



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

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

Pulsbreitenmodulation **für Kleinwärmepumpenanlagen**

Phase I

ausgearbeitet durch
H. R. Gabathuler, H. Mayer
Gabathuler AG, Beratende Ingenieure
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen
hama@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

Juli 1999

Schlussbericht

Zusammenfassung

Bisherige Regelstrategien versuchten vor allem eine optimale Regelung der Wärmeabgabe zu erreichen. Forderungen der Wärmeerzeugung – speziell bei Wärmepumpen – wurden nur zweitrangig behandelt. Eine neue Regelstrategie muss deshalb, unter Ausnutzung der thermischen Trägheit heutiger Gebäude und Wärmeabgabesysteme, in erster Linie einen optimalen Betrieb der Wärmeerzeugung garantieren.

Im vorliegenden Projekt soll eine neue Regelstrategie für Kleinwärmepumpenanlagen entwickelt werden, welche die bekannten Nachteile der herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung nicht aufweist.

In Phase 1 wurden drei unterschiedliche Konzepte mittels Simulation miteinander verglichen:

- Vorkonzept 1 «einfache Steuerung», entworfen aufgrund praktischer Erfahrungen
- Konzept 2 «realisierter Regler», eine erweiterte Version von Vorkonzept 1, die schliesslich an einer Referenzanlage erprobt wurde
- Konzept 3 «modellbasierte Optimierung», eine aufwendigere, rechnergestützte Regelstrategie

Der Vergleich der Konzepte 1 und 3 zeigte in der Simulation für beide Regler ein ähnliches, erfolgsversprechendes Verhalten, wobei die einfache Steuerung eine leicht höhere Arbeitszahl, die modellbasierte Optimierung eine etwas geringere Schwankung der Raumtemperatur aufwies. Durch eine Verbesserung der Prognose für den Aussentemperaturverlauf erreichte die modellbasierte Optimierung eine bessere Einhaltung der Raumtemperatur und die gleiche Arbeitszahl wie die einfache Steuerung.

Der Vergleich der Konzepte 2 und 3 zeigte in der Simulation für beide Regler eine sehr gute Einhaltung der Raumtemperatur (die modellbasierte Optimierung mit geringerer Welligkeit) und die energetischen Kennzahlen lagen nahe beisammen.

Konzept 2 wurde schliesslich an der Referenzanlage «Waltalingen» erprobt. Dabei ergaben sich die folgenden Resultate:

1. An einem Fallbeispiel wurde nachgewiesen, dass PBM in einem Neubau in heute üblicher massiver Bauweise problemlos eingesetzt werden kann. Die befürchtete Raumtemperaturschwankung infolge der zeitverzögerten Energiezufuhr blieb aus.
2. Der dazu notwendige Geräte- und Bedienungsaufwand war nicht grösser als derjenige einer herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung.
3. Auf die Aufschaltung der Raumtemperatur als zusätzliche Eingangsgrösse konnte im vorliegenden Fall verzichtet werden, die Witterungsführung allein reichte vollauf.
4. PBM weist gegenüber der herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung entscheidende Vorteile auf, hier die wichtigsten:
 - Die mittlere Laufzeit kann wesentlich verlängert werden. Damit verlängert sich auch die Lebensdauer der Wärmepumpe und die Jahresarbeitszahl kann verbessert werden.
 - Der Niedertarifanteil kann wesentlich verbessert werden.
 - Die Wärmepumpe kann in den Pausen gezielt zur Wassererwärmung genutzt werden.
 - Einfachere Bedienung: «Meine Wärmepumpe muss bei -5°C Aussentemperatur während 14 Stunden laufen» ist wesentlich leichter zu verstehen als die Einstellung einer selbst für Fachleute nur schwer nachvollziehbaren Rücklauf temperaturregelung-Heizkurve.

Der PBM-Regler wurde an einem thermisch trägen Gebäude mit einem trägen Wärmeabgabesystem (Fussbodenheizung) realisiert. Damit wird bereits ein wesentlicher Teil der Einsatzmöglichkeiten abgedeckt, der schätzungsweise 75 % der heute gebauten Wärmepumpenanlagen entspricht. In Phase 2 sollen die Untersuchungen nun noch in Richtung weniger träge Gebäude und Gebäude mit kleiner Speichermasse sowie in Richtung flinker Wärmeabgabesysteme ausgedehnt werden.

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

Abstract

Until now, typical control strategies have tried to achieve an optimal control of the heat delivery. The heat production – especially with heat pumps – has not been taken into account. Therefore any new control strategy has to guarantee an optimal operation of the heat generation.

In this project a new control strategy for small heat pump heating systems is to be developed. The well-known disadvantages of conventional relay-type controllers thereby are to be eliminated.

In phase 1 three different concepts were compared in computer simulations:

- Concept 1, «simple feedforward control», was based on practical experience
- Concept 2, «realized controller», an extended version of concept 1, was eventually tested in the reference system
- Concept 3, «model-based optimization», was a calculation-intensive control strategy

In the simulations, concepts 1 and 3 resulted in a similar, promising performance, the simple feedforward control showing a slightly higher performance factor, and the model-based optimization causing smaller fluctuations in the room temperature. An improved weather forecast decreased the divergence between the room temperature and its setpoint, while resulting in the same performance factor as the one obtained with the simple controller.

The comparison of concepts 2 and 3 shows that both controllers keep the room temperature very well at the setpoint (the model-based optimization with less ripple). The energy classification numbers turned out to be nearly the same.

Concept 2 was tested in the reference system «Waltalingen». The results are summarized as follows:

1. One case study showed that pulse-width modulation (PWM) can be used without problems in a new house built in typical solid construction. The time-delayed energy feeding did not result in any room temperature fluctuation.
2. The instrumentation and operation required was not greater than the one needed for a conventional relay-type controller.
3. It was not necessary to use the room temperature as an additional input signal for the controller. The outdoor temperature alone was sufficient.
4. The PWM has proved to contain considerable advantages over conventional relay-type controllers. The most important of those are:
 - The average runtime per cycle can be extended significantly. The lifetime of the heat pump is thus increased and the seasonal performance factor is improved.
 - The low-tariff periods can be better utilized.
 - The heat pump can be used selectively to heat the hot water.
 - Simpler operation: Is easier to understand «My heat pump has to run 14 hours if it's -5°C outside» than the justification of the return flow heating curve.

The PWM controller was implemented in a thermally slow building with a (also slow) floor heating system. An estimated 75% of all heat pump heating systems built today is installed in this type of building. Phase 2 of this project is to address the analysis of less slow buildings, buildings with a smaller storage mass and more agile heat delivery systems.

This research was founded by a grant from the Swiss Federal Office of Energy. The authors are solely responsible for the report's content and conclusions.

Inhaltsverzeichnis

1. Projektziel.....	7
1.1 Generelles Projektziel.....	7
1.2 Projektziel Phase 1 (15.11.97 – 30.04.99).....	7
2. Referenzanlagen.....	8
2.1 Luft-Wasser-Wärmepumpe in Barzheim.....	8
2.2 Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen.....	8
2.3 Vergleich Planung und Realität.....	8
3. Neue Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation.....	9
3.1 Problematik der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung.....	9
3.2 Beschreibung der neuen Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation.....	10
4. Vorkonzept «einfache Steuerung».....	11
5. Konzept «realisierter Regler».....	13
5.1 Hardware/Software.....	13
5.2 Regelkonzept.....	13
5.3 Funktionsbeschreibung.....	14
6. Konzept «modellbasierte Optimierung».....	15
6.1 Prinzip der modellbasierten Optimierung.....	15
Optimierung des benötigten Wärmestroms.....	15
Pulsbreitenmodulation des Wärmestroms.....	16
6.2 Modell der Anlage.....	16
Last.....	16
Wärmepumpe.....	17
Verteiler.....	17
6.3 Wettervorhersage.....	17
7. Vergleich der Konzepte «einfache Steuerung» und «modellbasierte Optimierung» mittels Simulation.....	18
7.1 Annahmen für diese Simulationen.....	18
7.2 Anpassung der Kennlinien der «einfachen Steuerung».....	18
7.3 Aussentemperaturverläufe der vier Wochen.....	19
7.4 Simulationsergebnisse.....	19
Woche 5.....	20
Woche 15.....	20
Woche 42.....	21
Woche 44.....	21

7.5 Einige energetische Kennzahlen.....	21
8. Vergleich der Konzepte «realisierter Regler» und «modellbasierte Optimierung» mittels Simulation.....	23
8.1 Annahmen für diese Simulationen.....	23
8.2 Aussentemperaturverläufe der zwei Wochen.....	23
8.3 Simulationsresultate.....	23
Woche 50.....	23
Woche 44.....	24
8.4 Einige energetische Kennzahlen.....	24
9. Messresultate Konzept «realisierter Regler»	25
9.1 Messkonzept	25
9.2 Raumtemperaturverlauf.....	26
Zwei typische Tage.....	26
Eine typische Woche.....	27
Verlauf über eine volle Heizperiode.....	28
Zu hohe Raumtemperatur vom 2.11.98 bis 11.12.98	29
Zu tiefe Raumtemperatur vom 21.1.99 bis 30.1.99	30
9.3 Mittlere Laufzeit der Wärmepumpe	30
9.4 Jahresarbeitszahlen	31
Optimierung der Wärmepumpenanlage.....	31
Verdampfer-Eintritts- und Verflüssiger-Austrittstemperaturen.....	31
Vergleich der Jahresarbeitszahlen.....	32
10. Schlussfolgerungen.....	33
11. Weiteres Vorgehen.....	34
12. Literaturverzeichnis.....	35

1. Projektziel

1.1 Generelles Projektziel

In der konventionellen Heizungstechnik wurde der Raumtemperaturregler durch den witterungsgeführten Vorlauftemperaturregler verdrängt. In der Wärmepumpentechnik wird die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung heute als Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung «missbraucht». Differenzen zwischen Auslegung und realem Betrieb bewirken nämlich, dass die reale Heizkurve viel tiefer und viel flacher verläuft als die bei der Auslegung berechnete. Dadurch wird die Regelbarkeit der Wärmepumpenanlage stark eingeschränkt, die Wärmepumpe kann über einer bestimmten Aussentemperatur nicht mehr einschalten. Die konventionelle Rücklauf temperaturregelung ergibt auch zu häufige Ein-/Ausschaltvorgänge und lässt Sperr- und Niedertarifzeiten nicht optimal verarbeiten.

Deshalb soll eine neue Regelstrategie für Klein-Wärmepumpenanlagen entwickelt werden, die die Nachteile der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung nicht aufweist. Folgende Bedingungen sind zu erfüllen:

1. Es soll ein Wärmepumpenregler mit Pulsbreitenmodulation sein, der an einem Simulationsmodell off line optimiert und an einer Referenzanlage erprobt wird.
2. Die Lösung muss marktgerecht sein, d. h. bezüglich Preis, Montageaufwand und Bedienungs-freundlichkeit muss sie der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung minde-stens ebenbürtig sein.
3. Im Standardfall soll nur der Witterungsfühler bauseits montiert werden müssen, alle weiteren notwendigen Messgrößen sollen direkt im Bereich der Wärmepumpe gemessen werden können.
4. Die Aufschaltung der Raumtemperatur als zusätzliche Eingangsgröße soll untersucht werden (Option mit Raumtemperaturfühler zusätzlich zur rein witterungsgeführten Regelung).
5. Die Heizungspumpe soll nur laufen, wenn der Kompressor auf Heizbetrieb läuft.
6. Es soll die Möglichkeit geprüft werden, die Wärmepumpe in den Pausen gezielt zur Wasser-erwärmung zu nutzen.

1.2 Projektziel Phase 1 (15.11.97 – 30.04.99)

Auf der Basis des bereits vorhandenen Simulationsmodells «Barzheim» (freistehendes Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Seriespeicher) soll ein neues Simulationsmodell «Waltalingen» (zusammengebautes Einfamilienhaus mit Sole-Wasser-Wärmepumpe ohne Speicher) erstellt werden. Mit Hilfe der beiden Simulationsmodelle soll dann eine neue Regelstrategie entwickelt und an der Referenzanlage «Waltalingen» erprobt werden.

2. Referenzanlagen

2.1 Luft-Wasser-Wärmepumpe in Barzheim

Im Rahmen des BFE-Projekts «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen» [1] wurde eine Wärmepumpenanlage mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in Barzheim (Bild 2.1) über mehr als ein Jahr messtechnisch erfasst und ein Simulationsmodell erstellt. Die Messdaten und das Simulationsmodell dieser Referenzanlage standen auch für das vorliegende Projekt zur Verfügung.

2.2 Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen

Beim vorliegenden Projekt sollte die neue Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation an einer Wärmepumpenanlage mit einer Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen erprobt werden (Bild 2.2). Auch diese Anlage wird bereits seit anfangs 1997 messtechnisch erfasst. Das Simulationsmodell für diese Anlage wurde im Rahmen dieses Projekts erstellt.

2.3 Vergleich Planung und Realität

Auffallend ist bei beiden Anlagen die starke Abweichung der gemessenen Daten von den Planungsdaten (Bild 2.1 und Bild 2.2). Insbesondere der Wärmeleistungsbedarf und die erforderlichen Heizwassertemperaturen sind viel tiefer als geplant. Aufgrund von Praxis-Erfahrungen mit zahlreichen weiteren Anlagen ist davon auszugehen, dass Überdimensionierungen dieses Ausmasses heute die Regel sind.

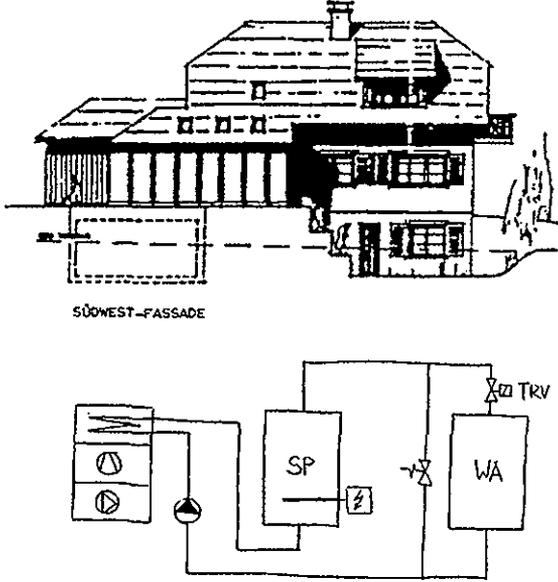
Gebäude, Schaltung Wärmepumpenanlage	Planung	Realität
	<p>Wärmeleistungsbedarf SIA 384/2 = 6,2 kW</p> <p>Vorlauf-/Rücklauf- temperatur bei -8°C Aussentemperatur Auslegung = 45/35$^{\circ}\text{C}$</p>	<p>Wärmeleistungsbedarf gemessen = 4,2 kW</p> <p>Vorlauf-/Rücklauf- temperatur bei -8°C Aussentemperatur ge- messen = 30/27$^{\circ}\text{C}$</p>

Bild 2.1: Referenzanlage Barzheim. Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Seriespeicher im Vorlauf (wegen Elektrozusatzheizung) und Thermostatventilen. Energiebezugsfläche = 217 m². Diese Referenzanlage wurde für die Untersuchungen im Vorkonzept «einfache Steuerung» (Kapitel 4) verwendet.

