

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

EF Nr. 195295

Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen

Phase I

ausgearbeitet durch
H.R.Gabathuler, H.Mayer
Gabathuler AG, Beratende Ingenieure
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen
und
Dr.E.Shafai, R.Wimmer
Institut für Mess- und Regeltechnik
Eidgenössische Technische Hochschule
Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

In der konventionellen Heizungstechnik wurde der Raumtemperaturregler durch den witterungsgeführten Vorlauftemperaturregler verdrängt. In der Wärmepumpentechnik wird die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung heute als Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung «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 Rücklauftemperaturregelung 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-Rücklauftemperaturregelung 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 Bedienungsfreundlichkeit muss sie der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung mindestens 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 Wassererwärmung zu nutzen.

Bisher wurde das bereits vorhandene Simulationsmodell für die Referenzanlage «Barzheim» (freistehendes Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Seriespeicher, Bild/Tabelle 2.1) an das vorliegende Projekt angepasst und die Entwicklung und Erprobung des neuen Simulationsmodells für die Referenzanlage «Waltalingen» (zusammengebautes Einfamilienhaus mit Sole-Wasser-Wärmepumpe ohne Speicher, Bild/Tabelle 2.2) wurde in Angriff genommen. Aufgrund des Simulationsmodells «Barzheim» wurden zwei Varianten einer Pulsbreitenmodulation untersucht:

- Einfache Steuerung aufgrund praktischer Erfahrungen (Bild 3.2c)
- Modellbasierte Optimierung einer einfachen Regelstrategie (Bild 4.1)

Beide Regler zeigen in der Simulation ein ähnliches, erfolgsversprechendes Verhalten, wobei die einfache Steuerung eine leicht höhere Arbeitszahl, die modellbasierte Optimierung etwas geringere Schwankungen der Raumtemperatur aufweist. Durch einfache Änderungen können beide Konzepte so optimiert werden, dass eine Erhöhung der Arbeitszahl und eine Verbesserung des Raumtemperaturverlaufs erreicht werden kann.

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

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung.....	3
1.2 Ausgangslage	3
1.2 Projektziel.....	3
1.3 Vorgehen	3
Phase 1	3
Phase 2.....	4
2. Referenzanlagen.....	4
2.1 Luft-Wasser-Wärmepumpe in Barzheim	4
2.2 Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen	4
2.3 Vergleich Planung und Realität.....	4
3. Konzept «einfache Steuerung»	6
3.1 Problematik der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung.....	6
3.2 Neue Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation	7
3.3 Entwurf einer einfachen Steuerung aufgrund praktischer Erfahrungen.....	8
4. Konzept «modellbasierte Optimierung»	10
4.1 Prinzip der modellbasierten Optimierung.....	10
Optimierung des benötigten Wärmestroms.....	10
Pulsbreitenmodulation des Wärmestroms	10
4.2 Modell der Anlage.....	11
Last	11
Wärmepumpe	11
Verteiler	11
Parameter	11
4.3 Wettervorhersage	11
5. Vergleich der beiden Konzepte.....	12
5.1 Annahmen für die Simulation.....	12
5.2 Anpassung der Kennlinien der «einfachen Steuerung».....	12
5.3 Aussentemperaturverläufe der vier Wochen	12
5.4 Simulationsresultate.....	13
Woche 05	14
Woche 15	14
Woche 42	15
Woche 44	15
5.5 Einige energetische Kennzahlen	15
6. Weiteres Vorgehen.....	17

1. Aufgabenstellung

1.2 Ausgangslage

In der konventionellen Heizungstechnik wurde der Raumtemperaturregler durch den witterungsgeführten Vorlauftemperaturregler verdrängt. Die schwer fassbare Messgrösse «Raumtemperatur» wird nur noch gelegentlich als Option zur Störgrössen-Kompensation gebraucht.

In der Wärmepumpentechnik wird die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung heute als Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung «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 Rücklauftemperaturregelung ergibt auch zu häufige Ein-/Ausschaltvorgänge und lässt Sperr- und Niedertarifzeiten nicht optimal verarbeiten. Ausserdem wird oft übersehen, dass in der Wärmepumpentechnik nicht die Steuerung und Regelung der Wärmeabgabe das eigentliche Problem ist, sondern die äusserst komplexen Zusammenhänge der Wärmepumpenanlage, insbesondere die Empfindlichkeit bezüglich effizienter Energieumwandlung. Die an ausgeführten Anlagen gemessenen Jahresarbeitszahlen liegen heute im allgemeinen deutlich unter den Werten, die sich aus der Hochrechnung der bei stationärem Betrieb auf dem Prüfstand gemessenen Leistungszahlen ergeben.

