekennlinie überein, was sich auch in der guten Einhaltung der Raumtemperatur manifestiert (Abbildung 30).

■ **Modellbasierter PBM-Regler (Abbildung 43):** Da in diesem Regler über einen Beobachter auch eine fiktive Raumtemperatur zur Verfügung steht, ergibt sich hier für jeden Tag eine individuelle kurze Tages-Energiekennlinie. Aus der Schar dieser Kennlinien resultiert die hier dargestellte resultierende Energiekennlinie. Diese entspricht bei tiefen Aussentemperaturen sehr gut der Auslegekennlinie (oberes Diagramm) bei höhere Aussentemperaturen verläuft sie jedoch deutlich flacher.

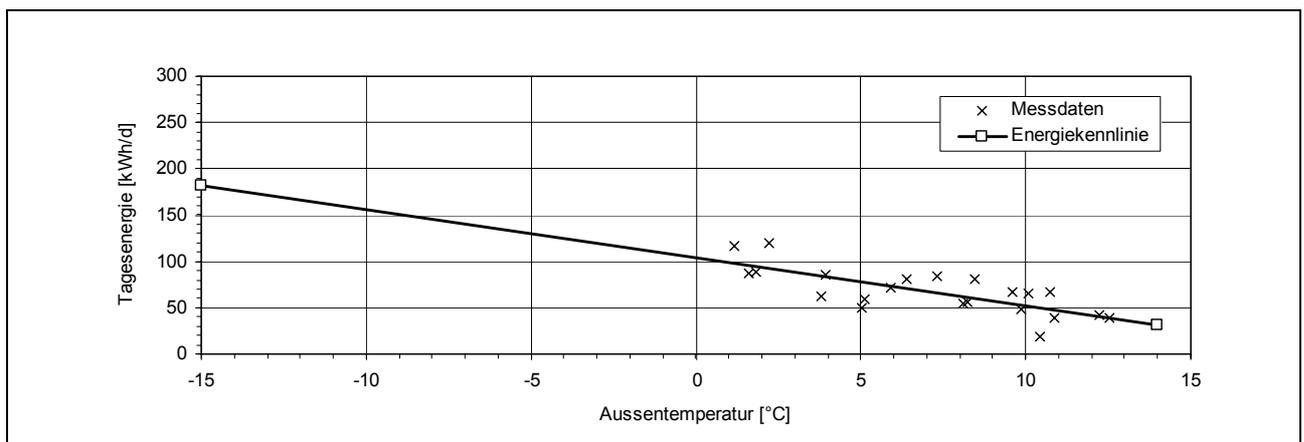


Abbildung 41: Energiekennlinie des energiekennlinienbasierten PBM-Reglers, 17.03.-13.04.02

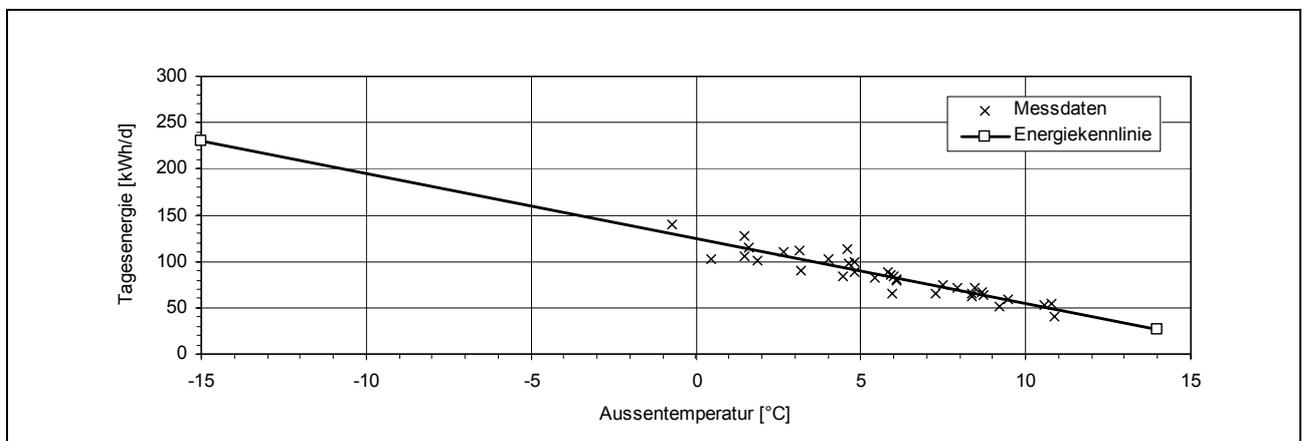


Abbildung 42: Energiekennlinie des laufzeitbasierten PBM-Reglers, 25.01.-28.02.02

