

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

Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen

Phase 2a

ausgearbeitet durch
H. R. Gabathuler, H. Mayer
Gabathuler AG, Beratende Ingenieure
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen
gabathuler.ag@bluewin.ch
und
Dr. E. Shafai, R. Wimmer
Institut für Mess- und Regeltechnik
Eidgenössische Technische Hochschule
Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich
shafai@imrt.mavt.ethz.ch

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Die Programmierung und Implementierung der energiekenlinienbasierten PBM und der modellbasierten PBM durch die Industriepartner Siemens und Satag und die Erprobung der Regler auf der Referenzanlage ist wie folgt fortgeschritten (Stand Juni 2001):

■ **Energiekenlinienbasierter Siemens-Regler:** Die Programmierung und Implementierung durch Siemens ist abgeschlossen. Die Erprobung erfolgt in Phase 2b während der Heizsaison 2001/2002.

■ **Energiekenlinienbasierter Satag-Regler:** Die Programmierung und Implementierung durch Satag konnte wegen Termenschwierigkeiten noch nicht abgeschlossen werden (neuer Termin Satag: Ende September 2001). Die Erprobung erfolgt somit erst in Phase 2b während der Heizsaison 2001/2002.

■ **Modellbasierter Satag-Regler:** Die Programmierung erfolgte durch die ETH. Die Implementierung durch Satag ist abgeschlossen. Der Regler konnte noch während dreier Wochen in Phase 2a erfolgreich erprobt werden. Die gewünschte Raumtemperatur von 20 °C konnte, trotz stark schwankender Aussentemperatur, sehr gut eingehalten werden. Weitere Erprobungen erfolgen in Phase 2b während der Heizsaison 2001/2002.

Die weitere Erprobung der drei obgenannten Regler und der Vergleich mit dem herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauftemperaturregler erfolgt nun auf zwei Ebenen:

■ In **Phase 2b** während der Heizsaison 2001/2002 auf der Referenzanlage in Winterthur-Seen mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe. Es werden die folgenden zusätzlichen Erkenntnisse erwartet:

- Messresultate über eine vollständige Heizsaison mit der vollen Variabilität der Witterung eines «normal» kalten Winters
- Einfluss der Trägheit des Wärmeabgabesystems auf das Regelverhalten bei konstanter Gebäudeträgheit
- Zusätzliche Gewinnung von Datensätzen für den ETHZ-Prüfstand zur Emulation eines fiktiven Sanierungsobjekts (siehe unten), insbesondere auch für eine flinke Heizkörperheizung
- Erprobung des energiekenlinienbasierten Siemens-Reglers auf einer realen Anlage, was bisher nicht vorgesehen war

■ In **Phase 3** auf dem ETHZ-Prüfstand mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe: Reproduzierbare Untersuchungen erlauben den Vergleich der Regler unter gleichen Bedingungen

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

Inhaltsverzeichnis

1. Projektziel	4
1.1 Ausgangslage nach Phase 1	4
1.2 Generelles Projektziel Phase 2 und 3	4
1.3 Projektziel Phase 2a	4
2. Referenzanlage	5
2.1 Beschreibung	5
2.2 Messkonzept	6
3. Energiekennlinienbasierte PBM	7
3.1 Beschreibung Regelalgorithmus	7
3.1.1 Grundsätzliche Ideen	7
3.1.2 Einschränkungen	7
3.1.3 Eingabegrößen	8
3.1.4 Beschreibung	8
3.1.5 Typisches Verhalten	9
3.2 Implementierung	11
3.2.1 Energiekennlinienbasierter Siemens-Regler	11
3.2.2 Energiekennlinienbasierter Satag-Regler	11
3.3 Erprobung	11
3.3.1 Energiekennlinienbasierter Siemens-Regler	11
3.3.2 Energiekennlinienbasierter Satag-Regler	11
4. Modellbasierte PBM	12
4.1 Beschreibung Regelalgorithmus	12
4.1.1 Generelles Konzept	12
4.1.2 Anlagenmodell	12
4.1.3 Beobachter	14
4.1.4 Wettervorhersage	14
4.1.5 Optimierung	14
4.1.6 Pulsbreitenmodulation	14
4.2 Implementierung des modellbasierten Satag-Reglers	15
4.3 Erprobung des modellbasierten Satag-Reglers	16
5. Weiteres Vorgehen	18
5.1 Phase 2b: Erprobung auf Referenzanlage	18
5.2 Phase 3: Erprobung auf ETHZ-Prüfstand	18
6. Literaturverzeichnis	18

1. Projektziel

1.1 Ausgangslage nach Phase 1

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

- Die energiekenlinienbasierte 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» [2] an einer anderen Referenzanlage erfolgreich erprobt werden, allerdings nur während einer Woche

Zwei namhafte Firmen hatten aufgrund der obgenannten Resultate grosses Interesse an den neuen Regelstrategien bekundet und waren bereit, in Phase 2 an deren weiteren Erprobung mitzuwirken:

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

1.2 Generelles Projektziel Phase 2 und 3

Durch die beiden Industriepartner sollen zunächst auf Basis handelsüblicher Geräte Regler mit den neuen Regelstrategien programmiert und zur Erprobung zur Verfügung gestellt werden. Die Erprobung der Regelstrategien soll dann auf zwei Ebenen erfolgen:

- In Phase 2 auf einer Referenzanlage mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und der Charakteristik eines typischen Sanierungsobjekts: Die herkömmliche witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung und die beiden neuen Regelstrategien sollen alternativ gefahren und miteinander verglichen werden
- In Phase 3 auf dem ETHZ-Prüfstand mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe: Reproduzierbare Untersuchungen erlauben den Vergleich der verschiedenen Regelstrategien unter gleichen Bedingungen

1.3 Projektziel Phase 2a

In Phase 2a (01.08.2000 – 30.06.2001) sollen folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- 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 energiekenlinienbasierte PBM
- Definition der Algorithmen modellbasierte PBM
- Implementierung beider Algorithmen in zwei Wärmepumpenregler durch Satag
- Implementierung des energiekenlinienbasierten Algorithmus in einen Regler durch Siemens
- Erprobung der herkömmlichen Regelstrategie (Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung) und der beiden neuen Regelstrategien (energiekenlinienbasierte PBM und modellbasierte PBM) auf der Referenzanlage

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:

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

Die ursprüngliche hydraulische Schaltung wies einige störende Mängel auf (elektrische Zusatzheizung im Seriespeicher im Rücklauf, Hand-Mischventil usw.), die für die Messungen eliminiert werden mussten. Die für die Messungen massgebende hydraulische Schaltung zeigt Abbildung 1.