1.2 Projektziel

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

1. Es soll ein Wärmepumpenregler mit Pulsweitenmodulation 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-Rücklauftemperaturregelung mindestens 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.

1.3 Vorgehen

Phase 1

In Phase 1 soll eine Regelstrategie entwickelt und an der Referenzanlage «Waltalingen» (zusammengebautes Einfamilienhaus mit Sole-Wasser-Wärmepumpe ohne Speicher, Bild/Tabelle 2.2) erprobt werden. Die Arbeit umfasst folgende Teile:

- Anpassung des bereits vorhandenen Simulationsmodells für die Referenzanlage «Barzheim» (freistehendes Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Seriespeicher, Bild/Tabelle 2.1) für erste Simulationen im vorliegenden Projekt bis das neue Simulationsmodell zur Verfügung steht
- Entwicklung und Erprobung des neuen Simulationsmodell für die Referenzanlage «Waltalingen» mit Hilfe von Messdaten, die 1996/97 an dieser Referenzanlage gemessen wurden
- Erarbeitung der Regelstrategie aufgrund der Resultate aus Simulationen mit den beiden Simulationsmodellen für die Referenzanlagen «Barzheim» und «Waltalingen»
- Realisierung der Regelstrategie und Implementierung im Wärmepumpenregler der Referenzanlage «Waltalingen»
- Messwerterfassung und Aufbereitung der Messdaten für den Wärmepumpenregler (on line) und für das Bezugsmodell (off line)
- Simulation zur Off-Line-Optimierung des Wärmepumpenreglers mit Hilfe von Messdaten, die 1998/99 an der Referenzanlage erhoben werden
- Erprobung des Wärmepumpenreglers und laufende Implementierung der strategischen Erkenntnisse aus der Off-Line-Optimierung

Phase 2

In Phase 2 soll schliesslich eine allgemeine Regelstrategie entwickelt und erprobt werden, die an unterschiedlichen Wärmepumpenanlagen und an unterschiedlichen Gebäuden einsetzbar ist. Die Wärme soll dabei nicht vergangenheitsorientiert, sondern auf 24 Stunden vorausschauend zugeführt werden (Model Predictive Control).

2. Referenzanlagen

2.1 Luft-Wasser-Wärmepumpe in Barzheim

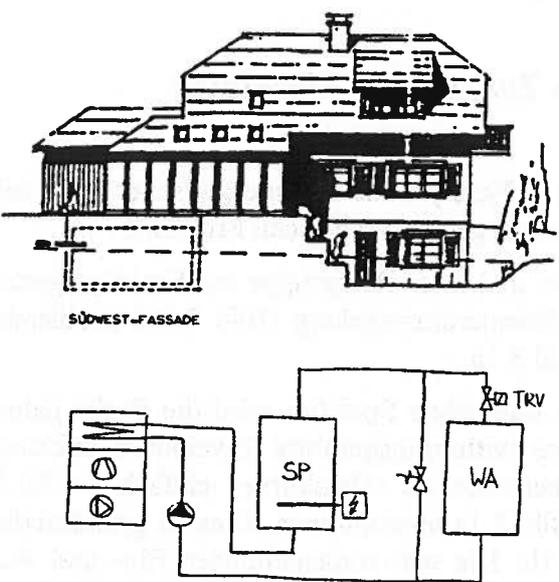
Im Rahmen des BFE-Projekts «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen» [1] wurde eine Wärmepumpenanlage mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe in Barzheim (Bild/Tabelle 2.1) über mehr als ein Jahr messtechnisch erfasst und ein Simulationsmodell erstellt. Die Messdaten und das Simulationsmodell dieser Referenzanlage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