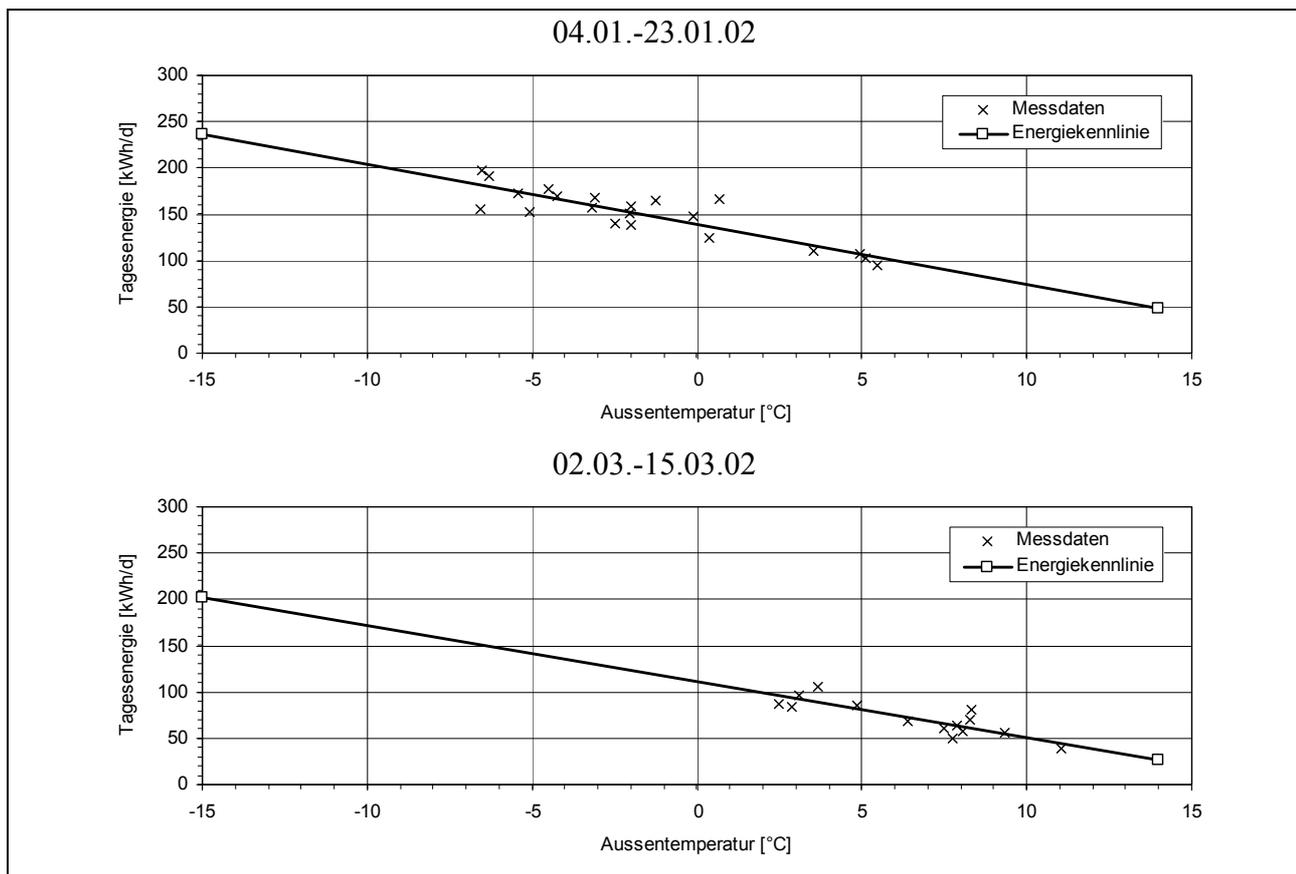


Abbildung 43: Energiekennlinien des modellbasierten PBM-Reglers (Beobachtungszeitraum jeweils über den Diagrammen angegeben)