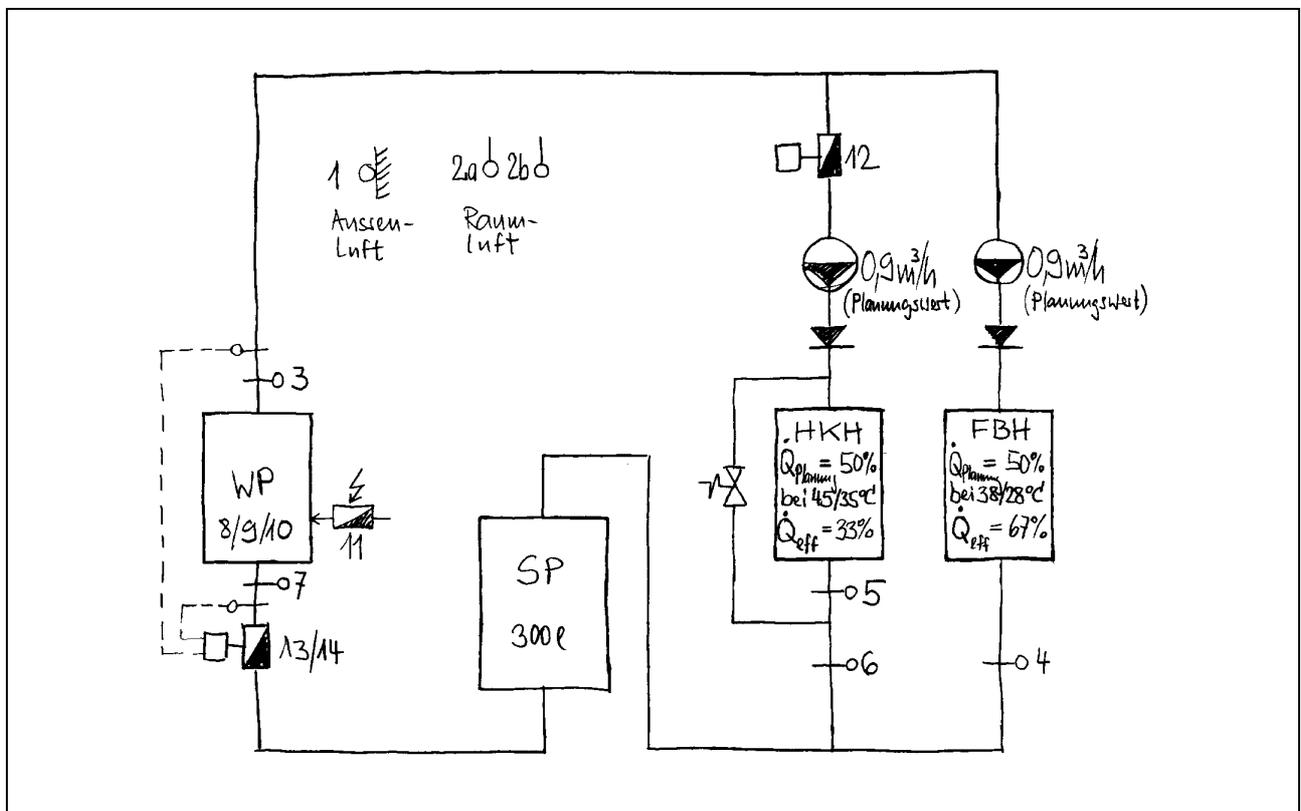


Abbildung 1: Prinzipschema (die Numerierung der Messstellen bezieht sich auf Tabelle 2)

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
Rücklauftemperatur	Fussbodenheizung	32°C	bei	–15°C
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 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 1 und Tabelle 2).

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

Tabelle 2: Messstellenliste (die Numerierung der Messstellen bezieht sich Abbildung 1)

3. Energiekennlinienbasierte PBM

3.1 Beschreibung Regelalgorithmus

3.1.1 Grundsätzliche Ideen

Dem Regelalgorithmus liegen grundsätzlich die folgenden Ideen zu Grunde:

1. Die bisherige «Heizkurve» soll durch die «Energiekennlinie» ersetzt werden.
2. Die bisherigen Betriebsarten «Reduziert» und «Normal» sollen durch «Niedertarif» und «Hochtarif» ersetzt werden.
3. Der Benutzer soll neben der bisherigen Korrekturmöglichkeit «wärmer/kälter» noch zusätzlich die Korrekturmöglichkeit «kostensparender/komfortabler» erhalten.
4. Die Energiezufuhr im Niedertarif soll möglichst am Ende der Niedertarifzeit erfolgen, damit der Benutzer die Nacht nicht zu warm empfindet, aber am Morgen einen warmen Fussboden vorfindet.
5. Die Energiezufuhr im Hochtarif soll bevorzugt am Ende der Hochtarifzeit erfolgen, damit der Benutzer durch den Energieüberschuss der Niedertarifzeit den Morgen nicht zu warm empfindet, aber am Abend einen warmen Fussboden vorfindet.
6. Von Minimallast bis Maximallast sollen sich sowohl für knapp dimensionierte wie für überdimensionierte Wärmepumpen Wärmepakete mit sinnvollen Impuls-Pausen-Verhältnissen ergeben.