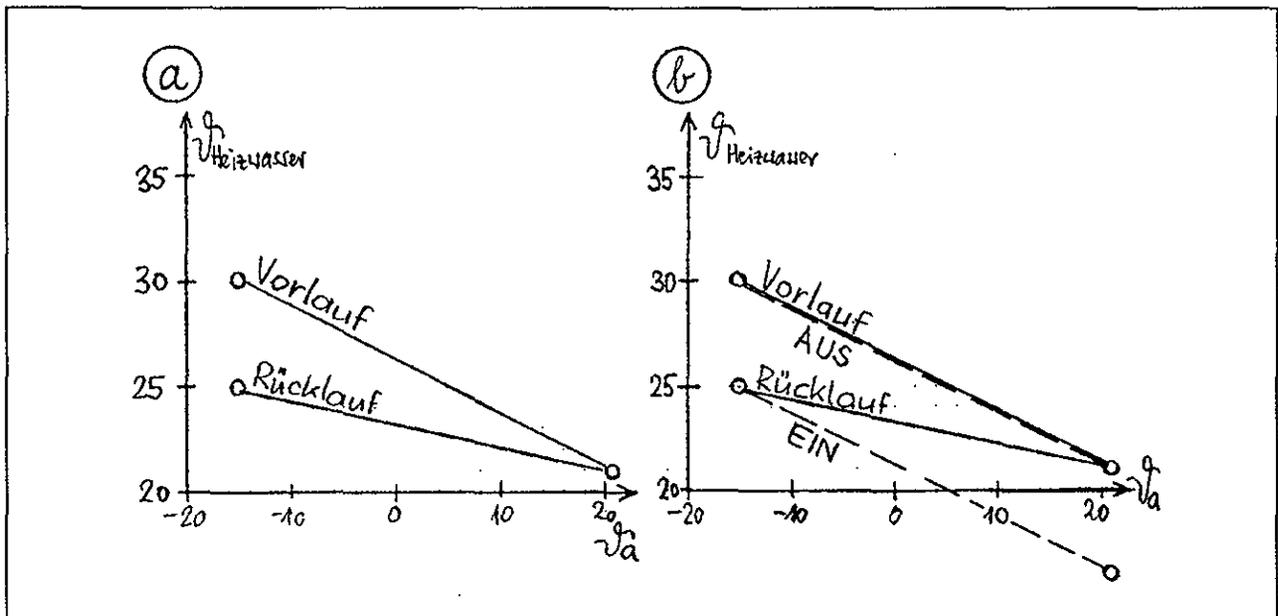


Bild 3.1: Heizkurven, vereinfachend als Geraden dargestellt. $\vartheta_{\text{Heizwasser}}$ = Heizwassertemperatur, ϑ_a = Aussentemperatur.

- a) Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung einer Wärmepumpenanlage mit Parallelspeicher und einer Heizgruppe mit Mischventil
- b) Witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung einer Wärmepumpenanlage mit Seriespeicher oder ohne Speicher

3.2 Beschreibung der neuen Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation

Regelgrösse der vorgeschlagenen neuen Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation ist nicht die Vorlauftemperatur (Bild 3.2a) oder die Rücklauftemperatur, sondern direkt die dem Gebäude zugeführte Wärmemenge (Bild 3.2b). Entsprechend ist die Heizkurve hier nicht die Heizwassertemperatur in Funktion der Aussentemperatur, sondern die notwendige Wärmemenge für 24 Stunden in Funktion des Mittelwertes der Aussentemperatur während der letzten 24 Stunden.

Stellgrösse ist die Laufzeit der Wärmepumpe. Dabei sind grundsätzlich zwei Grössen variabel: Impulsdauer und Periodendauer. Diese beiden Werte bestimmen die Grösse der einzelnen «Wärmepakete», die dem Gebäude zugeführt werden. Für die Grösse dieser «Wärmepakete» gibt es ein energetisches und ein wirtschaftliches Optimum.

Beim energetischen Optimum sind folgende Punkte abzuwägen:

- Möglichst lange Periodendauer bedeutet geringe Anfahrverluste und wenig Einschaltspitzen
- Möglichst kurze Periodendauer bedeutet besseren Komfort (geringere Raumtemperatur- und Oberflächentemperatur-Schwankungen)
- Zu lange Impulsdauer bedeutet eine schlechtere Jahresarbeitszahl und die Gefahr von Hochdruckstörungen

Beim wirtschaftlichen Optimum muss noch zusätzlich die Tarifstruktur berücksichtigt werden. Durch eine Hochtarif-Pause am Ende der Hochtarif-Zeit und eine Niedertarif-Zwangsladung am Ende der Niedertarif-Zeit können grössere Niedertarif-«Wärmepakete» erzeugt werden, die den Niedertarifanteil erhöhen und damit die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen.

Erschwerend kommt noch hinzu, dass der kontinuierliche Betrieb durch Sperrungen des Elektrizitätswerks gestört wird.

c) Gemessene Energiekennlinie von Barzheim (in der Praxis wäre diese nur annähernd bekannt und müsste durch den Betreiber sukzessive angepasst werden, analog der Heizkurve einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung)

d) Berechnung der täglich notwendigen Betriebsstundenzahl (es verbleiben im Auslegefall rund 6 Stunden für EW-Sperren, Warmwasserbereitung usw.)

Für die weiteren Überlegungen muss die minimale Verdichterlaufzeit und die maximale Anzahl Starts pro Tag festgelegt werden. Ein allzu grosser Spielraum besteht hier nicht: die praktische Grenze liegt etwa bei 15 Minuten Minimallaufzeit und maximal 20 Starts pro Tag. Ausserdem muss noch Zeit für allfällige EW-Sperren reserviert werden. Gewählt wurden:

- Minimale Laufzeit pro Start 20 Minuten
- Maximale Anzahl Starts 10 pro Tag
- Maximale EW-Sperrzeit 6 Stunden

e) Resultierende Periodendauer und Pulsdauer

f) Resultierende Anzahl Starts pro Tag

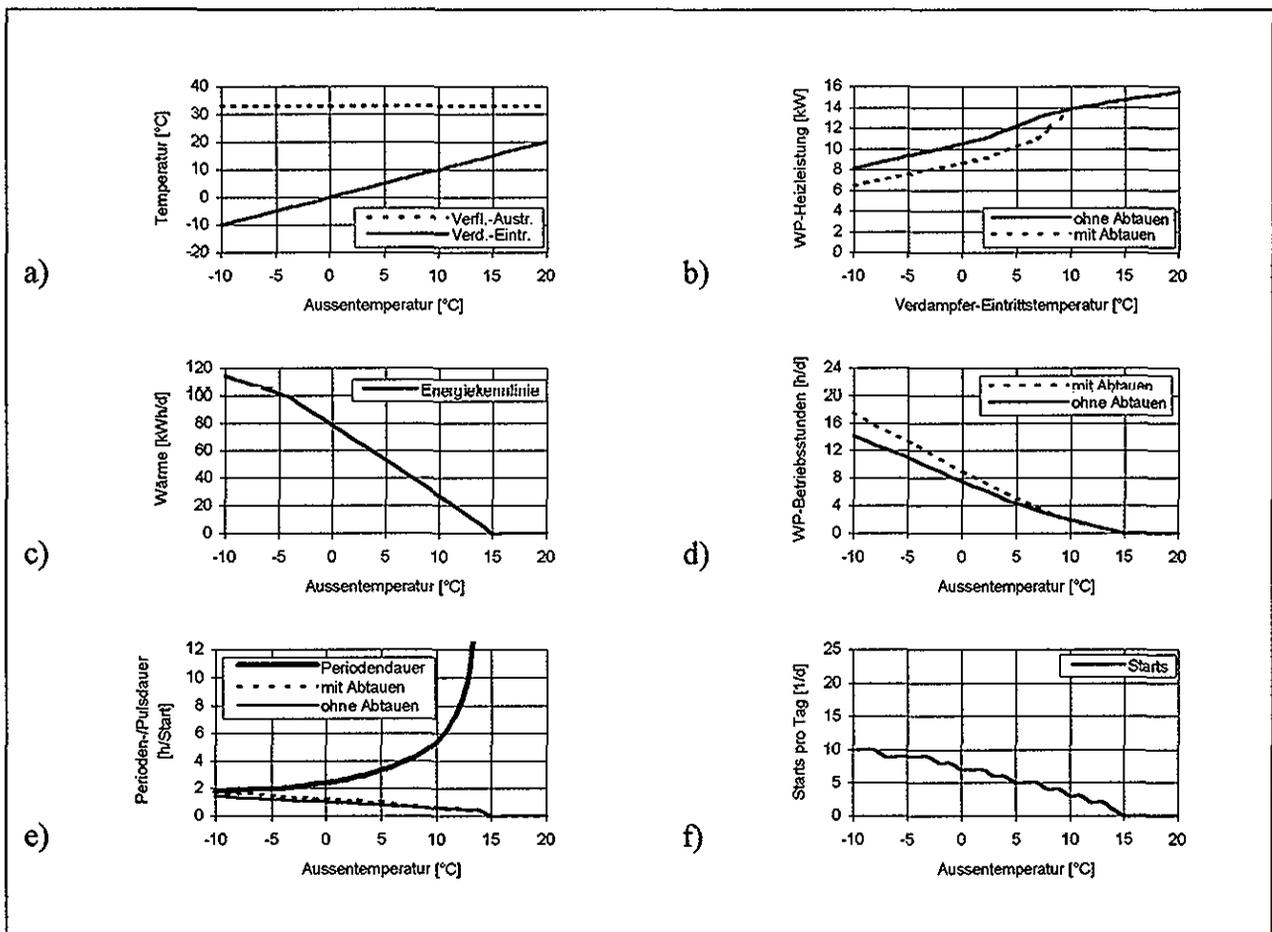


Bild 4.1: Entwurf einer einfachen Steuerung aufgrund praktischer Erfahrungen (Beschreibung im laufenden Text)

An der Heizgrenze ergibt sich eine einzige Schaltung pro Tag à 20 Minuten Laufzeit (aus Komfortgründen am besten abends). Etwas unschön sind die 10 Starts im Auslegepunkt mit jeweils 2 Minuten Pause dazwischen. Durch eine Reduktion der Starts bei tiefen Aussentemperaturen könnte hier die Einhaltung einer minimalen Pausenzeit erreicht werden.

5. Konzept «realisierter Regler»

5.1 Hardware/Software

Zur Realisierung des Regelkonzepts stand ein zwar nicht mehr ganz neuer, dafür aber speziell für die Haustechnik entwickelter und praxiserprobter Prozessrechner zur Verfügung. Diese Lösung wurde gewählt, weil damit hardwareseitig alle notwendigen Schnittstellen für Temperaturfühler und 220-VAC-Ein-/Ausgangssignale zuverlässig zur Verfügung standen. Die Programmiersprache «Basic» war für unsere Zwecke genügend, da in Phase 1 erst eine Off-Line-Optimierung vorgesehen war.

5.2 Regelkonzept

Realisiert wurde ein Regelkonzept entsprechend Bild 3.2b. Gegenüber der in Abschnitt 3.2 beschriebenen «einfachen Steuerung» entsprechend Bild 3.2c ergeben sich folgende Änderungen:

- Erdsonde als Wärmequelle (anstatt Aussenluft)
- Rückführung «Messung und Berechnung Q_{24} » ist vorhanden (fehlte bei der «einfachen Steuerung»)

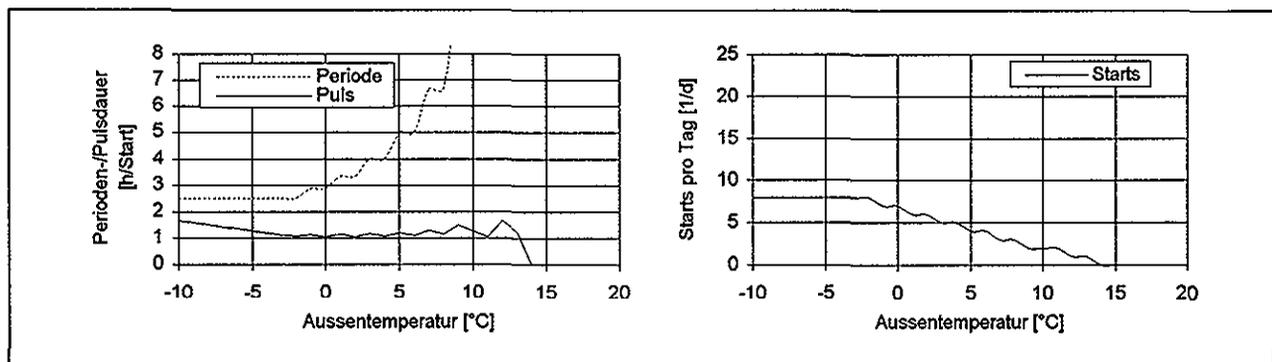


Bild 5.1: Perioden-/Pulsdauer bei einer maximal möglichen Heizbetriebszeit von 20 Stunden und höchstens 8 Starts pro Tag

Den prinzipiellen Aufbau zeigt Bild 5.2. Die herstellereigene Steuerung/Regelung mit allen WP-internen Funktionen bleibt unverändert bestehen. Angesteuert wird die Wärmepumpe durch folgende Befehle:

- WP-EIN gibt die Wärmepumpe frei, die Einschaltung folgt dann über die WP-interne Sicherheitskette (Hochdruckpressostat, Niederdruckpressostat usw.)
- Ein-/Ausschaltbefehl für die Heizungsumwälzpumpe bei Heizbetrieb
- Ein-/Ausschaltbefehl für Ladepumpe bei Warmwasserbetrieb

Die folgenden Eingangssignale werden benötigt:

- Aussentemperatur
- Verdampfeintrittstemperatur
- Verflüssigeraustrittstemperatur
- Warmwassertemperatur
- EW-Sperre
- Rückmeldung «Verdichter läuft»

Als Eingabegrößen benötigt der Regler:

- Durch den WP-Lieferanten voreingestellt: WP-Kennlinie (Heizleistung in Funktion der Verdamp-

- fereintritts- und der Verflüssigeraustrittstemperatur)
- Angepasst durch den Betreiber (analog der Heizkurve bei einem witterungsgeführten Vorlauf-temperaturregler): Energiekennlinie

5.3 Funktionsbeschreibung

Zur Bestimmung der voraussichtlich notwendigen Wärme und zur Festlegung eines provisorischen WP-«Betriebsfahrplans» für den kommenden Tag werden folgende Angaben benötigt:

- Aussentemperaturmittelwert der vergangenen 24 Stunden
- Verdampfeintrittstemperatur in Funktion der Aussentemperatur (als erste Näherung)
- Wärmepumpen-Kennlinien
- Energiekennlinie
- Warmwassertemperatur-Sollwert
- Maximale Sperrzeit EW
- Maximale Anzahl Starts des Verdichters
- Tabelle mit Verteilung der Starts in Funktion der Aussentemperatur

Die Pulse (immer eine gerade Anzahl) werden folgendermassen über den Tag verteilt:

- 50 % am frühen Morgen bei Niedertarif (aus Kostengründen)
- 50 % am Abend bei Hochtarif (aus Komfortgründen)
- Wenn die Niedertarifzeit voll ausgeschöpft ist, muss das Verhältnis zu ungunsten des Niedertarifs verschoben werden

Daraus wird jeweils um 20:00 Uhr die Anzahl Starts für die folgenden 24 Stunden festgelegt. Der aktuelle 24h-Aussentemperaturmittelwert wird für ein Fenster über die letzten 24 Stunden laufend neu berechnet. Eine schnelle Änderung der Aussentemperatur wird also berücksichtigt, allerdings mit entsprechender Dämpfung. Mit diesem 24h-Aussentemperaturmittelwert wird laufend die aktuell notwendige Wärmezufuhr berechnet und damit die Startzeiten für die Wärmepumpe sowie die Soll-Puls-längen bestimmt.

Die **Feinregelung der Wärmezufuhr** geschieht dann über die Rückführung «Messung und Berechnung Q_{24} » gemäss Bild 3.2b: Durch Verlängerung oder Verkürzung der Pulsdauer wird die tatsächlich notwendige Wärmezufuhr geregelt. Die Bilanzierung erfolgt jeweils um 20:00 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt ist dem Gebäude exakt die für die letzten 24 Stunden notwendige Wärmemenge zugeführt worden.

Die **Regelung der Warmwassertemperatur** erfolgt möglichst in der Niedertarifzeit sowie durch unterbruchsfreie Umschaltung auf Warmwasserbereitung am Ende des Pulses für den Heizbetrieb.