### 8.3.10 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen

Im Zusammenhang mit PBM taucht immer wieder die Frage auf, ob die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen durch die längeren Pulse nicht zu stark ansteigen. Dabei spielt die Art der Pulsweitenmodulation keine Rolle. Bei allen getesteten PBM-Reglern sind die resultierenden Pulslängen ähnlich.

Abbildung 44 zeigt typische Temperaturverläufe des laufzeitkennlinienbasierten PBM-Reglers am Beispiel des 19.02.02, also dem gleichen Tag wie in Abbildung 29:

- Fussbodenheizung: Temperaturdifferenz Vorlauf/Rücklauf etwa 3 K, maximaler anstieg der Vorlauftemperatur von 25 auf 28°C (Verflüssiger-Austritt durch Handmischer heruntergemischt)
- Heizkörperheizung: Temperaturdifferenz Vorlauf/Rücklauf etwa 5 K, maximaler anstieg der Vorlauftemperatur von 42 auf 45°C (entsprechend Verflüssiger-Austritt)
- Verflüssiger: Temperaturdifferenz Austritt/Eintritt etwa 8 K, maximaler anstieg der Verflüssiger-Austrittstemperatur von 42 auf 45°C

Während des ganzen Versuchsbetriebs ergab sich nie ein Zustand, bei dem eine Maximalbegrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur sinnvoll gewesen wäre.