3.1.2 Einschränkungen

Für die vorliegende Beschreibung des Regelalgorithmus gelten folgende Einschränkungen:

- Gilt grundsätzlich für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (später zu erweitern für Sole-Wasser-Wärmepumpe)
- Zwei fixe Zonen für Niedertarif 22.00-07.00 und Hochtarif 07.00-22.00 (später für beliebig einstellbare Niedertarifzeit, eventuell auch für mehr als zwei Zonen)
- Die Verflüssiger-Austrittstemperatur ist in der einzustellenden Wärmepumpenkennlinie pauschal zu berücksichtigen (keine Kurvenschar vorgesehen)

Die folgenden Funktionen müssen zwar im Regler realisiert werden, sind aber in der nachfolgenden Beschreibung nicht näher beschrieben:

- Alle heute üblichen WP-Funktionen (Abtausteuern, Ansteuerung Pumpen, Sicherheitsfunktionen usw.)
- Überwachung Verflüssigeraustrittstemperatur (kann vorläufig über den Regelhochdruck realisiert werden)

3.1.3 Eingabegrößen

Eingabe durch	Im fertigen Regler (Vorschlag)	In der vorliegenden Beschreibung
WP-Hersteller bei der Auslieferung der Wärmepumpe	Wärmepumpenkennlinie, durch je 4 Punkte einzugeben: – inkl. Abtauung – ohne Abtauung → Aus der Töss-Messung berechnete Werte	Wärmepumpenkennlinie, durch je 4 Punkte einzugeben: – inkl. Abtauung – ohne Abtauung
Service-Monteur bei der Inbetriebsetzung der Anlage	Energiekennlinie definiert durch zwei Punkte (allenfalls fixe Verflachung gegen tiefere Aussentemperaturen): – Heizgrenze (Heizenergiebedarf = 0) – Heizenergiebedarf bei 0°C (ober anschaulicher: gewünschte Laufzeit bei 0°C) → Empfohlene Werte aus Art und Auslegung des Wärmeabgabesystems und der Gebäudebauart	Energiekennlinie durch drei Punkte einzugeben (dritter Punkt zur Berücksichtigung einer allfälligen Verflachung gegen tiefere Aussentemperaturen)
	Fixe minimale Pulslänge von z. B. 15 Minuten (keine Einstellung notwendig) Wunsch-Pulslänge → Empfohlener Wert aus Tabelle aufgrund von Art und Auslegung des Wärmeabgabesystems	Minimale Pulslänge Wunsch-Pulslänge
	Niedertarifzeit → Beim EW zu erfragen	Fixe Niedertarifzeit 22.00-07.00
	Maximale Verflüssigeraustrittstemperatur → Empfohlener Wert aus Tabelle aufgrund von Art und Auslegung des Wärmeabgabesystems	Nicht vorgesehen (kann vorläufig über den Regelhochdruck realisiert werden)
Benutzer während des Betriebs	wärmer/kälter	Anpassung Energiekennlinie
	kostensparender/komfortabler	Anteil Niedertarif

Tabelle 3: Eingabegrößen

3.1.4 Beschreibung

Eine ausführliche Beschreibung des Regelalgorithmus wird im Schlussbericht erfolgen. Vorläufig gilt die zuhanden der Industriepartner erstellte «Spezifikation energiekenlinienbasierte PBM» [3].

3.1.5 Typisches Verhalten

Den nachfolgenden Berechnungen liegt der reale Aussentemperaturverlauf des Tages gemäss Abbildung 4 zugrunde. Im Laufe des Tages sinkt der 24-Stunden-Mittelwert der Aussentemperatur von 7°C auf 1°C.

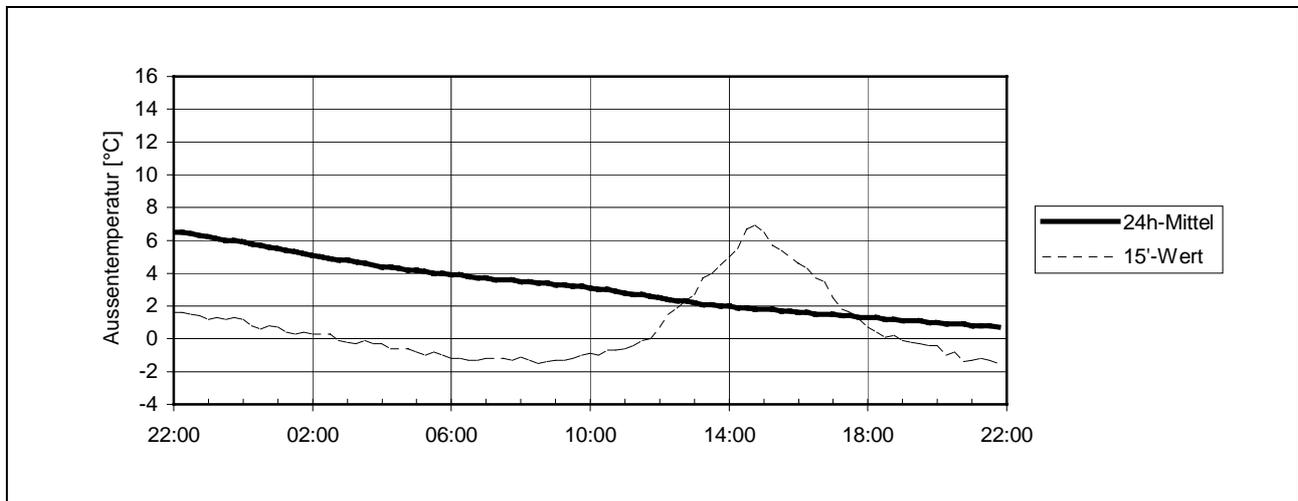


Abbildung 4: Aussentemperaturverlauf eines typischen Tages

Abbildung 5 bis Abbildung 7 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 5: Typische Normaleinstellung mit 60 Minuten Wunsch-Pulslänge und 50% Niedertarifanteil. Ergibt relativ gleichmässig verteilte Pulse mit längerer Pause zu Beginn der Hochtarifzone.
- Abbildung 6: 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 7: 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.