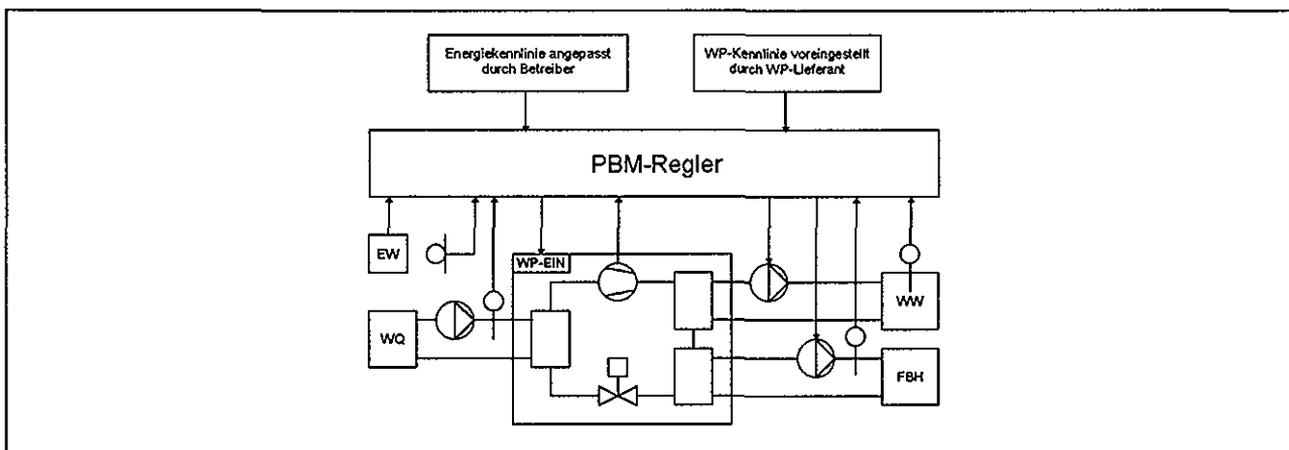


Bild 5.2: Prinzipschema des realisierten Reglers

6. Konzept «modellbasierte Optimierung»

6.1 Prinzip der modellbasierten Optimierung

Der Wärmebedarf des Hauses soll unter Berücksichtigung der Temperaturdynamik des Hauses und einer Abschätzung des zukünftigen Aussentemperaturverlaufes berechnet werden.

Optimierung des benötigten Wärmestroms

Durch Lösung des LQ-Folgerregelungsproblems¹ [3] unter Berücksichtigung einer Störgröße (Aussentemperaturverlauf T_L) kann der optimale Verlauf des von der Wärmepumpe zuzuführenden kontinuierlichen Wärmestroms $\dot{Q}_{\text{Bed}}(t)$ berechnet werden. Dazu wird das in Formel (6.1) gezeigte Gütekriterium minimiert.

$$J(\dot{Q}_{\text{Bed}}(t)) = \int_t^{(t+t_{\text{hori}})} \{R[\dot{Q}_{\text{Bed}}(t) - \dot{Q}_{\text{Bed, nom}}(t)]^2 + Q_Y[T_{R, \text{soll}}(t) - Cx(t)]^2\} dt \quad (6.1)$$

Die Gewichtungsfaktoren $R > 0$ zur Bestrafung des Wärmestromes und $Q_Y \geq 0$ zur Bestrafung der Raumtemperatur können frei gewählt werden. Dadurch ergibt sich die optimale Lösung aus Formel (6.2).

$$\dot{Q}_{\text{Bed}}(t) = -R^{-1}B_u^T K[x(t) - \hat{x}(t)] + \dot{Q}_{\text{Bed, nom}}(t) \quad (6.2)$$

Dabei ist K die einzige positiv-semidefinite Lösung der Matrix-Riccati-Gleichung. $\hat{x}(t)$ wird mit Formel (6.3) und der Endbedingung $\hat{x}(t + t_{\text{hori}}) = 0$ berechnet, $x(t)$ mit Formel (6.4) und der Startbedingung $x(0) = x_{\text{nom}}(0)$.

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A + K^{-1}C^T Q_Y C]\hat{x}(t) + B_u \dot{Q}_{\text{Bed}}(t) + B_v \hat{T}_L(t) - K^{-1}C^T Q_Y T_{R, \text{soll}}(t) \quad (6.3)$$

$$\dot{x}(t) = [A - B_u R^{-1}B_u^T K]x(t) + B_u R^{-1}B_u^T K \hat{x}(t) + B_u \dot{Q}_{\text{Bed}}(t) + B_v \hat{T}_L(t) \quad (6.4)$$

Die Werte $\dot{Q}_{\text{Bed, nom}}(0)$ und $x_{\text{nom}}(0)$ beziehen sich auf den Gleichgewichtszustand bei der Aussentemperatur $T_L(0)$ und der Raumsolltemperatur $T_{R, \text{soll}}$.

Als Zeithorizont wird 24 Stunden gewählt. Dies heisst, dass der benötigte Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Bed}}(t)$ für die nächsten 24 Stunden berechnet wird unter einer Annahme des Aussentemperaturverlaufes T_L für diese Zeitspanne.

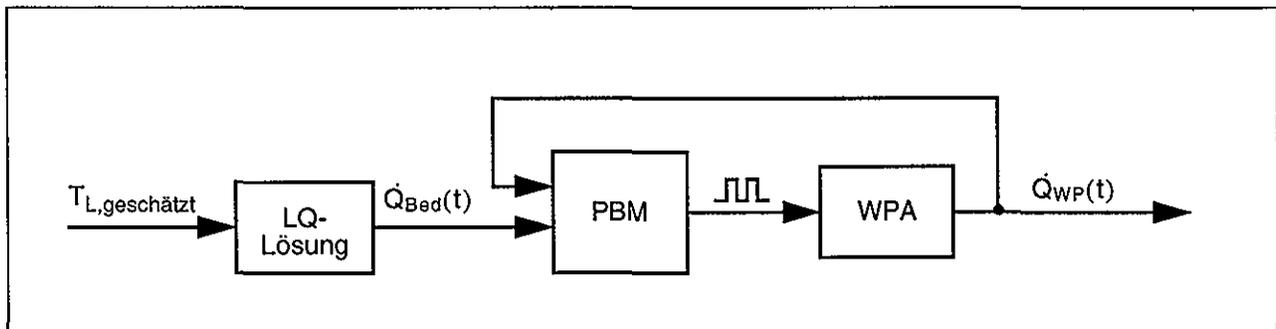


Bild 6.1: Prinzip der modellbasierten Optimierung

¹ LQ: Lineares Modell, quadratisches Gütekriterium.

Berechnet man den Wärmestrom $Q_{\text{Bed}}(t)$ mit dem richtigen zukünftigen Aussentemperaturverlauf und führt diesen in einer Simulation dem Hausmodell zu, so ergibt sich eine exakt dem Sollwert (20.0 °C) entsprechende Raumtemperatur. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da für die Berechnung des Wärmestroms $\dot{Q}_{\text{Bed}}(t)$ und die Simulation das gleiche Hausmodell benutzt und Strahlungseinflüsse vernachlässigt werden. Da in der Realität weder das exakte Verhalten des Hauses noch eine genaue Wettervorhersage für die nächsten 24 Stunden bekannt sind, wird das Resultat ohne Messung der Raumtemperatur auf jeden Fall schlechter.

Pulsbreitenmodulation des Wärmestroms

Eine weitere Verschlechterung des Resultats bringt die Verwendung einer nicht drehzahlregulierten Wärmepumpe. Der benötigte Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Bed}}(t)$ kann nicht kontinuierlich ins Haus abgegeben werden. Daher ist aus dem berechneten Wärmestromverlauf das Ein/Ausschaltsignal für die Wärmepumpe zu generieren.

In einer am Institut für Mess- und Regeltechnik erstellten Semesterarbeit [2] wurde unter Verwendung eines anderen Hausmodells eine optimale Periodendauer $t_{\text{Peri}} = 1.5$ Stunden eruiert. Da für das hier verwendete Hausmodell dieser Wert noch nicht berechnet ist, wurde $t_{\text{Peri}} = 1.5$ Stunden bei den Simulationen mit dem Modell Barzheim (Kapitel 7.) und $t_{\text{Peri}} = 3.0$ Stunden bei den Simulationen mit dem Modell Waltalingen (Kapitel 8.) verwendet.

Für die Regelung der Wärmepumpe wird immer der für die gewählte Periodendauer t_{Peri} benötigte Wärmebedarf Q_{Bed} berechnet. t_{Start} ist der Zeitpunkt des Beginns der Periode.

$$Q_{\text{Bed}} = \int_{t_{\text{Start}}}^{t_{\text{Start}} + t_{\text{Peri}}} \dot{Q}_{\text{Bed}}(t) dt \quad (6.5)$$

Zu Beginn einer Periode wird die Wärmepumpe gestartet und dann ausgeschaltet, wenn sie die geforderte Energie Q_{Bed} abgegeben hat. Da der Heizwasservolumenstrom \dot{V}_w als konstant angenommen wird, kann die abgegebene Leistung $\dot{Q}_{\text{WP}}(t)$ aus der Differenz der Vorlauftemperatur $T_{\text{VL}}(t)$ und der Rücklauftemperatur $T_{\text{RL}}(t)$ berechnet werden und aus $\dot{Q}_{\text{WP}}(t)$ wird mittels Integration die abgegebene Energie Q_{WP} bestimmt.

$$Q_{\text{WP}} = \int (T_{\text{VL}}(t) - T_{\text{RL}}(t)) \dot{V}_w \rho_w c_w dt \quad (6.6)$$

Es ist zu beachten, dass wie bei der «einfachen Steuerung» auch bei dieser Methode die Raumtemperatur T_R nicht gemessen wird und sie somit eine Steuerung ist. Einzig die abgegebene Wärmeenergie Q_{WP} der Wärmepumpe wird geregelt.

6.2 Modell der Anlage

Die Modellstruktur wurde aus dem Projekt «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen» [1] übernommen.

Last

Bei der Last (Haus) handelt es sich um ein Modell dritter Ordnung, in dem die Fussbodentemperatur T_B , die Rücklauftemperatur T_{RL} und die Raumtemperatur T_R die Zustandsgrößen sind. Die im Modell vorkommenden Parameter wurden mit einem im oben genannten Projekt entwickelten Verfahren identifiziert. Eingänge in das Lastmodell sind die Aussentemperatur T_L und die Vorlauftemperatur T_{VL} , Ausgänge sind die Rücklauftemperatur T_{RL} und die Raumtemperatur T_R .

Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wird aufgrund von Kennlinien (aus Herstellerangaben) und je einem Tiefpasselement erster Ordnung für das Anfahr- und das Ausschaltverhalten modelliert und hat die Wärmeerzeugerausgangstemperatur $T_{WE,a}$ als wichtigste Zustandsgröße. Eingänge sind die Aussentemperatur T_L , die Wärmeerzeugereingangstemperatur $T_{WE,e}$ sowie das Einschaltsignal u_{WP} , Ausgang ist die Wärmeerzeugerausgangstemperatur $T_{WE,a}$.

Verteiler

In der Referenzanlage in Waltalingen sind keine Thermostatventile und kein Speicher eingebaut. Daher wird im Modell die Wärmeerzeugerausgangstemperatur $T_{WE,a}$ gleich der Vorlauftemperatur T_{VL} und die Rücklauftemperatur T_{RL} gleich der Wärmeerzeugereingangstemperatur $T_{WE,e}$ gesetzt.

6.3 Wettervorhersage

Für die Simulationen in Kapitel 7 wurde der zukünftige Verlauf der Aussentemperatur $T_L(t)$ auf sehr einfache Weise geschätzt. Er ist gleich wie der Verlauf der letzten 24 Stunden.

Eine Verbesserung der Abschätzung bringt eine Parallelverschiebung der ganzen Kurve so, dass der Wert vor 24 Stunden dem aktuellen Wert entspricht. Diese Methode der Wettervorhersage findet in Kapitel 8. Verwendung. In Bild 6.2 ist dieses Verfahren grafisch dargestellt.

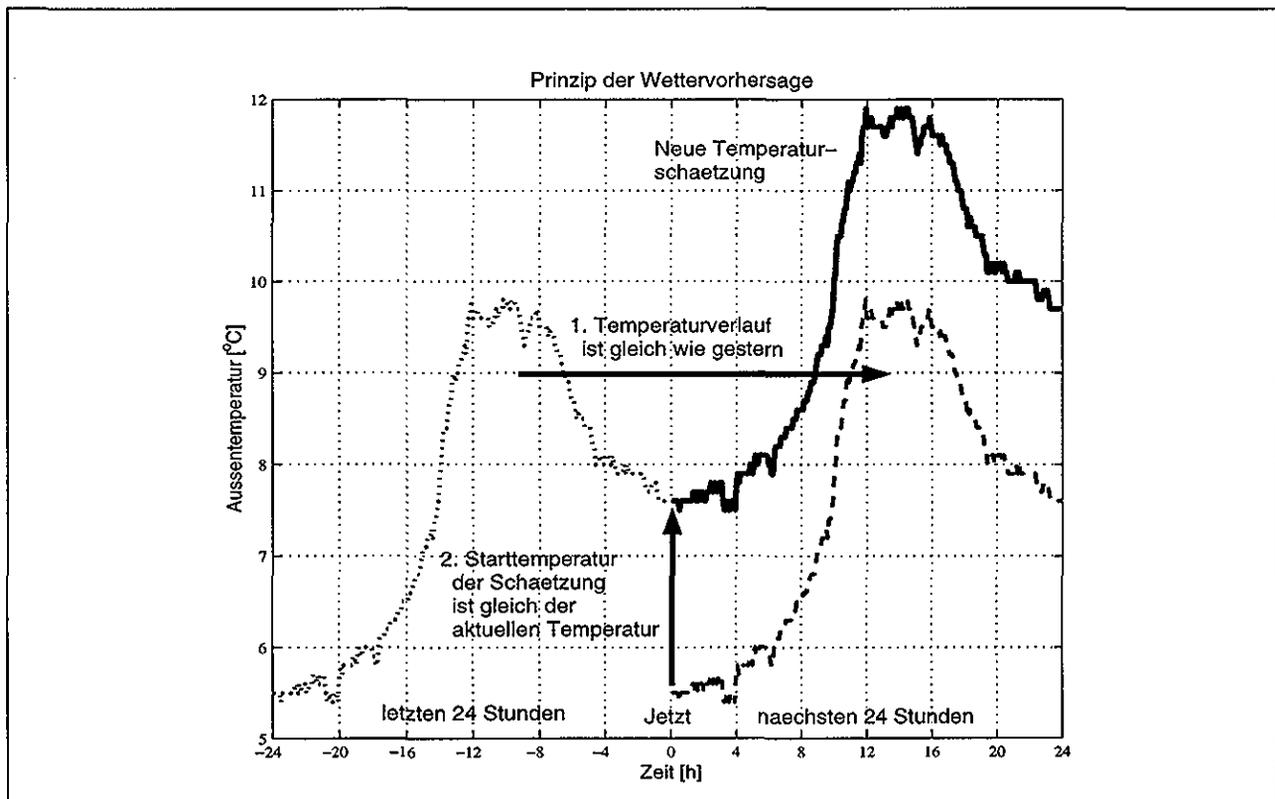


Bild 6.2: Prinzip der Wettervorhersage

7. Vergleich der Konzepte «einfache Steuerung» und «modellbasierte Optimierung» mittels Simulation

7.1 Annahmen für diese Simulationen

- Da zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen die Parameter von dem Messobjekt in Waltalingen noch nicht verfügbar waren, wurden für die Last und die Wärmepumpe die Daten und Parameter aus Barzheim übernommen.
- Es werden keine Wärmegewinne durch Strahlung und Benutzerverhalten berücksichtigt.
- Als Wetterdaten werden gemessene Aussenlufttemperaturen aus vier Wochen verwendet. Da diese Daten in Wochenpaketen abgespeichert sind und jeweils der erste Tag als Vorausinformation für beide Steuerungen gebraucht wird, sind in den Grafiken nur sechs Tage zu sehen.
- Es gibt keine Sperrzeiten.
- Die Periodendauer beim Konzept «modellbasierte Optimierung» beträgt 1.5 Stunden.
- Das Abtauen der Wärmepumpe ist in der Wärmelieferleistung summarisch mitberücksichtigt.

7.2 Anpassung der Kennlinien der «einfachen Steuerung»

Da die Kennlinien in Kapitel 4. auf den Messdaten von Barzheim basieren, aber für die Simulation einige vereinfachende Annahmen getroffen wurden, sind die Kennlinien für das Modell gemäss dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Vorgehen neu berechnet worden (Bild 7.1).