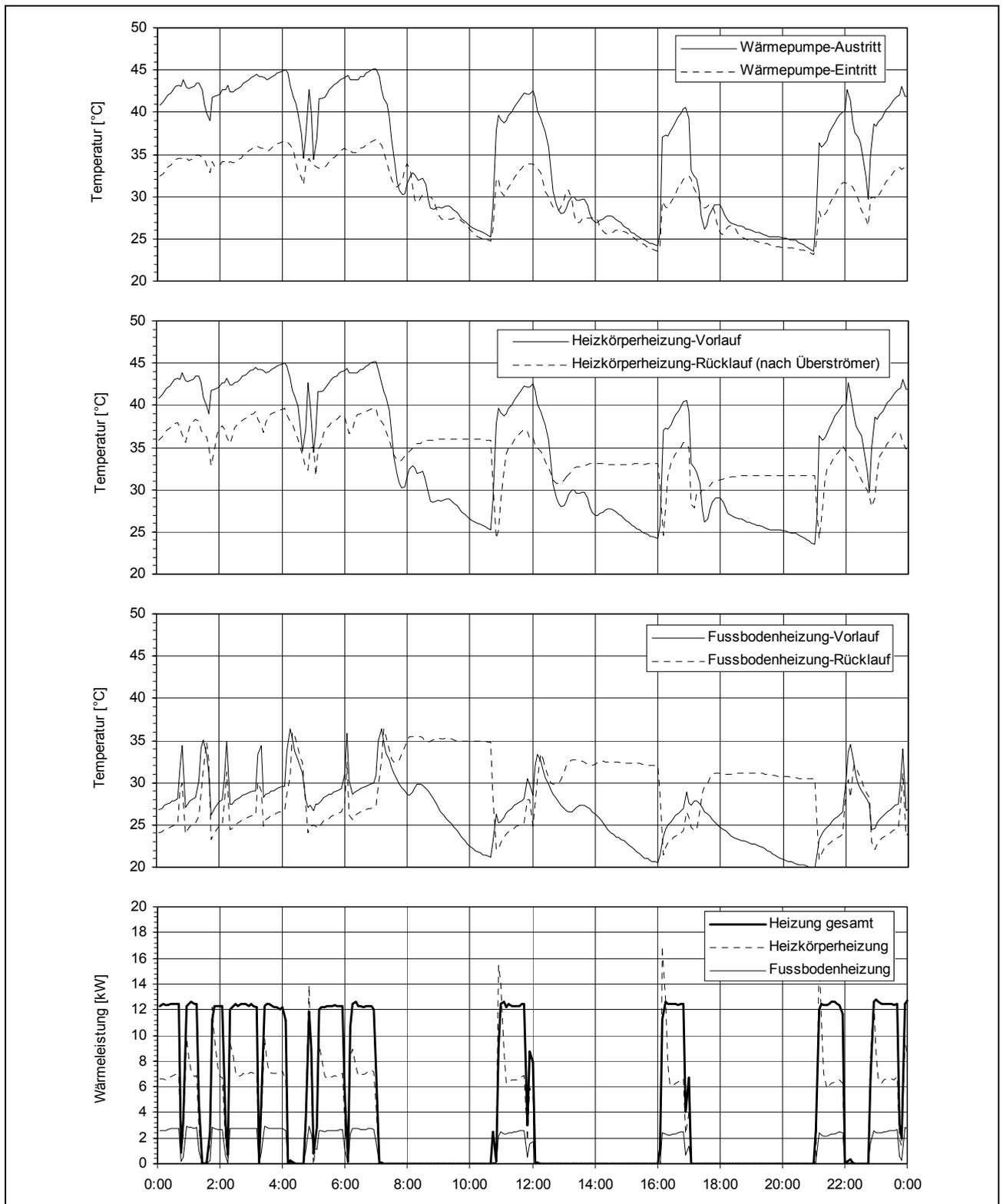


Abbildung 44: Vorlauf und Rücklauftemperaturen am Beispiel des laufzeitkennlinienbasierten PBM-Reglers am Dienstag 19.02.02 (siehe auch Abbildung 29); weil die Pumpen abgeschaltet werden, sind die Temperaturen nur aussagekräftig, wenn der Verdichter läuft

## 8.4 Optimierungsmöglichkeiten

### 8.4.1 Raumtemperatur- und Sonnenintensitätsaufschaltung

Durch Sonneneinstrahlung stieg bei allen Regelkonzepten die Raumtemperatur jeweils während einiger Stunden um 1...1,5 K an. Bei der Referenzanlage Winterthur-Seen hätte eine Raumtemperaturaufschaltung nur wenig gebracht. Dies gilt vermutlich für 90% aller Fälle!

In extremen Fällen bezüglich Lage und Architektur des zu beheizenden Gebäudes könnte die Verwendung eines Raumtemperaturfühlers jedoch zweckmässig sein (z. B. Südlage mit starker Sonneneinstrahlung, offener Architektur und mit einem geeigneten Referenzraum). Insbesondere in der Übergangszeit könnte überschüssige Wärme schnell erkannt werden, und der Regler könnte das Laufen der Wärmepumpe reduzieren oder sogar ganz verhindern, sobald die maximale Raumtemperatur überschritten wird. Bei extremen Südlagen und entsprechender Gebäudearchitektur könnte der Solargewinn sogar direkt mit einem Sonnenintensitätsfühler gemessen werden.

Ob der Rücklauf temperaturregler und die modellbasierte PBM, die ja eine gewisse Raumtemperatur-Information über die Rücklauf temperatur erhalten, besser sind als die beiden kennlinienbasierten PBM-Regler, kann infolge der sehr unterschiedlichen Beobachtungsperioden nicht gesagt werden (hier muss auf Phase 3 verwiesen werden).

Bei allen Regelkonzepten könnte eine Raumtemperaturaufschaltung (oder sogar ein Sonnenintensitätsfühler) in extremen Fällen sicher Vorteile bringen (beim laufzeitkennlinienbasierten PBM-Regler bereits eingebaut, hier aber noch nicht getestet).

### 8.4.2 Begrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur

Während des ganzen Versuchsbetriebs ergab sich in der Referenzanlage Winterthur-Seen nie ein Zustand, bei dem eine Maximalbegrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur sinnvoll gewesen wäre. Bei Anlagen mit einem Thermostatventilanteil bis etwa 25% der Heizfläche sind deshalb kaum Probleme zu erwarten.