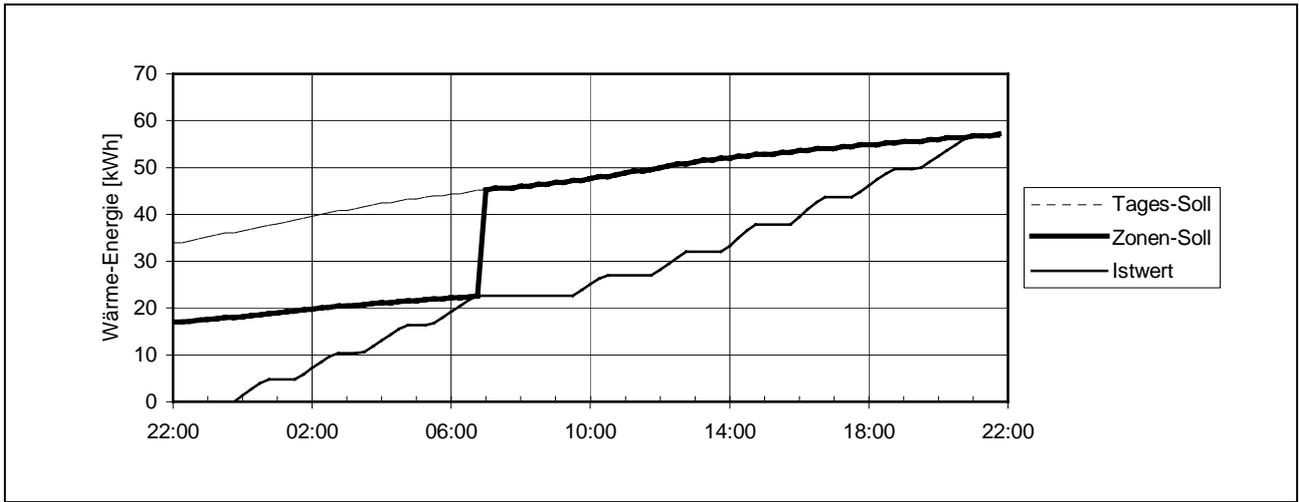


Abbildung 5: Typische Normaleinstellung

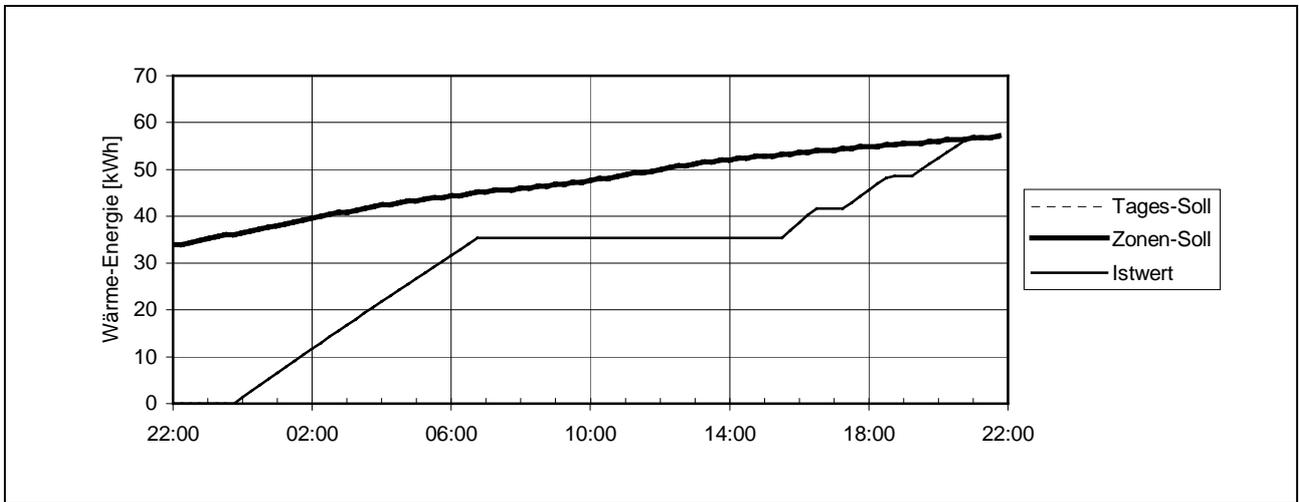


Abbildung 6: Typische Kostenspareinstellung

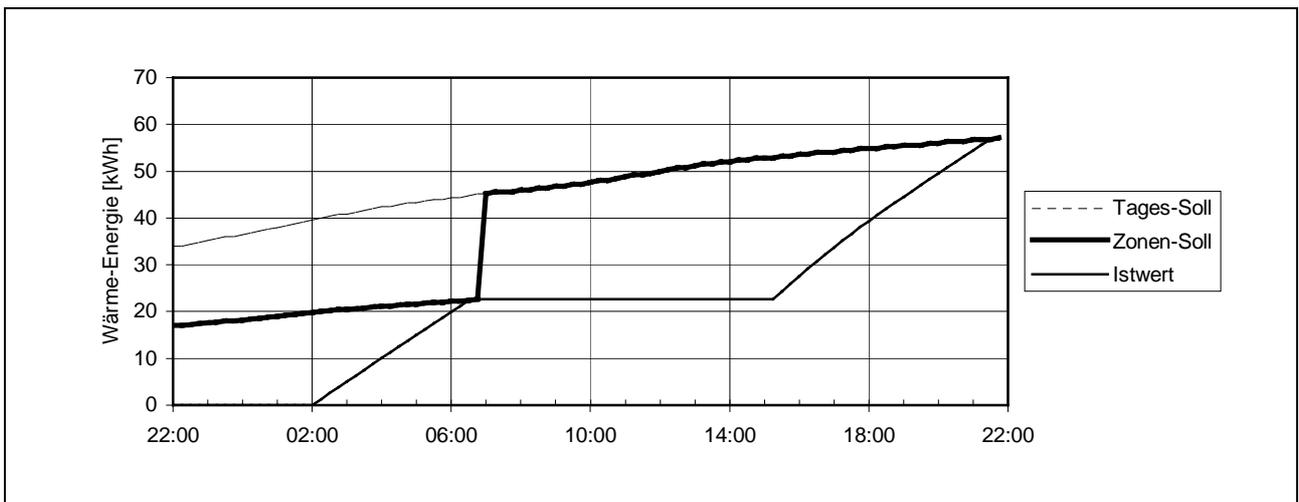


Abbildung 7: Extremeinstellung für zwei lange Pulse

3.2 Implementierung

3.2.1 Energiekennlinienbasierter Siemens-Regler

Die Programmierung und Implementierung des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers (ohne Abtausteuerung) durch Siemens ist im Frühjahr 2001 erfolgt.

Zur Beschreibung gemäss Abschnitt 3.1 bzw. [3] ergeben sich für den tatsächlich realisierten energiekenlinienbasierten Siemens-Regler folgende Abweichungen:

- Neuartige Eingabe über die Laufzeit
- Wahl zwischen 2 oder 4 variablen Fenstern (z. B. für zusätzliche Niedertarifzeiten oder fixe Sperrzeiten)
- Einstellbare Raumtemperaturaufschaltung (Parallelverschiebung der Energiekennlinie)

3.2.2 Energiekennlinienbasierter Satag-Regler

Die Programmierung und Implementierung des energiekenlinienbasierten PBM-Reglers konnte wegen Termenschwierigkeiten von Satag noch nicht abgeschlossen werden.