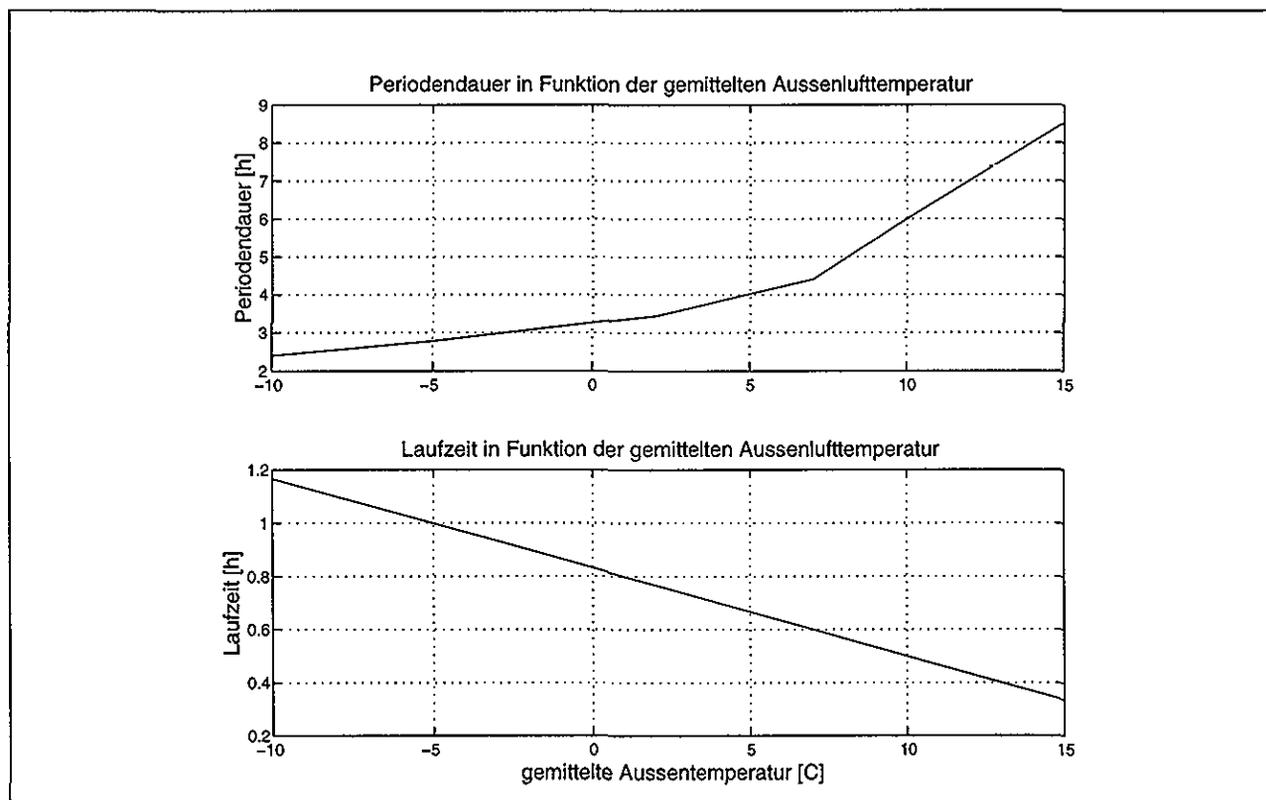


Bild 7.1: In den Simulationen verwendete Kennlinien

Da in der Berechnung für die Kurven keine Anfahrverluste mitberücksichtigt wurden und die Wärmelieferleistung Q_{WP} der Wärmepumpe nicht geregelt wird, musste die Laufzeit um 20% erhöht werden, damit die geforderte Raumtemperatur eingehalten wird.

7.3 Aussentemperaturverläufe der vier Wochen

In Bild 7.2 sind die Aussentemperaturverläufe der vier Wochen dargestellt, welche in den Simulationen verwendet werden. Die Woche 05 hat sehr tiefe Temperaturen. Woche 15 ist in der Mitte relativ warm und weist dann einen Temperatursturz auf. Die Woche 42 hat ein flaches Temperaturprofil und bewegt sich um 7 °C. Der Temperaturverlauf der Woche 44 ist sehr regelmässig und pendelt um den Gefrierpunkt.

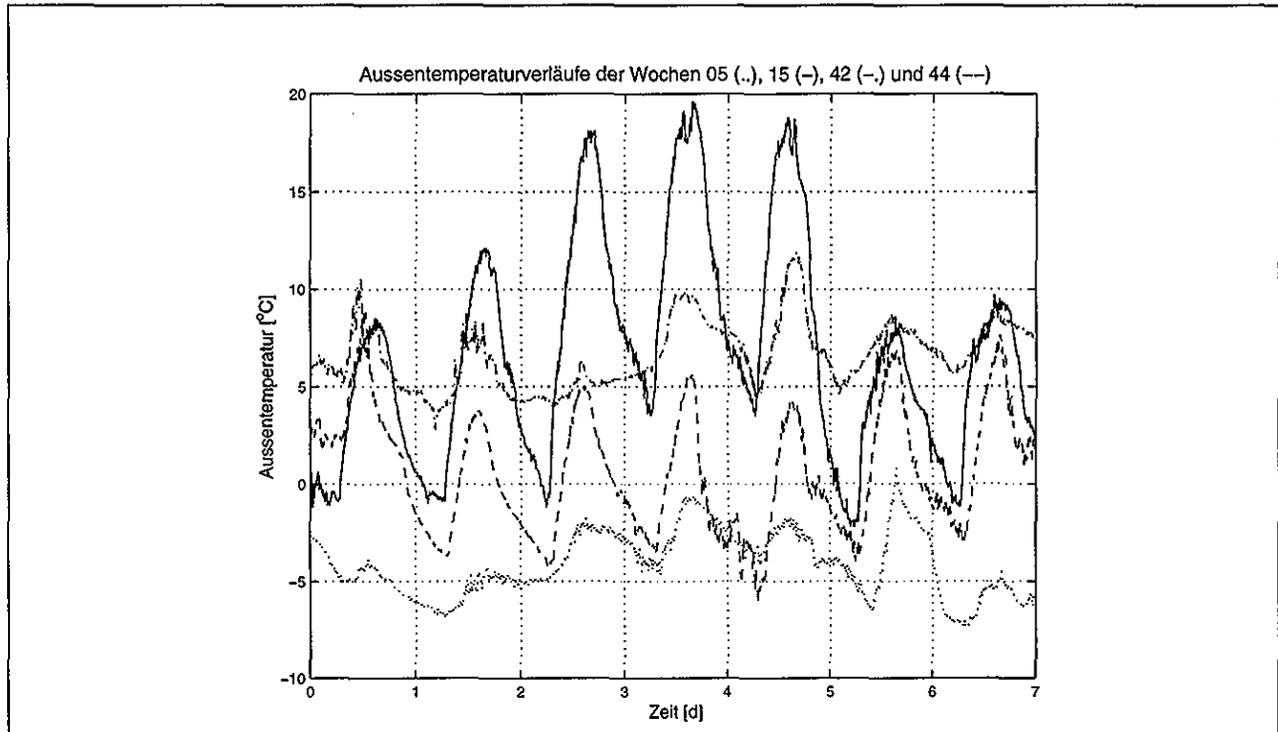


Bild 7.2: Aussentemperaturverläufe der vier Wochen

7.4 Simulationsresultate

In Bild 7.3 bis Bild 7.6 sind die Simulationsresultate grafisch dargestellt.

Da beide Konzepte auf dem Temperaturverlauf der vergangenen 24 Stunden basieren und der zuzuführende Wärmestrom \dot{Q}_{Bed} gesteuert und nicht geregelt wird, ergibt sich eine Differenz zwischen dem Sollwert und dem effektiven Wert der Raumtemperatur. Diese Differenz erreicht im Maximum ± 3 K. Wird der zukünftige Aussentemperaturverlauf zu hoch geschätzt, das heisst der Temperaturverlauf der vergangenen 24 Stunden liegt höher als derjenige der nächsten 24 Stunden, so wird zu wenig Wärme zugeführt. Als Folge sinkt die Raumtemperatur T_R . Ist die Schätzung zu niedrig, steigt in Folge zu hoher Wärmezufuhr die Raumtemperatur T_R . Dies ist besonders gut in der Woche 15 (Bild 7.4) zu beobachten.

Die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen bewegen sich bei beiden Konzepten im gleichen Bereich. Aufgrund der kürzeren Laufzeiten der modellbasierten Optimierung ist dort die Spreizung dieser Temperaturen etwas geringer.

Die einfache Steuerung arbeitet mit 24h-Mittelwerten der Aussentemperatur. Daher hat die Steuerung keinerlei Kenntnis vom Tagestemperaturverlauf. So wird bei variabler Aussentemperatur aber konstantem Mittelwert regelmässig, das heisst mit konstanter Periodendauer und konstanter Laufzeit, geheizt. Dies ergibt eine Schwankung der Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Aussentemperatur. Da das Konzept der modellbasierten Optimierung den Verlauf der Aussentemperatur berücksichtigt, tritt diese Abhängigkeit nicht auf (Bild 7.6).

Aufgrund der langen Periodendauer und den damit verbundenen Laufzeiten der einfachen Steuerung ergibt sich in der Simulation eine Welligkeit der Raumtemperatur in Funktion der Vorlauftemperatur (speziell in Bild 7.5). Diese Schwankungen sind jedoch so gering, dass sie keinen Einfluss auf den Komfort haben. Bei der modellbasierten Optimierung ist dieser Effekt wegen der kürzeren Periodendauer nicht bemerkbar.

Woche 5

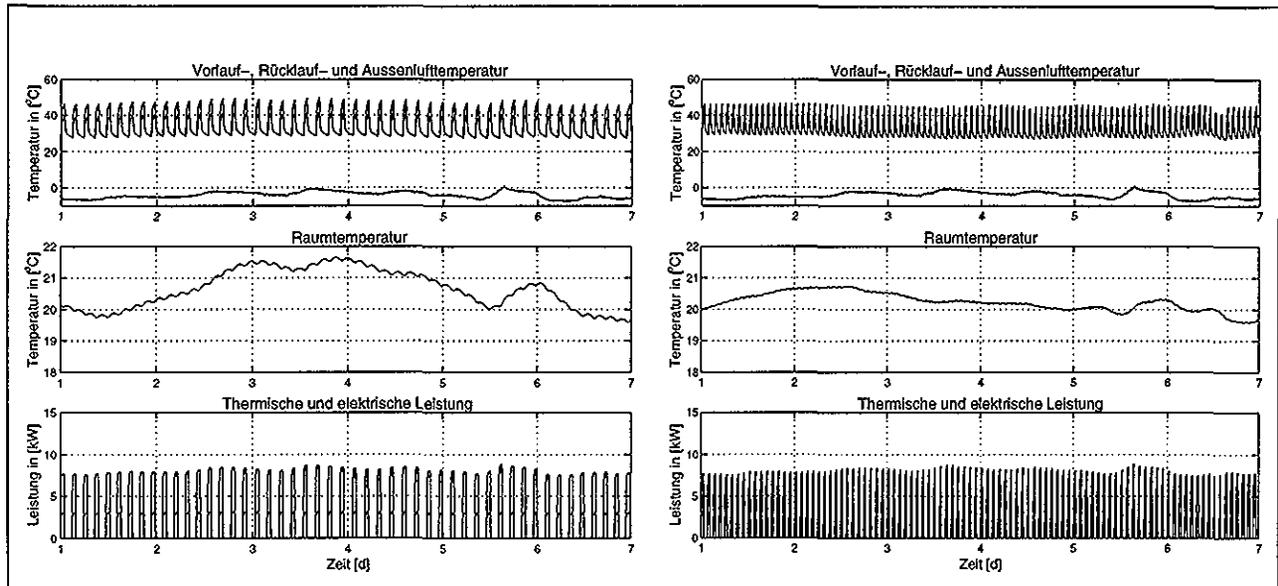


Bild 7.3: Simulationsergebnisse Woche 05. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 15

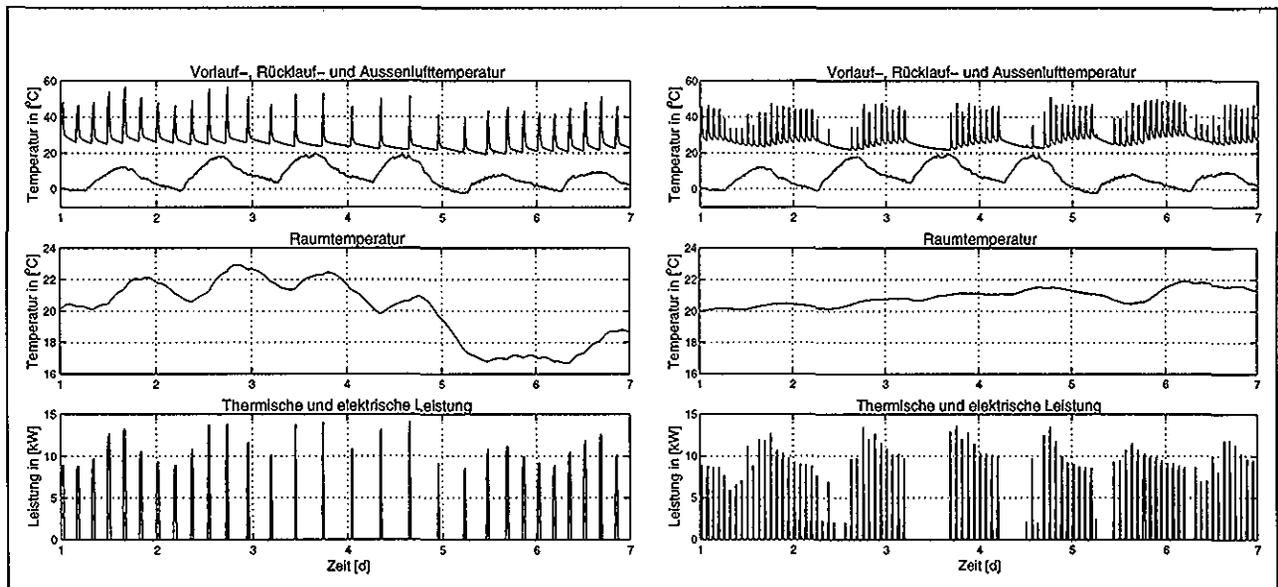


Bild 7.4: Simulationsergebnisse Woche 15. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 42

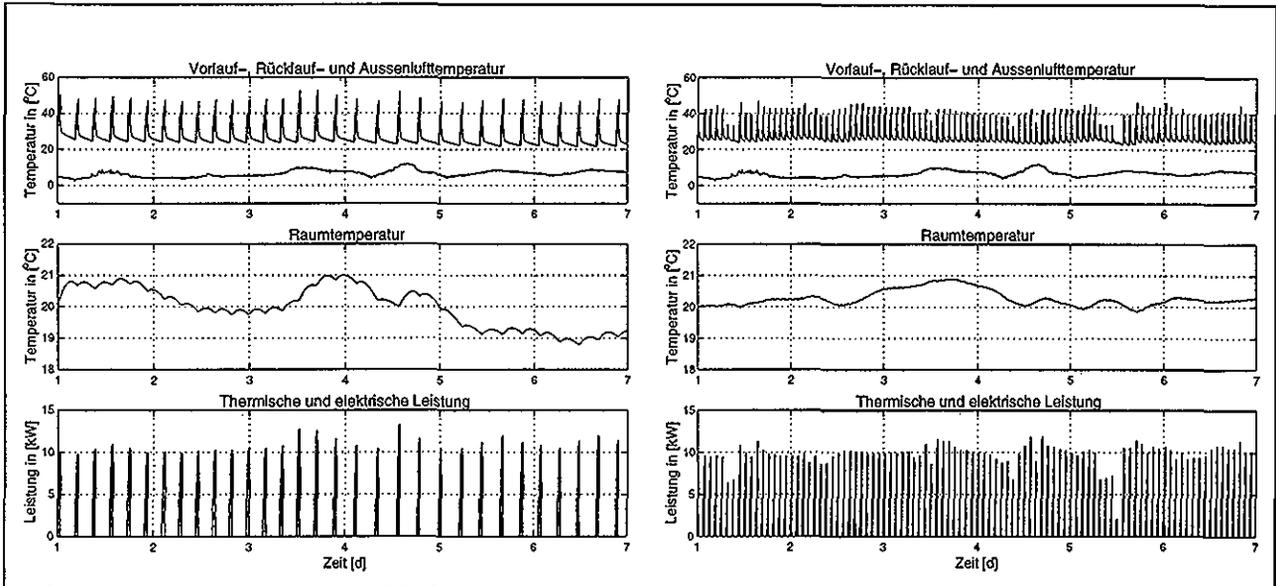


Bild 7.5: Simulationsergebnisse Woche 42. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 44