Bei Anlagen mit grossem Thermostatventilanteil von über 25% der Heizfläche kann aus heutiger Sicht folgendes gesagt werden: Der Rücklauf temperaturregler kommt bei korrekter Schaltung mit Speicher in ein kontrolliertes Takten entsprechend der Speichergrösse. Bei PBM wird ein Takten über die Maximalbegrenzung der Verflüssiger-Austrittstemperatur eintreten, wobei dieses Ausschalten allerdings als Laufzeit gezählt werden sollte, um Überproduktion zu verhindern, und die Pumpe sollte weiterlaufen (bisher nicht realisiert).

Hierzu sind noch Abklärungen in Phase 3 notwendig.

### 8.4.3 Abtausteuering

An den kältesten Tagen dieser Versuchsperiode mit Aussentemperaturen bis  $-8^{\circ}\text{C}$  (vgl. Abbildung 35), an den die Wärmepumpe praktisch durchgehend lief, fielen die Unterbrechungen durch die Abtausteuering alle 99 Minuten auf, obwohl eine Abtauung bei diesen tiefen Temperaturen mit trockener Luft gar nicht nötig gewesen wäre. Dies hat zwar keinen Zusammenhang mit PBM, zeigt aber, dass eine Verbesserung der Abtausteuering, insbesondere bei tieferen Aussentemperaturen, wünschenswert wäre.

Beim laufzeitkennlinienbasierten PBM-Regler war das Zusammenspiel zwischen Abtaufunktion und Pulsverteilung infolge Aufteilung in zwei Regler noch nicht optimal gelöst. Wenn bei einer Abtausteuering mit Temperatur/Zeit-Kriterium bekannt wäre, nach welcher Zeit abgetaut werden muss und wie lange die Abtauung dauert, könnte dies für die Verteilung der Pulse berücksichtigt und damit die Anzahl der Startvorgänge nochmals reduziert werden.

Ausserdem sollten die Einflüsse der unterschiedlichen Abtauverfahren auf die einzelnen Regelstrategien (inkl. Rücklauf temperaturregelung) in Phase 3 noch näher untersucht werden:

- Heissgas-Abtauung (Referenzanlage): Verdichter läuft zwar im Abtaubetrieb, aber das Wärmeabgabesystem wird nicht beeinflusst
- Abtauung durch Prozessumkehr: Verdichter läuft und das Wärmeabgabesystem wird als Wärmequelle der Wärmepumpe zur Abtauung benutzt
- «Retrofit»-Abtauung: Verdichter läuft nicht, das Wärmeabgabesystem wird direkt als Wärmequelle für die Abtauung benutzt

#### **8.4.4 Ladung des Wassererwärmers**

Die Referenzanlage Winterthur-Seen hat einen Elektro-Wassererwärmer. Die Ladung des Wassererwärmers über die Wärmepumpe war hier deshalb gar nicht relevant. Trotzdem wäre eine Ladung des Wassererwärmers über eine Vorrangschaltung mit allen Regelstrategien möglich gewesen.

Im Falle des laufzeitkennlinienbasierten PBM-Reglers wäre der laufende Puls unterbrochen worden. Am Ende der Ladung hätte die Wärmepumpe für die minimale Stillstandzeit gestoppt und die Anzahl und die Zeitdauer der Pulse wäre neu berechnet worden.

Beim energiekennlinienbasierten PBM-Regler aus Phase 1 (Referenzanlage Waltalingen) war die Ladung des Wassererwärmers wie folgt gelöst (vgl. Abbildung 25):

- Anhebung des Wassererwärmer-Sollwertes im Niedertariffenster, wenn die Wärmepumpe nicht zum Heizen benutzt wurde
- Vorrangschaltung in der übrigen Zeit (mit tieferem Wassererwärmer-Sollwert)

Die Strategie bei Brauchwasserladung sollte im Rahmen von Phase 3 überprüft werden.

## 9. Zusammenarbeit

### 9.1 Nationale Zusammenarbeit

Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit den beiden Industriepartnern Satag Thermotechnik AG und Siemens Building Technologies (Europe) AG. Diese haben auch eine weitere Zusammenarbeit in Phase 3 zugesagt.