3.3 Erprobung

3.3.1 Energiekennlinienbasierter Siemens-Regler

Die Erprobung des energiekenlinienbasierten Siemens-Reglers ist erst in Phase 2b vorgesehen (Heizsaison 2001/2002).

3.3.2 Energiekennlinienbasierter Satag-Regler

Da der energiekenlinienbasierte Satag-Regler nicht wie vorgesehen bereit war, war dessen Erprobung bisher nicht möglich. Deshalb muss diese Erprobung auch auf Phase 2b verschoben werden. Gemäss neuestem Terminplan von Satag wird der Regler Ende September 2001 bereit sein (eMail Satag vom 02.06.01).

4. Modellbasierte PBM

4.1 Beschreibung Regelalgorithmus

4.1.1 Generelles Konzept

Der in Phase 1 dieses Projektes entwickelte LQ-MPC (Modellbasierter prädiktiver Regler mit LQ-Folgeregelung) wurde von MATLAB nach C konvertiert. 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. Auch sind seit Phase 1 neue Erkenntnisse in die Auslegung des Reglers eingeflossen.

Das Regelmodul besteht aus vier Hauptteilen: Beobachter, Wettervorhersage, LQ-MPC (Modellbasierter prädiktiver Regler mit LQ-Folgeregelung) und Pulsbreitenmodulation. Für die Algorithmen des ersten und dritten Teiles und die Auslegung des letzten Teiles wird ein mathematisches Modell der Anlage benötigt, welches im Folgenden als erstes beschrieben wird. Die vier Hauptteile werden in den darauf folgenden Kapiteln erklärt.

4.1.2 Anlagenmodell

Für die Erstellung des Hausmodelles wurde die im Projekt «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen» [5] entwickelte Methode verwendet. Obwohl das Testobjekt eine Kombination von Fussbodenheizung und Heizkörperheizung besitzt, genügt das Modell dritter Ordnung ohne getrennte Modellierung der zwei Wärmeabgabesysteme zur Beschreibung des thermischen Verhaltens. Die drei Zustandsgrößen sind die Rücklauftemperatur, die Bodentemperatur und die Raumtemperatur.

Die Wärmepumpe wird durch die vom Hersteller gelieferten Kennlinien für die elektrische Leistungsaufnahme und die Wärmeabgabe beschrieben. Das dynamische Verhalten der Wärmeabgabe wird durch ein Tiefpasselement erster Ordnung beschrieben. Für die elektrische Leistungsaufnahme wird ein Verhalten ohne Dynamik angesetzt. Aus diesem Modell ergibt sich die in Abbildung 8 dargestellte energetisch optimale Laufzeit $t_{\text{on,opt}}$ in Abhängigkeit von der Aussentemperatur.

Die optimale Periodendauer $t_{\text{peri,opt}}$ berechnet sich aus

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

Dabei ist $\dot{Q}_{\text{Bed}}^*(T_A)$ der bei konstanter Aussentemperatur T_A vom Haus benötigte Wärmestrom zur Erhaltung einer konstanten Raumtemperatur und $\dot{Q}_{\text{WP}}^*(T_A)$ der von der Wärmepumpe bei T_A gelieferte Wärmestrom.

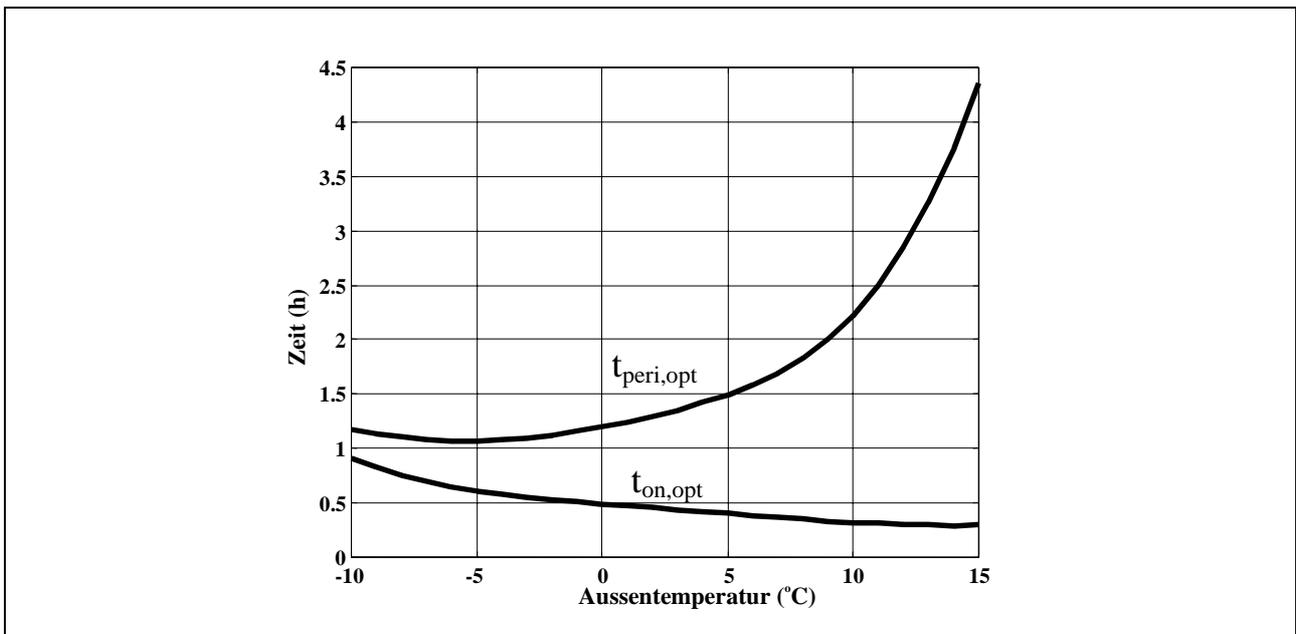


Abbildung 8: Optimale Laufzeit und Periodendauer der Wärmepumpe

Zur Zeit ist eine Pulsweitenmodulation mit variabler Periodendauer noch nicht möglich. Daher wurde die Periodendauer fest auf drei Stunden eingestellt. Dies hat zwei Gründe. Erstens konnte eine dreistündiges Raster gut in die beim Testobjekt gegebene Stromtarifstruktur eingepasst werden. Da die Niedertarifzeit von 22.00 Uhr bis 07.00 Uhr dauert, ist dies mit anderen konstanten Rastern, welche für 24 Stunden passen, nicht möglich, wenn die Periodendauer nicht zu kurz werden soll. Zweitens ist die Verschlechterung in der Arbeitszahl nur gering, wenn die Laufzeit über den optimalen Wert hinaus erhöht wird. Eine Verkürzung der Laufzeit hat aber einen erheblichen Einfluss auf die Arbeitszahl (siehe Abbildung 9). Der thermische Komfort wird wegen der grossen thermischen Trägheit des Gebäudes nicht beeinträchtigt.