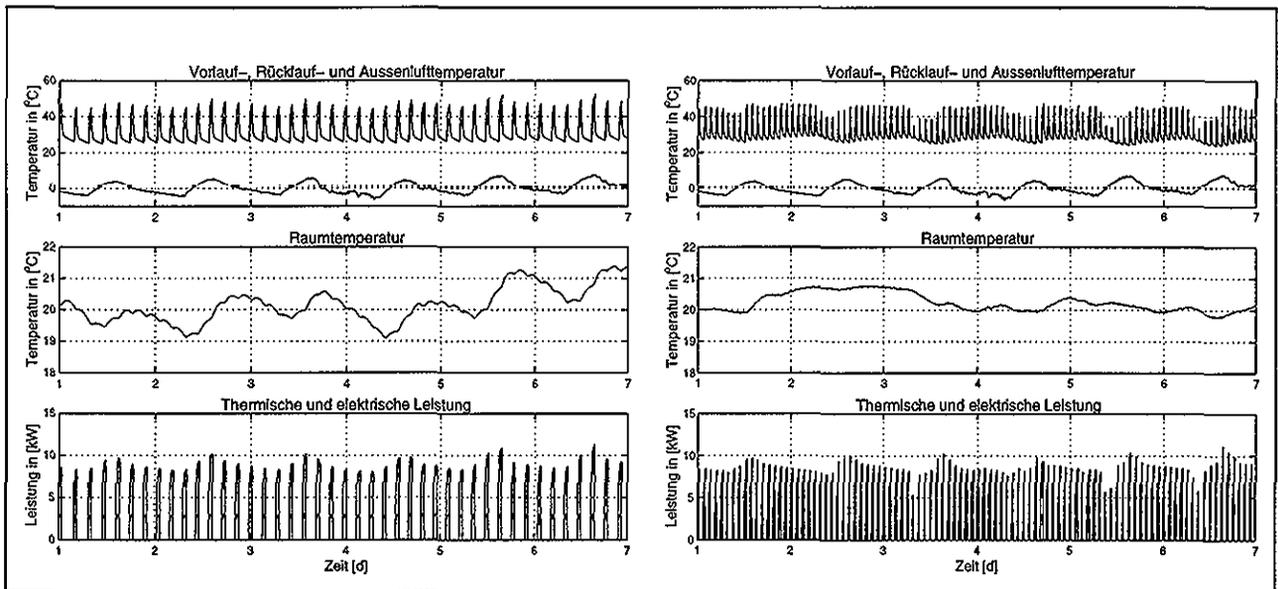


Bild 7.6: Simulationsergebnisse Woche 44. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

7.5 Einige energetische Kennzahlen

Bei kaltem Wetter (Woche 05) sind die Energieaufnahme und -abgabe und damit die Arbeitszahl identisch (Tabelle 7.7). Die Anzahl der Einschaltungen ist bei der einfachen Steuerung bei allen Simulationen kleiner.

Woche 05	QWP [kWh]	PWP [kWh]	AZ	Einschaltungen / Tag
einfache Steuerung	338	145	2.3	8
modellbasierte Optimierung	340	148	2.3	16

Tabelle 7.7: Kennzahlen der Woche 05

Bei wärmeren Temperaturen (Wochen 15 und 42) ist der Energieverbrauch mit der einfachen Steuerung geringer als beim Konzept der modellbasierten Optimierung (Tabelle 7.8 und Tabelle 7.9). Deshalb fällt aber die Raumtemperatur ein wenig tiefer aus. Durch die längeren Laufzeiten sind die Anfahrverluste der Wärmepumpe kleiner und dadurch die Arbeitszahl grösser. Die Anfahrverluste werden durch eine Einschaltzeitkonstante von 5 Minuten bei der thermischen Leistung modelliert. Die elektrische Leistung wird sofort erreicht.

Woche 15	QWP [kWh]	PWP [kWh]	AZ	Einschaltungen / Tag
einfache Steuerung	162	49	3.3	5
modellbasierte Optimierung	189	66	2.9	12

Tabelle 7.8: Kennzahlen der Woche 15

Woche 42	QWP [kWh]	PWP [kWh]	AZ	Einschaltungen / Tag
einfache Steuerung	172	53	3.3	5
modellbasierte Optimierung	194	65	3.0	16

Tabelle 7.9: Kennzahlen der Woche 42

Der Aussentemperaturverlauf der Woche 44 liegt zwischen denjenigen der anderen betrachteten Wochen. Auch die Energiekennzahlen liegen zwischen den anderen Werten.

Woche 44	QWP [kWh]	PWP [kWh]	AZ	Einschaltungen / Tag
einfache Steuerung	276	104	2.6	7
modellbasierte Optimierung	281	111	2.5	16

Tabelle 7.10: Kennzahlen der Woche 44

Trotz doppelt so vieler Einschaltungen der modellbasierten Optimierung bei kälterem Wetter hat dies fast keinen Einfluss auf die Arbeitszahl. Bei wärmeren Aussentemperaturen jedoch ist dieser Einfluss bemerkbar.

8. Vergleich der Konzepte «realisierter Regler» und «modellbasierte Optimierung» mittels Simulation

8.1 Annahmen für diese Simulationen

- Es wurden für die Last und die Wärmepumpe die Daten und Parameter aus Waltalingen verwendet.
- Der Wärmegewinn durch Strahlung und Benutzerverhalten wird als konstant angenommen und auf 600 W gesetzt, so dass bei einer Aussentemperatur von 15 °C ohne Heizung eine Raumtemperatur von 20 °C erreicht wird.
- Als Wetterdaten werden gemessene Aussentemperaturen aus zwei Wochen verwendet. Da diese Daten in Wochenpaketen abgespeichert sind und jeweils der erste Tag als Voraussinformation für beide Steuerungen gebraucht wird, sind in den Grafiken nur sechs Tage zu sehen.
- Die Periodendauer beim Konzept «modellbasierte Optimierung» beträgt 3.0 Stunden.
- Es gibt keine Sperrzeiten.

8.2 Aussentemperaturverläufe der zwei Wochen

Der Aussentemperaturverlauf der Woche 50 (Bild 8.1) zeigt fast keine tageszeitbedingten Schwankungen auf, der Tagesmittelwert steigt aber gegen Wochenmitte um ungefähr 10 K und sinkt gegen Ende der Woche wieder auf den Ausgangswert zurück. In der Woche 44 hingegen sind die tageszeitbedingten Schwankungen sehr ausgeprägt, dafür bleibt der 24h-Mittelwert während der ganzen Woche nahezu konstant (Bild 8.2).

8.3 Simulationsresultate

In Bild 8.1 und Bild 8.2 sind die Simulationsresultate grafisch dargestellt.

Woche 50

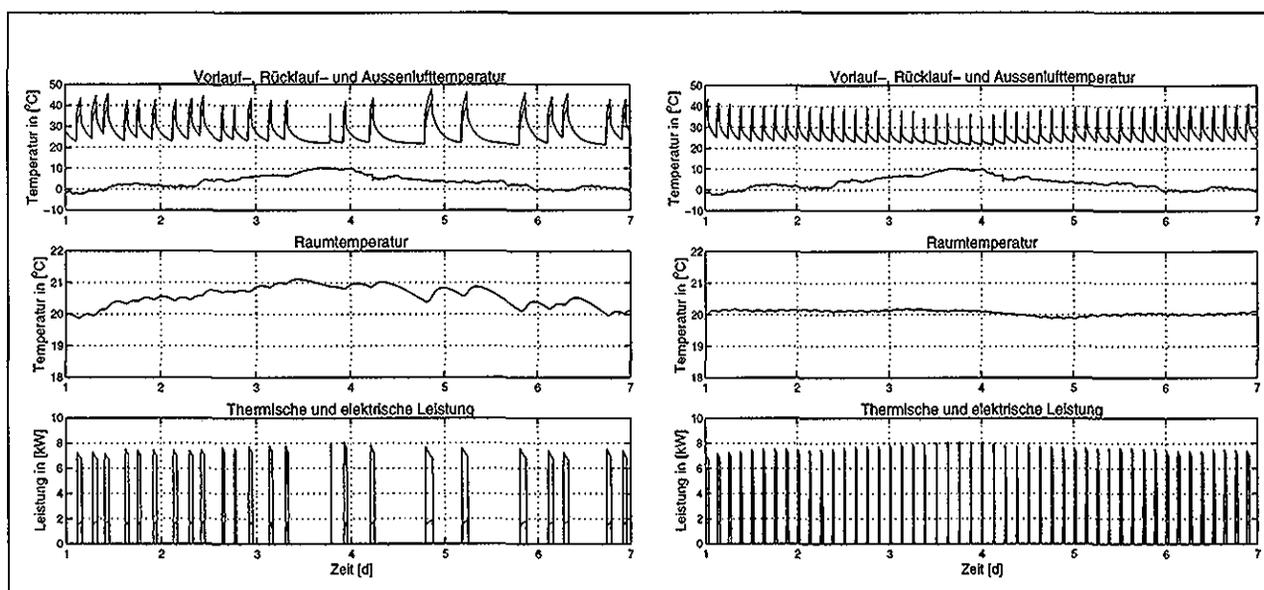


Bild 8.1: Simulationsresultate Woche 50. Links: realisierte Regelung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 44

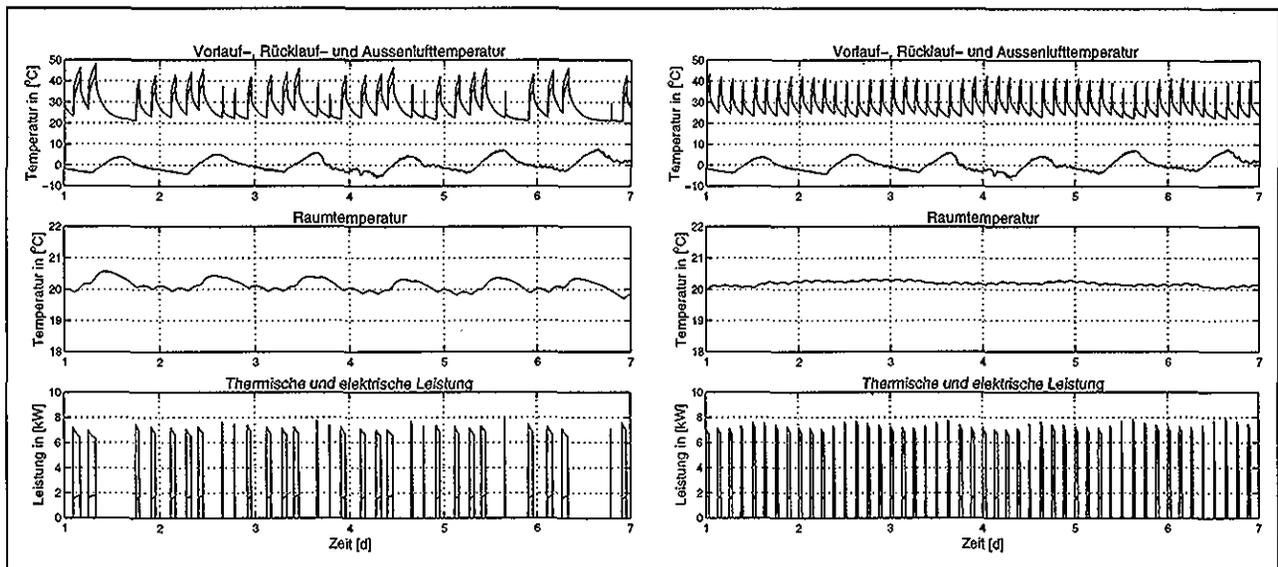


Bild 8.2: Simulationsresultate Woche 44. Links: realisierte Regelung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Grundsätzlich haben sich bei diesen Simulationen die Erkenntnisse aus Kapitel 7. bestätigt. In den Simulationen mit dem Aussentemperaturverlauf der Woche 50 gibt die «realisierte Regelung» zuerst zu viel Wärme an das Haus ab, da der Mittelwert der Aussentemperatur steigt. Gegen Ende der Woche kompensiert sich dieser Überschuss an Wärme wieder, da dann der aktuelle Mittelwert der Aussentemperatur unter dem angenommenen Wert liegt und dadurch zu wenig Wärme abgegeben wird. Bedingt durch die langen Periodenzeiten ist eine geringe Welligkeit der Raumtemperatur zu beobachten, die in der Realität aber kaum feststellbar sein wird. Die Simulation mit der «modellbasierten Optimierung» zeigt eine fast konstante Raumtemperatur, was auf die verbesserte Wettervorhersage (siehe Kapitel 6.3) zurückzuführen ist. Die Raumtemperaturen in beiden Simulationen mit den Wetterdaten der Woche 44 sind fast ideal. Bedingt durch die Mittelwertbildung der Aussentemperatur folgt die Raumtemperatur bei der «realisierten Regelung» ein wenig dem Verlauf der Aussentemperatur.

8.4 Einige energetische Kennzahlen

Alle energetischen Kennzahlen liegen für beide Konzepte in beiden durchgeführten Simulationen nahe zusammen. Einzig die Anzahl Einschaltungen pro Tag sind verschieden. Diese wirken sich aber nicht auf die Arbeitszahl aus. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, wo das Optimum der Laufzeit respektive der Periodendauer liegt. Im Vergleich mit den Simulationen in Kapitel 7.4 fallen vor allem die hier viel höheren Arbeitszahlen auf. Der Einsatz einer Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen erklärt diesen Unterschied.