2.2 Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen

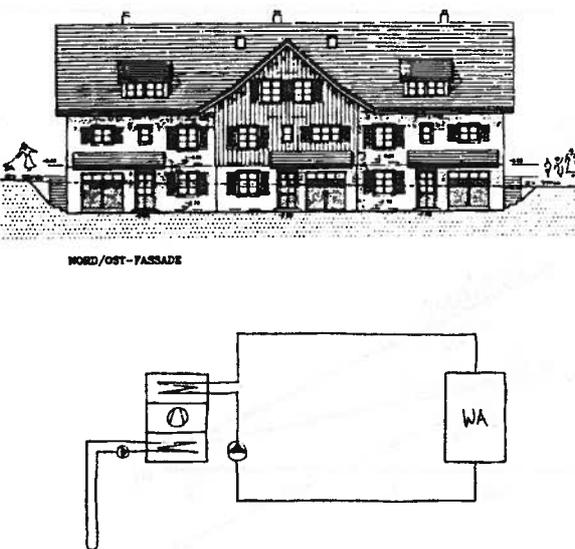
Beim vorliegenden Projekt soll die neue Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation an einer Wärmepumpenanlage mit einer Erdsonden-Wärmepumpe in Waltalingen erprobt werden (Bild/Tabelle 2.2). Auch diese Anlage wird bereits seit über einem Jahr messtechnisch erfasst. Das Simulationsmodell für diese Anlage wird 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/Tabelle 2.1 und Bild/Tabelle 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°C</p>	<p>Wärmeleistungsbedarf gemessen = 4,2 kW</p> <p>Vorlauf-/Rücklauf- temperatur bei -8°C Aussentemperatur ge- messen = 30/27°C</p>

Bild/Tabelle 2.1: Referenzanlage Barzheim. Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Seriespeicher im Vorlauf (wegen Elektrozusatzheizung) und Thermostatventilen. Energiebezugsfläche = 217 m².

Gebäude, Schaltung Wärmepumpenanlage	Planung	Realität
	<p>Wärmeleistungsbedarf SIA 384/2 = 6,0 kW</p> <p>Vorlauf-/Rücklauf- temperatur bei -8°C Aussentemperatur Auslegung = 45/35°C</p>	<p>Wärmeleistungsbedarf gemessen = 3,5 kW</p> <p>Vorlauf-/Rücklauf- temperatur bei -8°C Aussentemperatur ge- messen = 30/27°C</p>

Bild/Tabelle 2.2: Referenzanlage Waltalingen. Erdsonden-Wärmepumpe ohne Speicher. Referenzanlage ist das mittlere Haus mit einer Energiebezugsfläche von 177 m².

3. Konzept «einfache Steuerung»

3.1 Problematik der witterungsgeführten Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung

Einerseits sind die tiefen Heizwassertemperaturen heutiger Heizsysteme aus energetischer Sicht sehr zu begrüßen. Andererseits ergeben sich aber oft erhebliche regelungstechnische Probleme.

Bei einer Wärmepumpenanlage mit einem Parallelspeicher und einer Heizgruppe zur Entladeregulung kann die Anlage mit einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung (Bild 3.2a) problemlos geregelt werden. Die resultierenden Heizkurven zeigt Bild 3.1a.

Bei einer Klein-Wärmepumpenanlage mit Seriespeicher oder ohne Speicher wird die Sache jedoch wesentlich komplizierter. Üblicherweise wird hier eine witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung eingesetzt. Oft wird dann fälschlicherweise als «Heizkurve» einfach die Rücklauf-temperatur in Funktion der Aussentemperatur aus Bild 3.1a übernommen. Dies ist grundsätzlich falsch. Richtig ist die Einstellung entsprechend Bild 3.1b: Die witterungsgeführten Ein- und Ausschaltpunkte der Rücklauf-temperatur werden so eingestellt, dass im Mittel die geforderten Vor- und Rücklauf-temperaturen erreicht werden.

Hier entsteht aber oft ein unlösbares Problem: Die Linie der witterungsgeführten Einschaltpunkte der Rücklauf-temperatur schneidet die 20°C-Linie der Raumtemperatur bei viel zu tiefen Aussentemperaturen. Im Beispiel gemäss Bild 3.1b würde die Wärmepumpe bei 20°C Raumtemperatur über einer Aussentemperatur von 5°C nicht mehr einschalten.