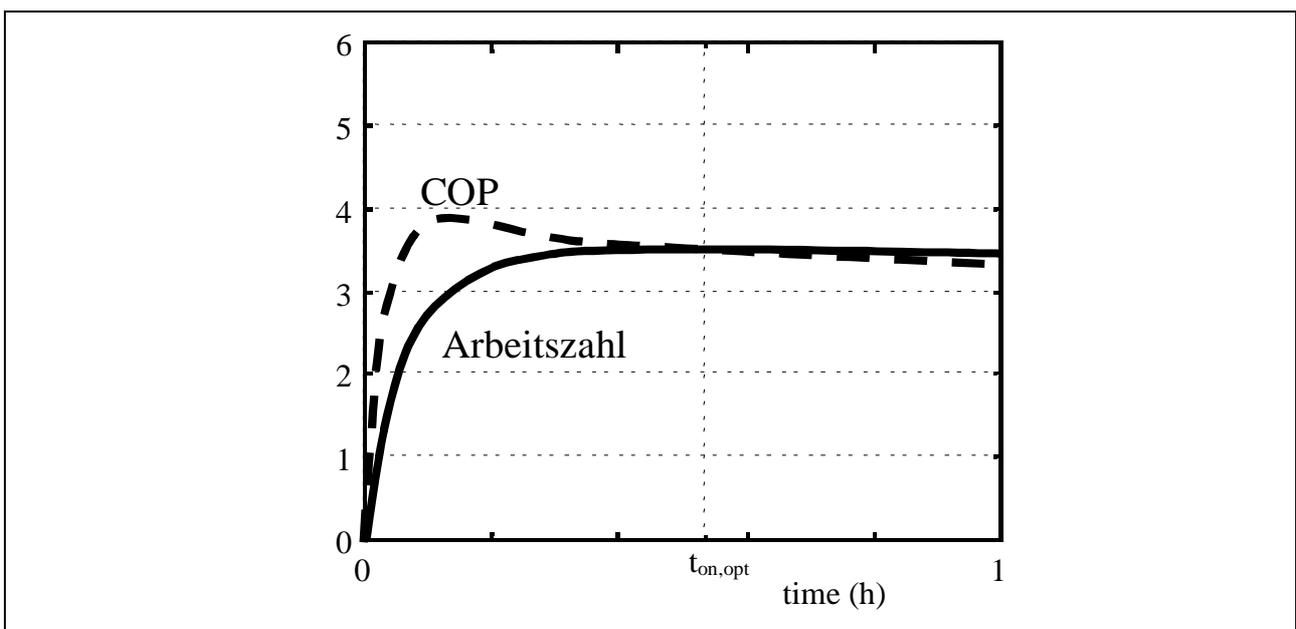


Abbildung 9: Verlauf von Arbeitszahl und COP nach dem Einschalten der Wärmepumpe

Da die Wärmeleistung der Wärmepumpe nicht gemessen, diese aber für den Beobachter und die Pulsbreitenmodulation gebraucht wird (siehe weiter unten), muss diese 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.

4.1.3 Beobachter

Für den verwendeten Optimierungsalgorithmus ist es notwendig, dass alle Zustandsgrößen (Rücklauf-, Fussboden- und Raumtemperatur) verfügbar sind. Da aber nur die Rücklauftemperatur gemessen wird, muss mit einem Beobachter die fehlenden Größen berechnet werden. Dazu wird ein Kalmanfilter verwendet [4]. 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.

4.1.4 Wettervorhersage

Für die Vorhersage des Aussentemperaturverlaufes wird das in [1] 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.

4.1.5 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 drei Stunden gesetzt.

4.1.6 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. 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 Fehlerisiko besteht. Ausserdem würden die sonst schon knappe Rechenkapazität des verwendeten Mikroprozessors weiter belastet.

4.2 Implementierung des modellbasierten Satag-Reglers

Damit der Regler in den bestehenden Satag-Regler eingebunden werden konnte, musste der zuerst in MATLAB programmierte und getestete LQ-MPC-Algorithmus nach C portiert werden. Die logischen und sicherheitsrelevanten Entscheidungen sollten weiterhin von der originalen Regelung übernommen werden. Daher musste der LQ-MPC-Regler über klar definierte Schnittstellen eingebunden werden. Durch die modulare Bauweise der originalen Regelung war dies mit wenig Aufwand möglich.

Eingänge in den LQ-MPC-Regler:

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

Ausgänge aus dem LQ-MPC-Regler:

- Anzahl Kompressoren ein
- Anzeige auf dem Display für Kontrollzwecke
 - beobachtete Temperaturen
 - optimale Wärme für die laufende Periode
 - gelieferte Wärme während der laufenden Periode
 - 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.

4.3 Erprobung des modellbasierten Satag-Reglers

Der LQ-MPC-Regler wurde Ende Februar/Anfang März dieses Jahres für dreieinhalb Wochen in der Referenzanlage Winterthur-Seen erfolgreich getestet. In Abbildung 10 ist zu sehen, dass die gewünschte Raumtemperatur von 20 °C trotz stark schwankender Aussentemperatur sehr gut eingehalten wurde. Trotz der zum Teil langen Laufzeiten blieb die Vorlauftemperatur unter 35 °C (Abbildung 11). Die höheren Spitzen in der Vorlauftemperatur sind ein Effekt des verwendeten Abtauverfahrens.

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 (siehe Abbildung 12). 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 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. Diese Aussage muss noch untersucht werden.