Woche 50	QWP [kWh]	PWP [kWh]	AZ	Einschaltungen / Tag
realisierte Regelung	164	38	4.3	4
modellbasierte Optimierung	153	34	4.5	8

Tabelle 8.3: Kennzahlen der Woche 50

Woche 44	QWP [kWh]	PWP [kWh]	AZ	Einschaltungen / Tag
einfache Steuerung	201	48	4.2	5
modellbasierte Optimierung	203	47	4.3	8

Tabelle 8.4: Kennzahlen der Woche 44

9. Messresultate Konzept «realisierter Regler»

9.1 Messkonzept

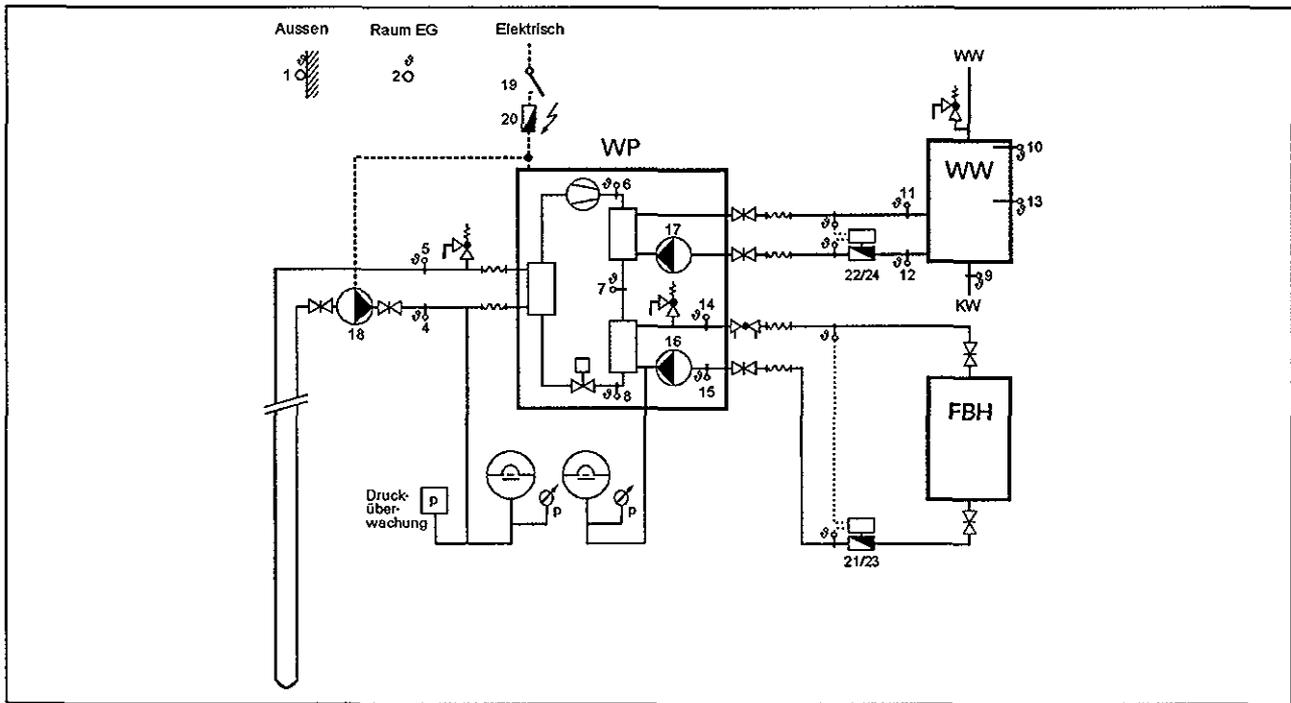


Bild 9.1: Prinzipschema mit Messstellen-Nummern gemäss Tabelle 9.2

Nr.	Messgrösse	Messort	Messbereich	Messfühler/-signal	Max. Messfehler
1	Temperatur	Südseite: Aussenluft (ventiliert)	-35...+125°C	Ni 1000	± 0,25 K
2	Temperatur ¹⁾	Wohnzimmer EG: Raumluft	-5...+37°C	NTC	± 0,3 K
3	Temperatur ¹⁾	Reserve	-5...+37°C	NTC	
4	Temperatur	Wärmequelle: Verdampfer-Eintritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
5	Temperatur	Wärmequelle: Verdampfer-Austritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
6	Temperatur	Arbeitsmittel: Warmwasserwärmetauscher-Eintritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
7	Temperatur	Arbeitsmittel: Heizungswärmetauscher-Eintritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
8	Temperatur	Arbeitsmittel: Heizungswärmetauscher-Austritt	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
9	Temperatur	Warmwasser: Speicher-Eintritt (Kaltwasser)	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
10	Temperatur	Warmwasser: Speicher-Austritt (Warmwasser)	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
11	Temperatur	Warmwasser: Speicherladekreis-Vorlauf	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
12	Temperatur	Warmwasser: Speicherladekreis-Rücklauf	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
13	Temperatur	Warmwasser: Speichermitte	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
14	Temperatur	Bodenheizung: Vorlauf	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
15	Temperatur	Bodenheizung: Rücklauf	-50...+110°C	NTC (103AT-11)	± 0,25 K
16	Betriebszeit	Bodenheizung: Umwälzpumpe FBH	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
17	Betriebszeit	Wärmepumpe: Umwälzpumpe WW-Ladekreis	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
18	Betriebszeit	Wärmepumpe: Umwälzpumpe Sole	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
19	Betriebszeit	Wärmepumpe: EKZ Wärmepumpen-Freigabe	0...10'	1 Imp./s	± 0,3%
20	Elektrizität ²⁾	Wärmepumpe: Gesamtanlage	max. 5 kW	120 Imp./kWh	± 2%
21	Wärme ³⁾	Wärmepumpe: Bodenheizung	max. 10 kW	1 Imp./kWh	± 4,5%
22	Wärme ⁴⁾	Wärmepumpe: Warmwasser	max. 10 kW	1 Imp./kWh	± 4,5%
23	Volumen ³⁾	Wärmepumpe: Bodenheizung	max. 2,5 m³/h	10 Imp./m³	± 3%
24	Volumen ⁴⁾	Wärmepumpe: Warmwasser	max. 2,5 m³/h	10 Imp./m³	± 3%

¹⁾ Autonome Temperatur-Logger (Messung nur im Winter)
²⁾ Elektrozähler (Privatzähler)
³⁾ Wärmezähler Ista mit Rechenwerk T1 und Volumenmessteil VMT 1,5 (Q_n = 1,5 m³/h, DN 15) mit Reed-Impulsausgang
⁴⁾ Wärmezähler Ista mit Rechenwerk T1 und Volumenmessteil VMT 1,5 (Q_n = 1,5 m³/h, DN 15) mit Reed-Impulsausgang

Tabelle 9.2: Messstellenliste. Der Messintervall beträgt 10 Sekunden und der Aufzeichnungsintervall 5 Minuten (Mittelwert bzw. Summenwert). Der maximale Messfehler beinhaltet die Summe aller Einzelfehler gemäss [1] Anhang B.

9.2 Raumtemperaturverlauf

Zwei typische Tage

Bild 9.3 zeigt die Verteilung der Leistungs-Pulse mit der resultierenden Soll/Ist-Energie-Bilanzierung. Da für die Berechnung des Energie-Sollwertes ein 24-Stunden-Fenster des Mittelwertes der Aussentemperatur laufend mitgeschoben wird, hat jede Änderung der Aussentemperatur eine sofortige, allerdings entsprechend gedämpfte Korrektur der Energiezufuhr zur Folge. Immer um 20.00 Uhr stimmt die zugeführte Wärme exakt mit der gemäss Energiekennlinie geforderten Wärme überein.

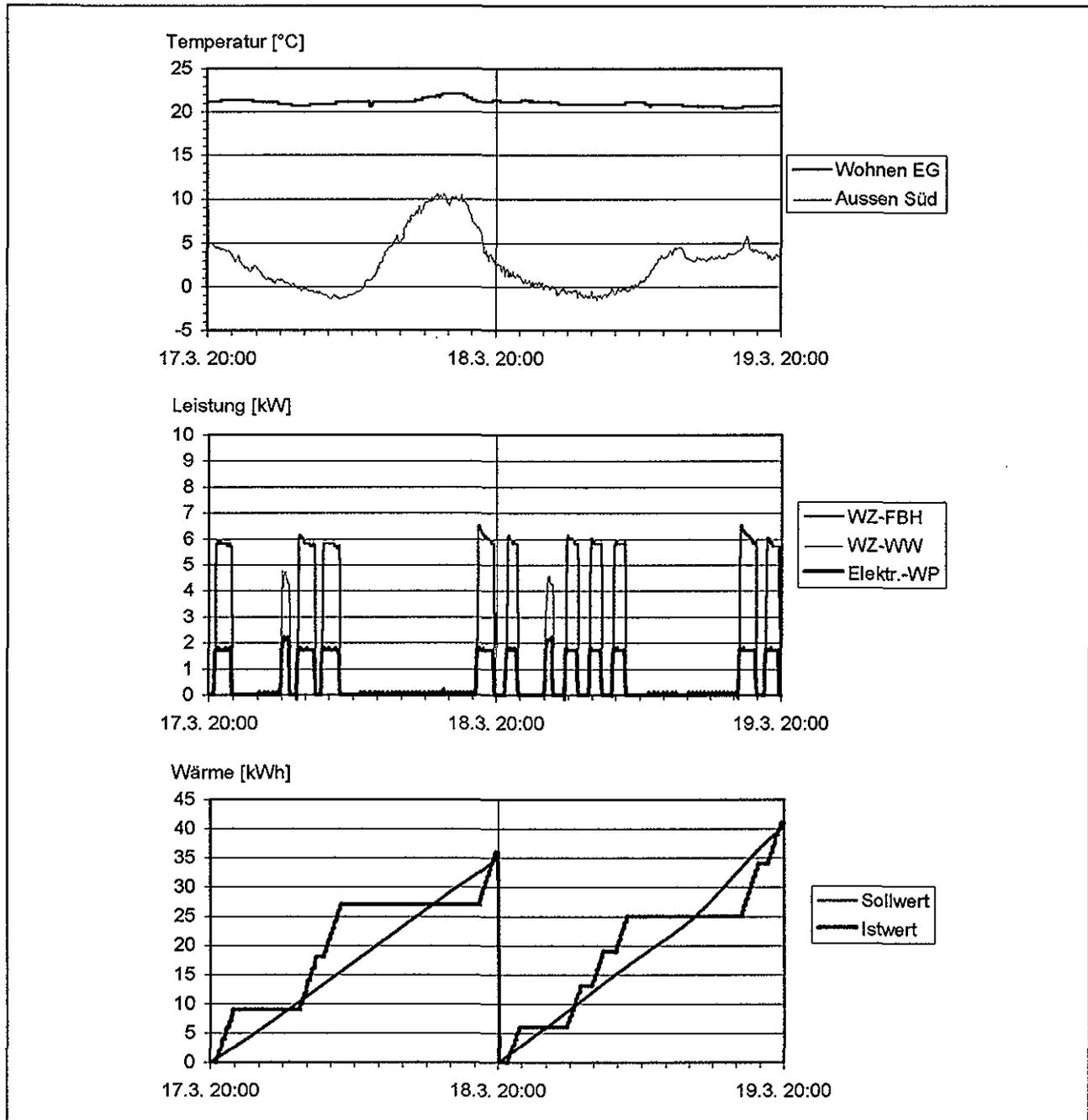


Bild 9.3: Oben: Raum- und Aussentemperaturverlauf 17.3.99 20.00 Uhr bis 19.3.99 20.00 Uhr. Mitte: Leistungs-Pulse Fussbodenheizung, Warmwasser (Abgabe) und Elektroaufnahme. Unten: Soll/Ist-Energie-Bilanzierung Fussbodenheizung.

Eine typische Woche

Der Raumtemperaturverlauf ist mit PBM ebenso konstant wie mit der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklaufftemperaturregelung. Bild 9.4 und Bild 9.5 zeigen die Pulsbreitenmodulation und den resultierenden Raumtemperaturverlauf in einer typischen Woche.

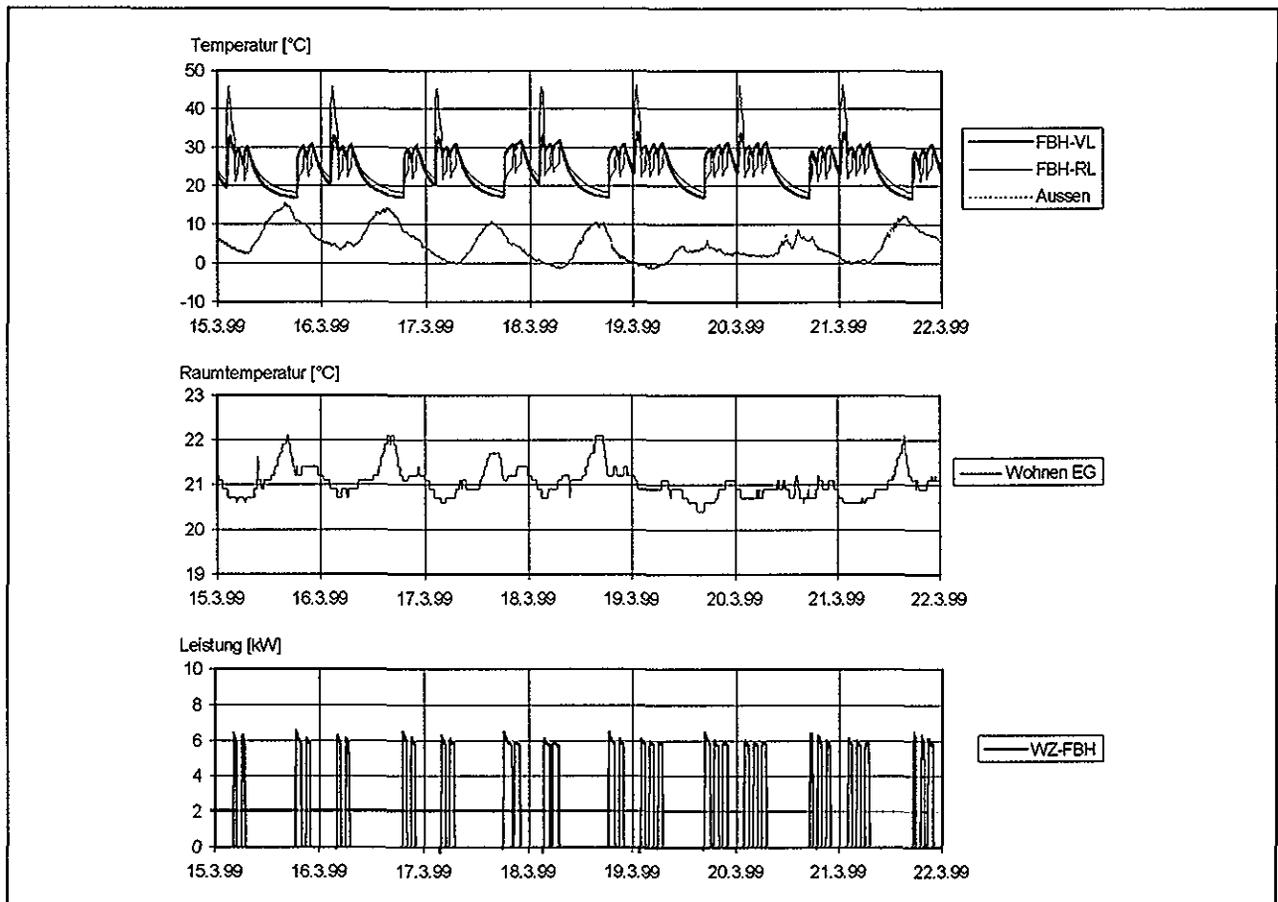


Bild 9.4: Messdaten der PBM-Regelung in der typischen Woche 11/99 (15.3.-21.3.99). Der Aussentemperaturverlauf zeigt, dass am 19. und 20. März, im Gegensatz zu den anderen Tagen, der Himmel bedeckt war.

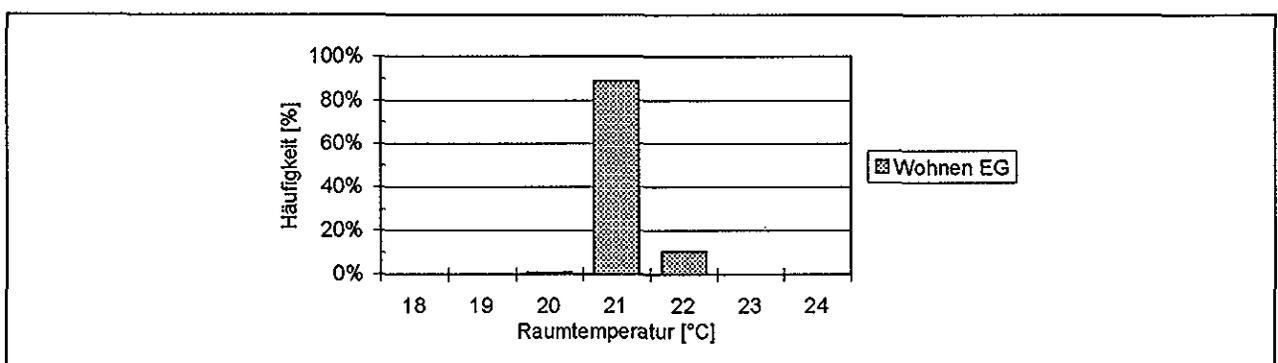


Bild 9.5: Die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperatur mit PBM-Regelung in der typischen Woche 11/99 (15.3.-21.3.99) zeigt eine nahezu perfekte Einhaltung der Soll-Raumtemperatur von 21°C

Verlauf über eine volle Heizperiode

Den Raumtemperaturverlauf mit PBM über die ganze Heizperiode zeigt Bild 9.6 im Vergleich zur herkömmlichen Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung. Beide Regelungsarten zeigen bezüglich Raumtemperatur ein ähnliches Verhalten.