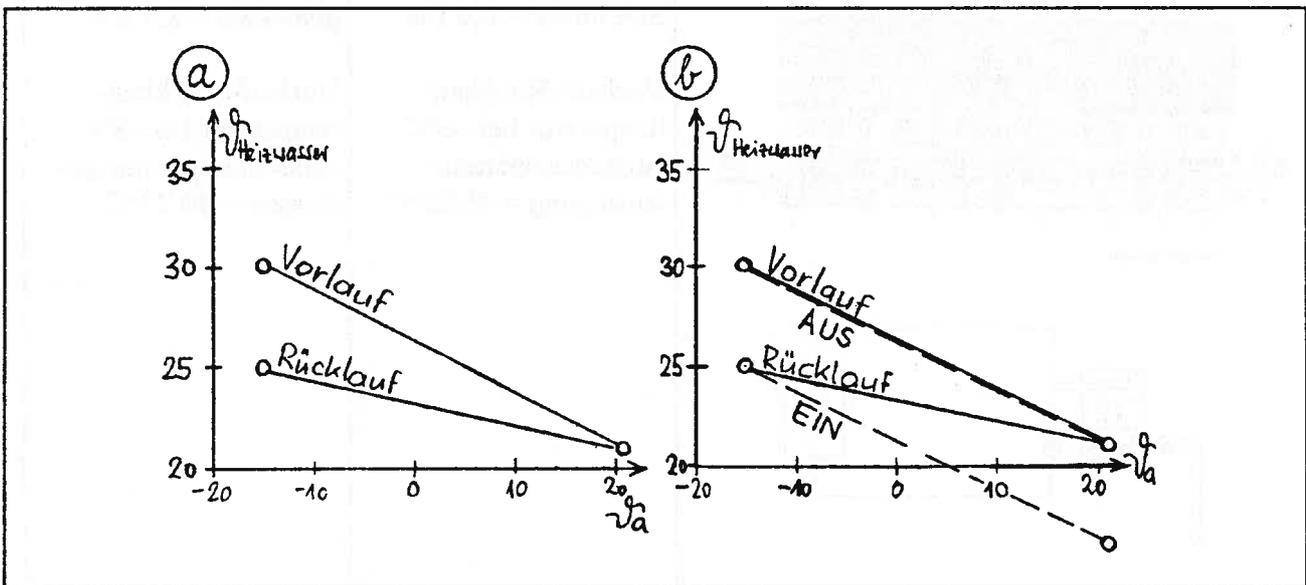


Bild 3.1: Heizkurven, vereinfachend als Geraden dargestellt. $\vartheta_{\text{Heizwasser}}$ = Heizwassertemperatur, ϑ_a = Aussentemperatur.

- Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung einer Wärmepumpenanlage mit Parallelspeicher und einer Heizgruppe mit Mischventil
- Witterungsgeführte Zweipunkt-Rücklauf-temperaturregelung einer Wärmepumpenanlage mit Seriespeicher oder ohne Speicher