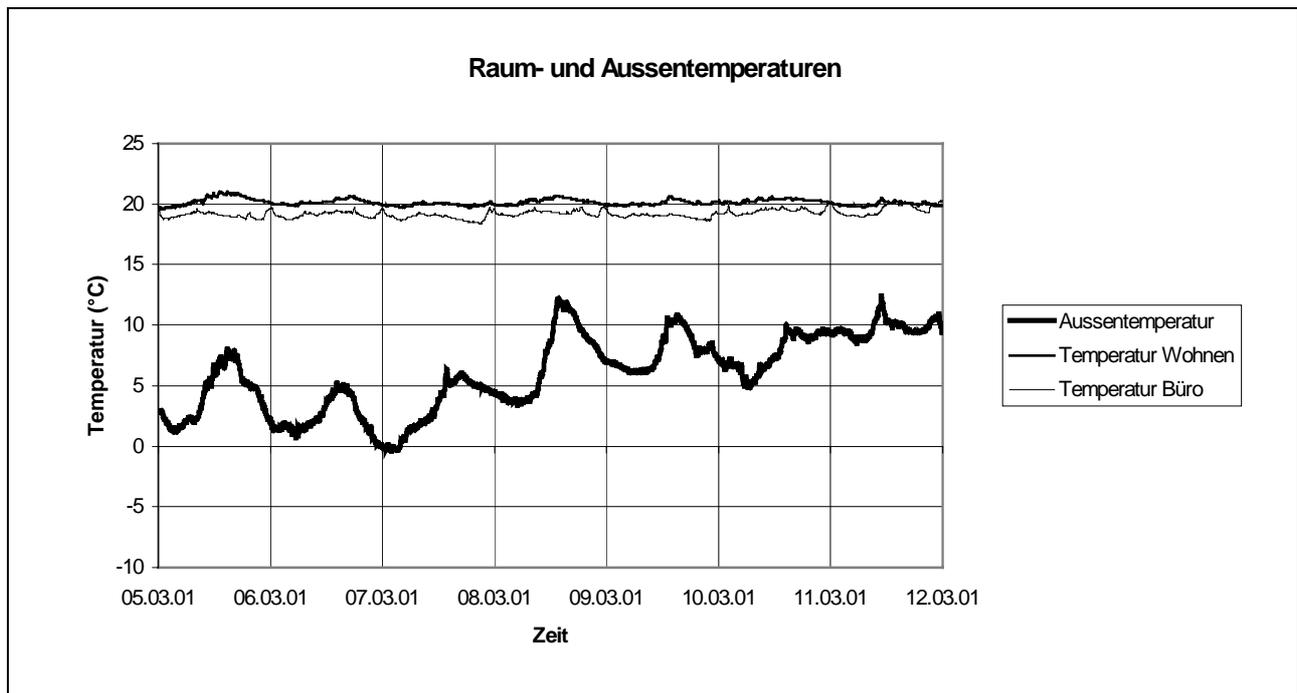


Abbildung 10: Gemessene Raum- und Aussentemperaturen

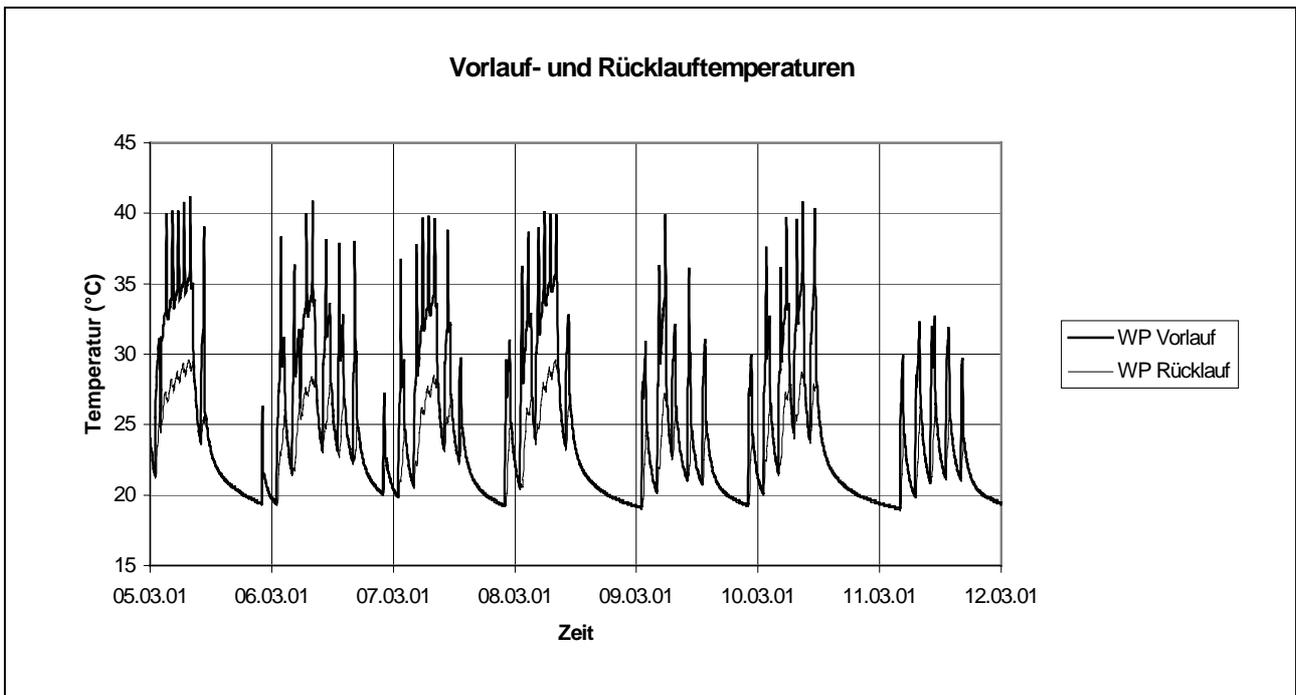


Abbildung 11: Gemessene Vorlauf- und Rücklauftemperaturen

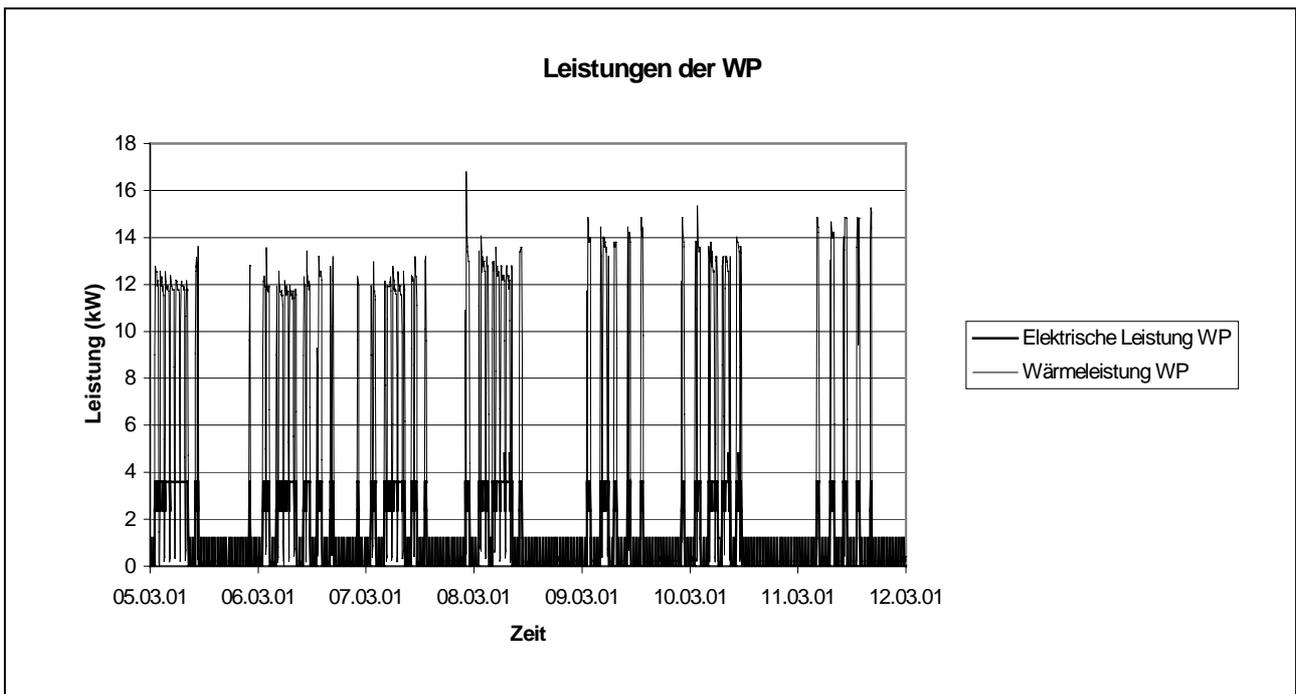


Abbildung 12: Gemessene elektrische Leistung und Wärmeleistung

5. Weiteres Vorgehen

5.1 Phase 2b: Erprobung auf Referenzanlage

Nach Abschluss von Phase 2a, welche die Heizsaison 2000/2001 umfasste, erfolgt eine Verlängerung des Projekts um die Phase 2b in der Heizsaison 2001/2002.

Die Referenzanlage Winterthur-Seen wurde bereits in der Heizsaison 2000/2001 entsprechend den Wünschen der Projektbeteiligten saniert, wobei die Kosten der Sanierung zu 100% vom Anlagebesitzer übernommen wurden. Die vollständig anlageunabhängige Instrumentierung zur Messung und Auswertung der Betriebsdaten erfolgte dann durch das Projekt im Rahmen von Phase 2a. Die Referenzanlage steht somit in Phase 2b vom ersten Tag der Heizsaison 2001/2002 an dem Projekt zur Verfügung.

In Phase 2b werden die folgenden zusätzlichen Erkenntnisse erwartet:

- Messresultate über eine vollständige Heizsaison mit der vollen Variabilität der Witterung eines «normal» kalten Winters (der Winter 2000/2001 war im Vergleich zum langjährigen Mittelwert viel zu warm). Diese zusätzlichen Messresultate werden sowohl für den energiekenlinienbasierten wie auch für den modellbasierten PBM-Regler gebraucht.
- Antwort auf die vieldiskutierte Frage nach dem Einfluss der Trägheit des Wärmeabgabesystems auf das Regelverhalten bei konstanter Gebäudeträgheit. Die Referenzanlage verfügt nämlich praktisch über zwei autonome Wärmeabgabesysteme: eine flinke Heizkörperheizung und eine träge Fussbodenheizung je mit eigener Gruppenpumpe (lediglich ein Raum im Dachgeschoss verfügt über keine Fussbodenheizung). Der Anteil Heizkörperheizung könnte somit vom aktuellen Wert (33% in der Heizsaison 2000/2001) wahrscheinlich bis gegen 100% gesteigert werden.