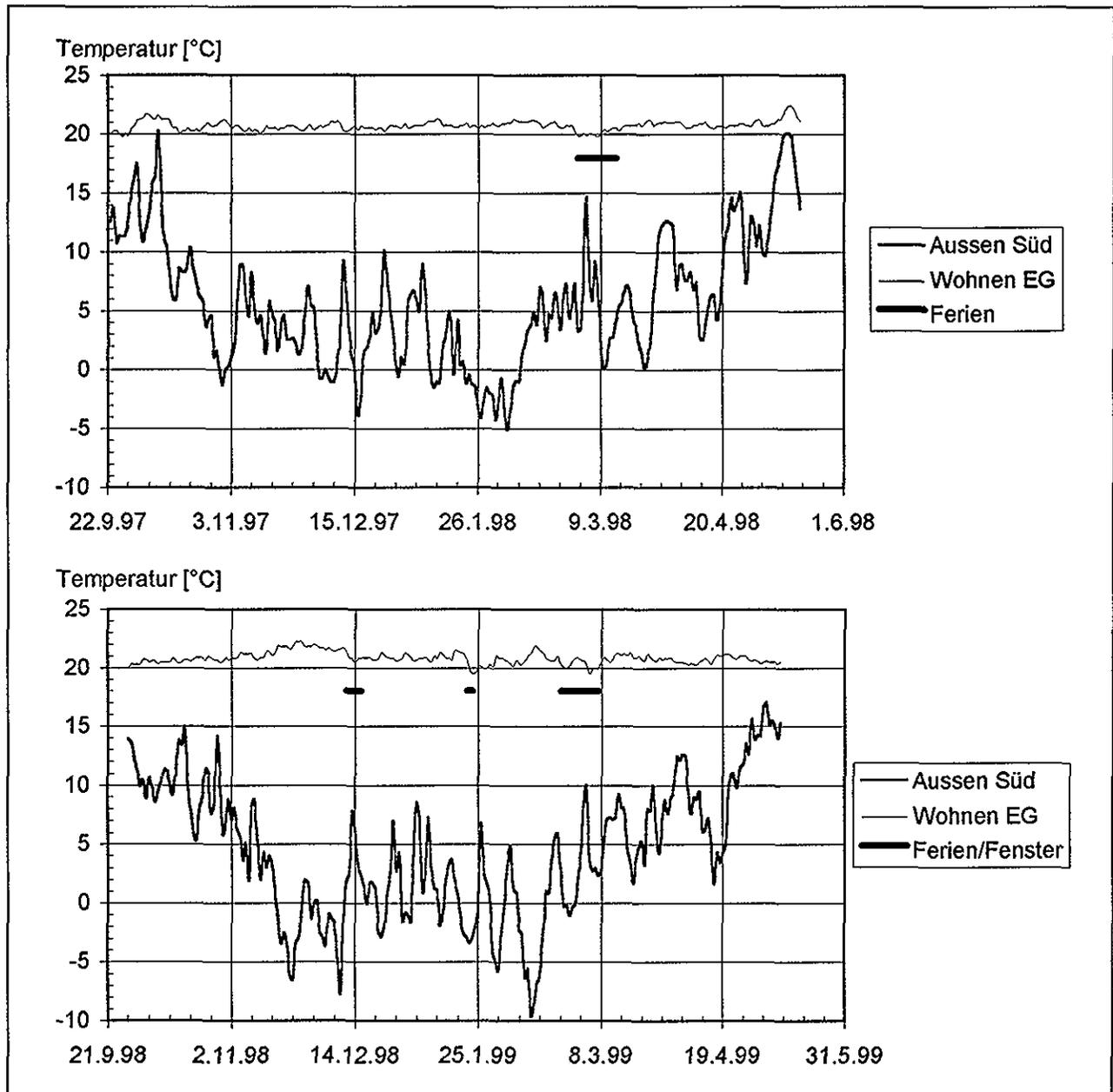


Bild 9.6: Aussentemperatur- und Raumtemperaturverlauf. Oben: Heizperiode 97/98 mit witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung. Unten: Heizperiode 98/99, seit dem 2.11.98 mit PBM. Die mit fetten Strichen markierten Zeiträume bezeichnen aussergewöhnliches Benutzerverhalten:

- 1.3.-14.3.98 Ferienabwesenheit
- 11.12.-16.12.98 Ferienabwesenheit
- 21.1.-23.1.99 Fenster im OG irrtümlich geöffnet (Beschreibung im nachfolgenden Text)
- 22.2.-7.3.99 Ferienabwesenheit

Zu hohe Raumtemperatur vom 2.11.98 bis 11.12.98

Durch abweichende Wärmepumpen-Kennwerte, die für die Berechnung der Rückführung «Messung und Berechnung Q_{24} » gemäss Bild 3.2b gebraucht wurden, wurde dem Gebäude zuviel Wärme zugeführt. Aus Bild 9.8 ist die resultierende Abweichung im Vergleich zum Wärmemesser ersichtlich.

Bild 9.7 zeigt die in der Heizperiode 97/98 gemessene Energiekennlinie (oben), die als Soll-Energiekennlinie für die Heizperiode 98/99 mit PBM verwendet wurde. Durch die abweichenden Wärmepumpen-Kennwerte resultierte zunächst jedoch eine zu steile Energiekennlinie. Seit der Korrektur wird mit einer Energiekennlinie gearbeitet, die praktisch mit der Energiekennlinie 97/98 identisch ist.

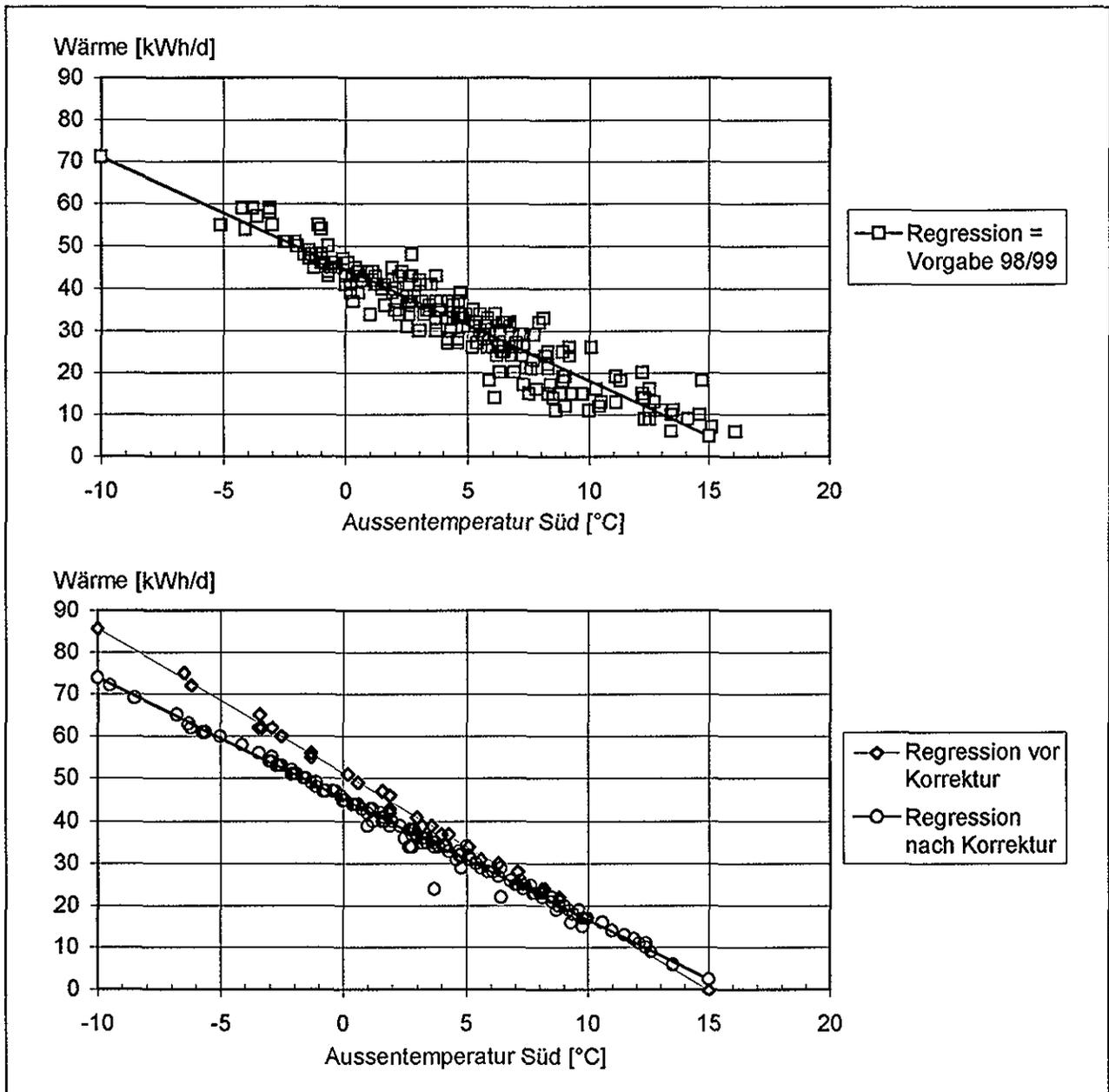


Bild 9.7: Energiekennlinien. Oben: 13.10.97 bis 1.11.98 mit witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung (als Vorgabe für die PBM-Regelung verwendet). Unten: 2.11.98 bis 9.5.99 mit PBM vor und nach der Korrektur vom 12.12.98.

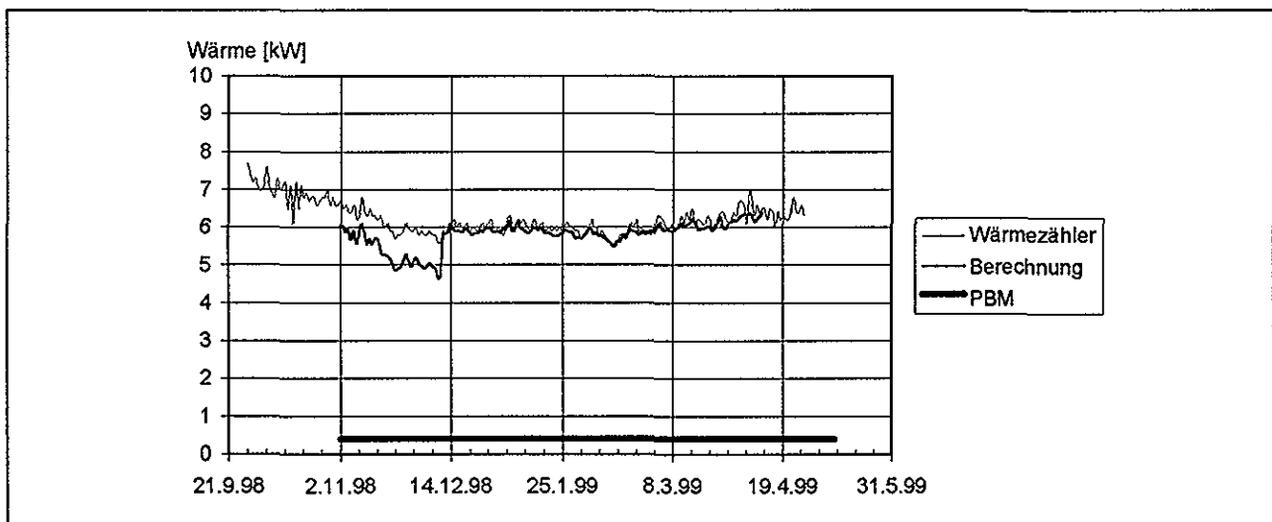


Bild 9.8: Mittlere Heizleistung der Wärmepumpe gemäss Wärmezähler und gerechneter Wert gemäss Rückführung «Messung und Berechnung Q_{24} » in Bild 3.2b. Korrektur der Berechnung ab 12.12.98. Heizperiode 98/99, seit dem 2.11.98 mit PBM.

Zu tiefe Raumtemperatur vom 21.1.99 bis 30.1.99

Irrtümlich blieben die Fenster im Obergeschoss bei einer Aussentemperatur von unter -3°C während $2\frac{1}{2}$ Tagen geöffnet. Durch die dadurch massiv erhöhten Wärmeverluste sank die Raumtemperatur im Wohnzimmer sukzessive bis auf $18,9^{\circ}\text{C}$ ab. Nachdem der Irrtum bemerkt und die Fenster geschlossen wurden, brauchte das Haus rund 7 Tage zur Erholung. Der Sollwert wurde während der Erholungszeit nicht erhöht, aber einige Male wurde zusätzlich mit dem Cheminée eingehitzt.

9.3 Mittlere Laufzeit der Wärmepumpe

Aus Bild 9.9 ist ersichtlich, dass die mittlere Laufzeit der Wärmepumpe bis zur Umstellung auf PBM praktisch unabhängig von der Aussentemperatur bei 10 bis 20 Minuten lag. Mit PBM konnte die mittlere Laufzeit problemlos auf 50 bis 90 Minuten (aussentemperaturabhängig) verlängert werden.

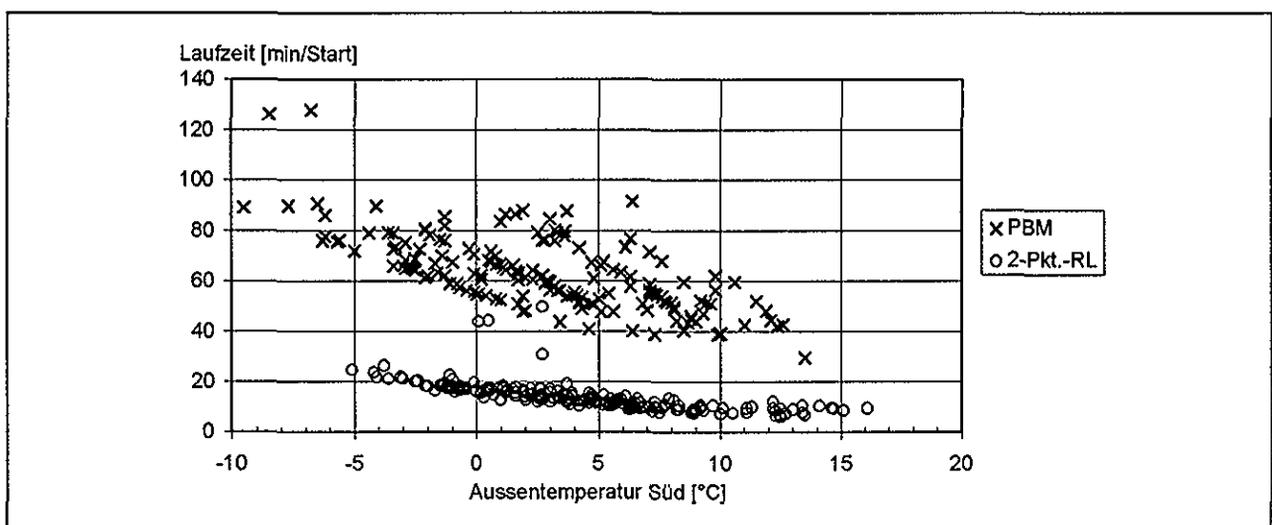


Bild 9.9: Vergleich der mittleren Laufzeit der Wärmepumpe in Funktion der Aussentemperatur mit PBM (98/99) und mit witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung (97/98).

9.4 Jahresarbeitszahlen

Optimierung der Wärmepumpenanlage

Der Lieferant/Ersteller der Wärmepumpenanlage Waltalingen hatte mit dem Bauherrn eine Qualitätsvereinbarung über eine Jahresarbeitszahl (JAZ) vom mindestens 3,0 getroffen. Da in der Heizperiode 97/98 nur eine JAZ von 2,7 realisiert werden konnte, optimierte der Lieferant/Ersteller die Wärmepumpenanlage hinsichtlich Hilfsenergieverbrauch auf die Heizperiode 98/99 durch Austausch der Solepumpe und Heizungspumpe. Damit konnte eine JAZ > 3,0 erreicht werden, obwohl die Wärmepumpe die Töss-Werte gemäss Bild 9.10 bei weitem nicht erbringt.