Zu den nachfolgenden Projekten mit verwandter Zielsetzung wird die Kommunikation sichergestellt:

- D. Zogg und E. Shafai: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Bern, Bundesamt für Energie. (Laufendes Projekt, vgl. [6])
- Th. Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW. Bern, Bundesamt für Energie. (Laufendes Projekt, vgl. [9])
- M. Erb et al.: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (FAWA). Bern, Bundesamt für Energie. (Laufendes Projekt)

### 9.2 Internationale Zusammenarbeit

#### 9.2.1 Erweitertes Lehrkolloquium an der Technischen Universität Dresden

Am 2. Februar 2001 fand das 36. erweiterte Lehrkolloquium an der Technischen Universität Dresden statt. Die Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Habil. Zschernig arbeitet ebenfalls auf dem Gebiet der Wärmepumpen. Das aktuelle Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der Entwicklung von neuen, bedarfsgerechten Schaltungen. Der Abschluss dieses Projekts wurde zum Anlass genommen, um die Ergebnisse im Rahmen des erwähnten Kolloquiums der Fachwelt vorzustellen. Der Teilnehmerkreis setzte sich aus Vertretern von Forschung und Entwicklung, Herstellern, Planern und Installateuren zusammen. E. Shafai wurde eingeladen, um über das Prinzip der PBM, ihre Anwendung und erste Erfahrungen zu sprechen. Der Titel seines Vortrages lautete: «Die Revolution bei der Wärmepumpenregelung – Pulsbreitenmodulation – Prinzip und praktische Erfahrungen».

Aus Kostengründen wurde keinen Tagungsband zum Kolloquium produziert.

#### 9.2.2 IASTED – International Conference on Control and Applications

Vom 28. bis 30. Juni 2001 fand in Banff, Kanada, die «IASTED – International Conference on Control and Applications» statt. R. Wimmer präsentierte dort das von E. Shafai, H. P. Geering und ihm eingereichte Paper mit dem Titel «Model Predictive Control for Heat Pump Heating Systems» [10]. Dieses Paper beschreibt den im März 2001 implementierten modellbasierten Regler und die Messresultate.

#### 9.2.3 7th IEA Heat Pump Conference Beijing

Vom 19. bis 22. Mai 2002 fand in Beijing, China, die «7th IEA Heat Pump Conference» statt. Hier hat E. Shafai das Paper mit dem Titel «A New Approach for Heat Pump Heating Systems» [12] präsentiert. Es wurde sowohl der kennlinienbasierte als auch der modellbasierte PBM-Regler vorgestellt, wobei das Schwergewicht bei der Beschreibung des letzteren lag.

## 10. Literaturverzeichnis

- [1] H. R. Gabathuler: Einbindungsprobleme von Wärmepumpen. Projektvorschlag B3 «Witterungsgeführte Pulsbreitenmodulation». Bern: Bundesamt für Energie, 1993.
- [2] Th. Afjei et al.: Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Bern: Bundesamt für Energie, 1998.
- [3] R. Wimmer, E. Shafai, H. R. Gabathuler, H. Mayer: Pulse-width modulation for low-power heat pump heating systems. In: Proceedings of the 6th IEA Heat Pump Conference, Berlin, 31 May - 2 June 1999.
- [4] H. R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Wärmepumpenanlagen. Phase 1. Schlussbericht. Bern: Bundesamt für Energie, 1999.
- [5] Thomas Afjei et al.: Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 3. Bern: Bundesamt für Energie, 2000.
- [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] H. Mayer und H. R. Gabathuler: Spezifikation energiekenlinienbasierte PBM. Diessenhofen: Gabathuler AG, 10. November 2000.
- [8] Hans P. Geering: Regelungstechnik. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001.
- [9] Th. Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW (STASCH). Zwischenbericht. Bern: Bundesamt für Energie, Juli 2001.
- [10] R. Wimmer, E. Shafai, H. P. Geering: Model Predictive Control for Heat Pump Heating Systems. In: Proceedings of the IASTED International Conference on Control and Applications, Banff, Alberta, Canada, Juni 2001.
- [11] Regelung mit Pulsbreitenmodulation (PBM). Methoden Pflichtenheft – Regler CD 50. Arbon: Satag Thermotechnik AG, 19. Oktober 2001.
- [12] 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.