- Zusätzliche Gewinnung von Datensätzen für den ETHZ-Prüfstand zur Emulation eines fiktiven Sanierungsobjekts (= Phase 3), insbesondere auch für eine flinke Heizkörperheizung.
- Zusätzliche Erprobung des energiekenlinienbasierten Reglers von Siemens, insbesondere auch die durch Siemens entwickelte neuartige Eingabe über die Laufzeit. Dazu wird die Referenzanlage mit einer Schnittstelle «Satag-Wärmepumpe – Siemens-Regler» ausgerüstet.

5.2 Phase 3: Erprobung auf ETHZ-Prüfstand

In Phase 3 erfolgen weitere Erprobungen auf dem ETHZ-Prüfstand mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe. Dieser Prüfstand erlaubt die Emulation eines beliebigen (fiktiven) Hauses für eine real am Prüfstand vorhandene Wärmepumpe. Dem Regler und der zu untersuchenden Wärmepumpe wird vorgetäuscht, in einem Haus installiert zu sein. Dadurch wird es möglich, reproduzierbare Untersuchungen an einer Wärmepumpe durchzuführen und somit verschiedene Regelalgorithmen unter gleichen Bedingungen miteinander zu vergleichen.

6. Literaturverzeichnis

- [1] H. R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Wärmepumpenanlagen. Phase 1. Bern, Bundesamt für Energie, 1999.
- [2] Thomas Afjei et al.: Kostengünstige Niedertemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 3. Bern, Bundesamt für Energie, 2000.

- [3] H. Mayer und H. R. Gabathuler: Spezifikation energiekenlinienbasierte PBM. Diessenhofen, 10. November 2000.
- [4] Hans P. Geering: Mess- und Regeltechnik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1990.
- [5] G. Reiner et al.: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Phase 1 bis 3: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation. Bern, Bundesamt für Energie, November 1998. (ENET-Nr. 965740)