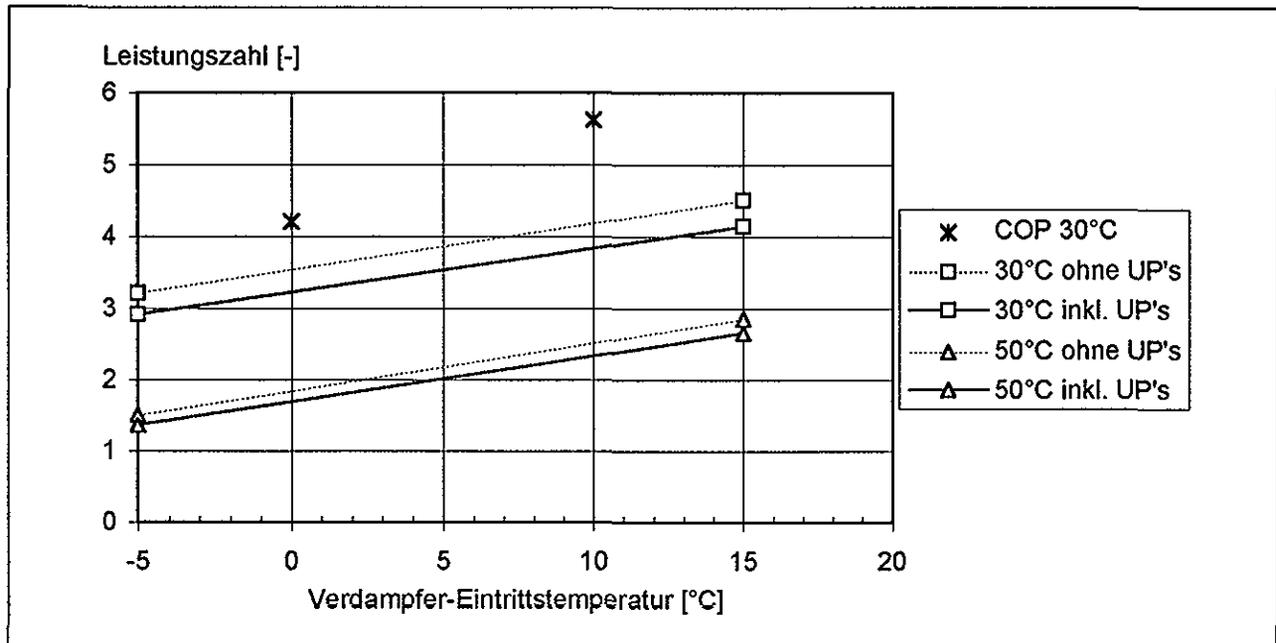


Bild 9.10: Gemessene Leistungszahlen der Heizperiode 98/99 für Heizung (30°C Verflüssiger-Austrittstemperatur) und Warmwasserbereitung (50°C Verflüssiger-Austrittstemperatur). Die Töss-Werte (COP bei 30°C Verflüssiger-Austrittstemperatur) werden bei weitem nicht erreicht. «Ohne UP's» bedeutet nur Verdichter und Steuerung/Regelung; «inkl. UP's» bedeutet Verdichter, Steuerung/Regelung, Verdampferpumpe und Verflüssigerpumpe.

Verdampfer-Eintritts- und Verflüssiger-Austrittstemperaturen

Bild 9.11 zeigt die Temperaturverläufe beim Verdampfer-Eintritt und Verflüssiger-Austritt. Während die Verdampfer-Eintrittstemperatur in den beiden Heizperioden ähnlich sind, ergaben sich bei den Verflüssiger-Austrittstemperaturen ungünstigere Verhältnisse während des PBM-Betriebs:

- Die FBH-Vorlauftemperatur stieg infolge des reduzierten Durchflusses an
- Der Warmwassertemperatur-Sollwert musste auf Wunsch des Bauherrn erhöht werden

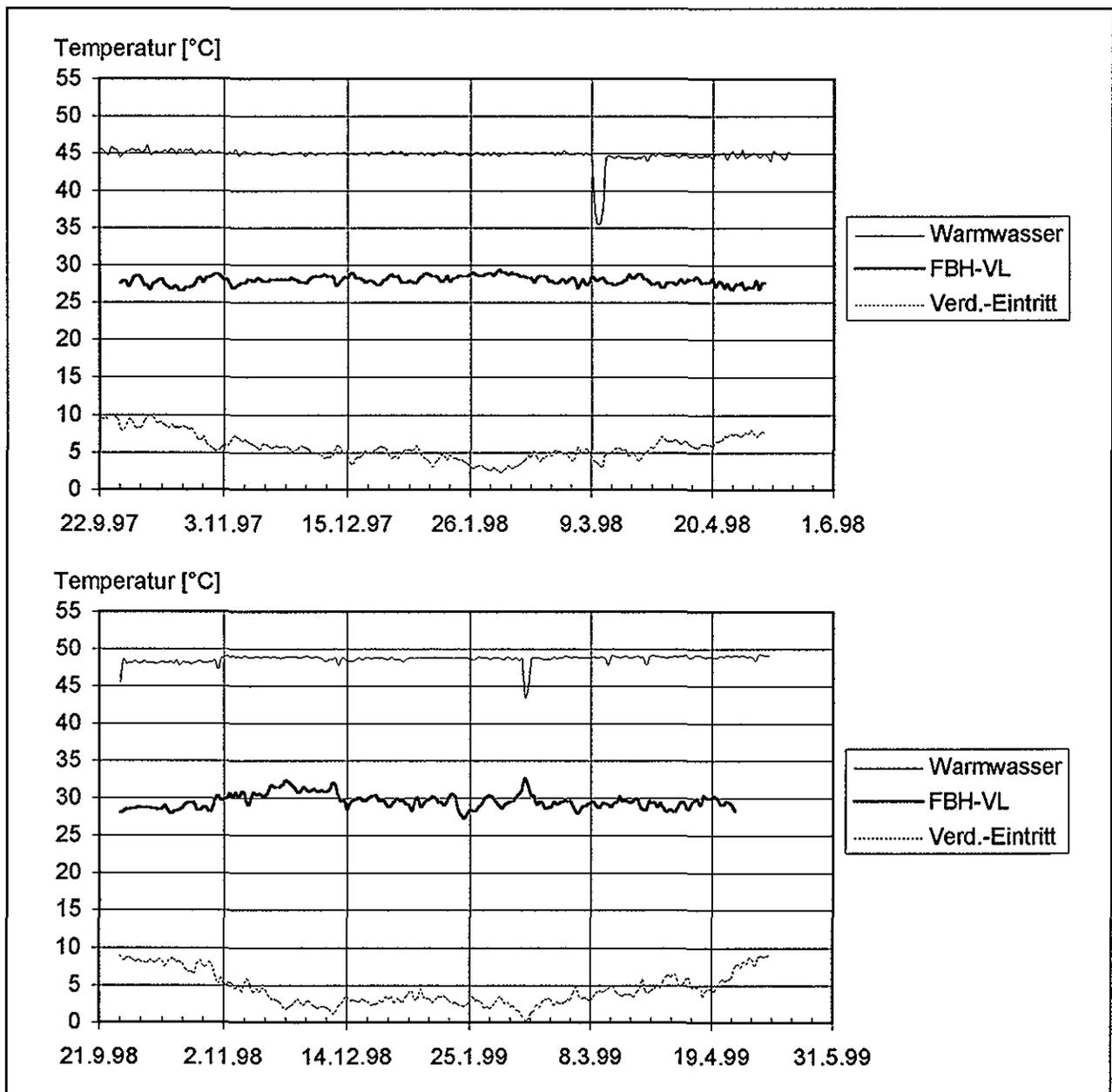


Bild 9.11: Verdampfer-Eintrittstemperatur und Verflüssiger-Austrittstemperatur (FBH-Vorlaufstemperatur bzw. Warmwassertemperatur). Oben: Heizperiode 97/98 mit witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklaufstemperaturregelung. Unten: Heizperiode 98/99, seit dem 2.11.98 mit PBM.

Vergleich der Jahresarbeitszahlen

Der Vergleich der Jahresarbeitszahlen gemäss Tabelle 9.12 lässt keine signifikante Verbesserung der Jahresarbeitszahl durch PBM nachweisen. Auch ohne PBM verbesserte sich die Jahresarbeitszahl in der Heizperiode 98/99 bis zum 1.11.98 deutlich, was offensichtlich auf den Ersatz der Sole- und der Heizungspumpe und die Laufzeitreduktion der Warmwasserpumpe zurückzuführen ist. Der Vergleich ist auch insofern problematisch, als bereits mit der herkömmlichen Zweipunkt-Rücklaufstemperaturregelung die Heizungsumwälzpumpe abgeschaltet wurde, was normalerweise nicht der Fall wäre.

Heizperiode 97/98 (29.9.97–27.4.98)		Heizperiode 98/99 (28.9.98–26.4.99)	
bis 1.11.97	ab 2.11.97	bis 1.11.99	ab 2.11.98
Witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung		Witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung	PBM
Original-Lieferzustand		Austausch der Verdampfer- und der Heizungspumpe, reduzierte Betriebszeit der WW-Ladepumpe	
Mittlere Aussentemperatur = 4,8°C		Mittlere Aussentemperatur = 3,9°C	
Mittlere Warmwassertemperatur = 45°C		Mittlere Warmwassertemperatur = 49°C	
WP-Laufzeit = 1268 h		WP-Laufzeit = 1365 h	
Anzahl Starts = 4189		Anzahl Starts = 1517	
Stromverbrauch = 2692 kWh		Stromverbrauch = 2512 kWh	
NT-Anteil = 43%		NT-Anteil = 52%	
Stromkosten = 380 Fr.		Stromkosten = 341 Fr.	
JAZ = 2,75 Gesamtanlage <u>inkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe	JAZ = 2,73 Gesamtanlage <u>inkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe	JAZ = 3,28 Gesamtanlage <u>inkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe	JAZ = 3,24 Gesamtanlage <u>inkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe
JAZ = 2,98 Gesamtanlage <u>exkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe	JAZ = 2,98 Gesamtanlage <u>exkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe	JAZ = 3,41 Gesamtanlage <u>exkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe	JAZ = 3,35 Gesamtanlage <u>exkl.</u> Heizungs- und WW-Pumpe

Tabelle 9.12: Vergleich einiger Kennzahlen. Alle «Jahres»-Arbeitszahlen (JAZ) beziehen sich auf den in der Kopfzeile angegebenen Zeitraum inkl. Warmwasserbereitung. Bei Anwendung der maximalen Messfehler gemäss Tabelle 9.2 ergibt sich für die JAZ ein maximaler Messfehler von $\pm 6,6\%$.

10. Schlussfolgerungen

1. An einem Fallbeispiel wurde nachgewiesen, dass PBM in einem Neubau in heute üblicher massiver Bauweise problemlos eingesetzt werden kann (Punkt 1 des Projektziels). Die befürchtete Raumtemperaturschwankung infolge der zeitverzögerten Energiezufuhr blieb aus.
2. Der dazu notwendige Geräte- und Bedienungsaufwand war nicht grösser als derjenige einer herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung (Punkt 2 und 3 des Projektziels).
3. Auf die Aufschaltung der Raumtemperatur als zusätzliche Eingangsgrösse konnte im vorliegenden Fall verzichtet werden, die Witterungsführung allein reichte vollauf (Punkt 4 des Projektziels).
4. PBM weist gegenüber der herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung entscheidende Vorteile auf:
 - Die Heizungspumpe läuft nur wenn der Kompressor auf Heizbetrieb arbeitet, damit ergibt sich eine bessere Jahresarbeitszahl (Punkt 5 des Projektziels). Im vorliegenden Fall kam dieser Vorteil nicht zum tragen, weil der trickreiche Vergleichsregler bereits eine Pumpenabschaltung vorsah.

- Die Wärmepumpe kann in den Pausen gezielt zur Wassererwärmung genutzt werden (Punkt 6 des Projektziels).
- Alle Nachteile der herkömmlichen witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklaufregelung im Schwachlastbetrieb werden vermieden.
- Die mittlere Laufzeit kann wesentlich verlängert werden. Damit verlängert sich auch die Lebensdauer der Wärmepumpe und die Jahresarbeitszahl kann verbessert werden.
- Einfachere Bedienung: «Meine Wärmepumpe muss bei -5°C Aussentemperatur während 14 Stunden laufen» ist wesentlich leichter zu verstehen als die Einstellung einer selbst für Fachleute nur schwer nachvollziehbaren Rücklaufregeltemperatur-Heizkurve.
- Der Niedertarifanteil kann wesentlich verbessert werden.
- Durch die 24h-Mittelwertbildung der Aussentemperatur und die definierte Heizgrenze ergibt sich eine sichere und problemlose Sommer-Winter-Umschaltung.
- Als weitere Vereinfachung wäre bei Luft-Wasser-Wärmepumpen denkbar, die Aussentemperaturmessung in den Ansaugkanal zu verlegen und nur bei laufendem Ventilator zu messen. Damit wäre kein einziger externer Fühler mehr notwendig!

11. Weiteres Vorgehen

In Phase 1 wurde PBM an einer Referenzanlage erprobt. Mit Tabelle 11.1 wurde der Versuch unternommen, die verschiedenen vorkommenden Anlagentypen in einer Matrix darzustellen. Darin deckt der realisierte PBM-Regler mit der untersuchten Referenzanlage bereits einen wesentlichen Teil ab, der schätzungsweise 75 % der heute gebauten Wärmepumpenanlagen entspricht.

Es können sechs Bereiche unterschieden werden:

- ① Träge Gebäude mit tragem Wärmeabgabesystem. Der realisierte PBM-Regler mit der untersuchten Referenzanlage entspricht diesem Bereich. Damit ist bereits ein wesentlicher Teil abgedeckt, der schätzungsweise 75 % der heute gebauten Wärmepumpenanlagen entspricht.
- ② Weniger träge Gebäude (weil schlecht wärmegeklämt) mit tragem Abgabesystem. Dieser Bereich dürfte in Zukunft durch den Sanierungsmarkt an Bedeutung gewinnen (Kesslersatz durch Wärmepumpe bei Gebäuden aus den 70er und 80er Jahren mit Fussbodenheizung).
- ③ Träge Gebäude mit flinkem Wärmeabgabesystem. Dürfte in Zukunft ebenfalls durch den Sanierungsmarkt an Bedeutung gewinnen (durch die Sanierung der Gebäudehülle wird die Radiatorheizung zur Niedertemperaturheizung und damit für Wärmepumpen geeignet).
- ④ Gebäude mit minimaler Speichermasse und tragem Wärmeabgabesystem. Tendenz steigend (steigende Nachfrage nach energiesparenden Holzbauten).
- ⑤ Gebäude mit minimaler Speichermasse und flinkem Wärmeabgabesystem. Tendenz steigend (steigende Nachfrage nach energiesparenden Holzbauten).
- ⑥ Uninteressante Bereiche, wo kaum Wärmepumpen eingesetzt werden.

		Fussbodenheizung	Radiatorenheizung
Massivbau	Super-Wärmedämmung	① Durch den realisierten PBM-Regler abgedeckt (schätzungsweise 75 % der heute gebauten WP-Anlagen)	③ Umfassende «Minergie- Sanierung»
	Normale Wärme- dämmung		③ Kessellersatz, Sanierung Wärmedämmung
	Schlechte Wärme- dämmung	② Kessellersatz	⑥
Leichtbau	Super- Wärmedämmung	④ «Minergie-Holzbau»	⑤ «Minergie-Holzbau»
	Normale Wärme- dämmung	④ Holzbau	⑤ Holzbau
	Schlechte Wärme- dämmung	⑥	⑥

Tabelle 11.1: Übersicht der Anlagentypen, bei denen Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Beschreibung der einzelnen Bereiche im laufenden Text.

In Phase 2 sollten die Untersuchungen in Richtung weniger träge Gebäude und Gebäude mit kleiner Speichermasse sowie in Richtung flinker Wärmeabgabesysteme ausgedehnt werden, also in Richtung der Bereiche ② bis ⑤ gemäss Tabelle 11.1.

12. Literaturverzeichnis

- [1] G. Reiner, E. Shafai, S. Ginsburg, R. Wimmer, H. R. Gabathuler, H. Mayer, H. U. Bruderer: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Phase 1 bis 3. Schlussbericht. Bern, Bundesamt für Energie, November 1998.
- [2] Christoph Schär: Optimale Regelstrategie für Kleinwärmepumpenanlagen. Semesterarbeit. Zürich, Eidg. Technische Hochschule, Institut für Mess- und Regeltechnik, Februar 1998.
- [3] Hans P. Geering: Mess- und Regeltechnik. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1990.