3.2 Neue 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.

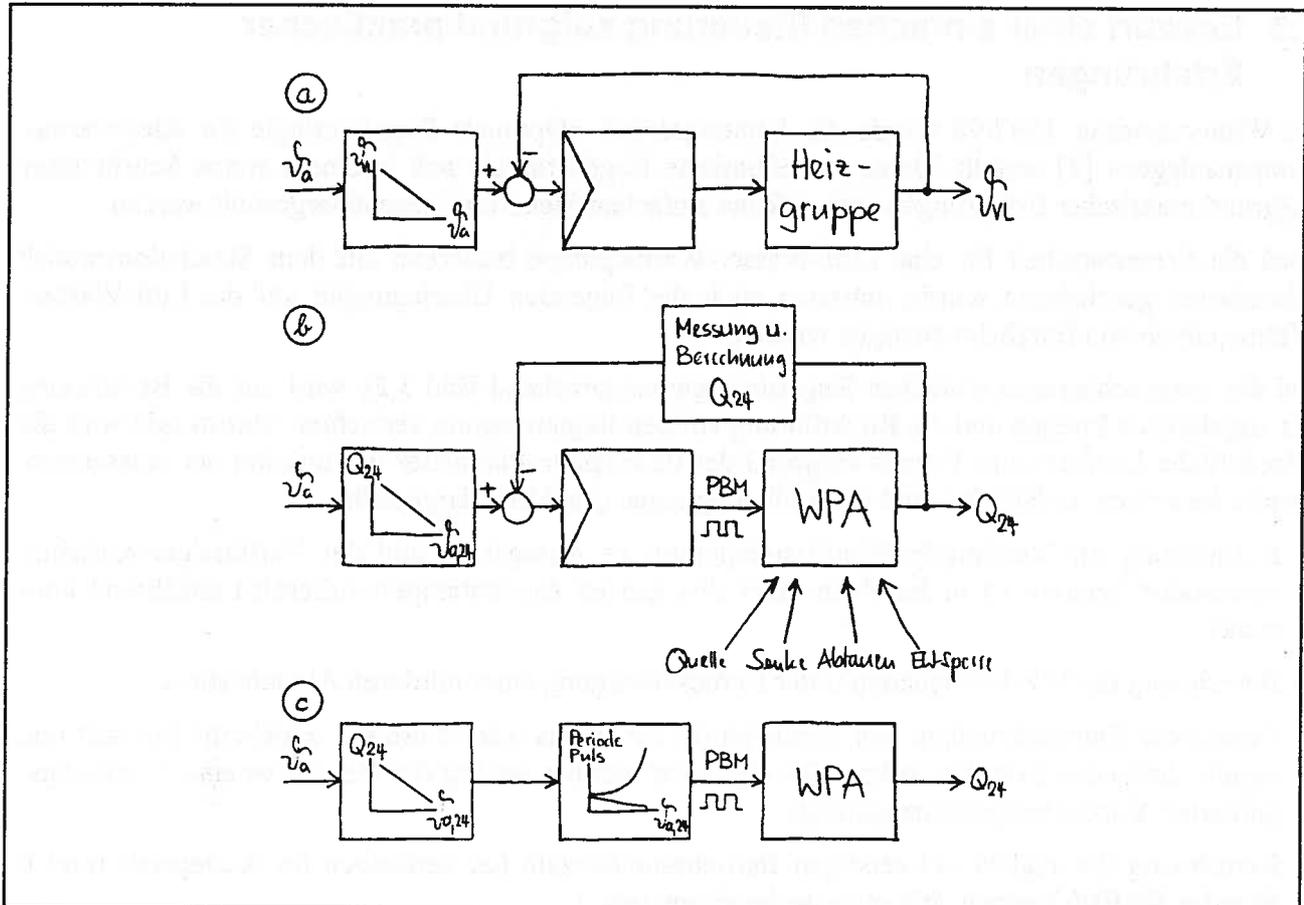


Bild 3.2: Vergleich der Regelstrategien. ϑ_a = Aussentemperatur, $\vartheta_{a,24}$ = Mittelwert der Aussentemperatur während der letzten 24 Stunden, ϑ_{VL} = Vorlauftemperatur, Q_{24} = Wärmemenge für 24 Stunden.

- Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung für eine Heizgruppe mit Mischventil
- Neue Regelstrategie mit Pulsbreitenmodulation für eine Wärmepumpenanlage
- Konzept «einfache Steuerung»

Stellgrösse ist die Laufzeit der Wärmepumpe. Dabei sind grundsätzlich zwei Grössen variabel: Impulsdauer und Periodendauer. Diese beiden Werte bestimmen die Grösse der einzelnen «Wärmpakete», die dem Gebäude zugeführt werden. Für die Grösse dieser «Wärmpakete» 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 Niedertarif-anteil erhöhen und damit die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen.

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

3.3 Entwurf einer einfachen Steuerung aufgrund praktischer Erfahrungen

Im Wintersemester 1997/98 wurde die Semesterarbeit «Optimale Regelstrategie für Kleinwärmepumpenanlagen» [2] erstellt. Diese modellbasierte Regelstrategie soll in einem ersten Schritt einer aufgrund praktischer Erfahrungen entworfenen einfachen Steuerung gegenübergestellt werden.

Weil die Semesterarbeit für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe basierend auf dem Simulationsmodell «Barzheim» geschrieben wurde, mussten auch die folgenden Überlegungen auf die Luft-Wasser-Wärmepumpe von Barzheim bezogen werden.

Bei der vorgeschlagenen einfachen Regelstrategie entsprechend Bild 3.2c wird auf die Berechnung der zugeführten Energie und die Rückführung auf den Reglereingang verzichtet. Stattdessen wird die erforderliche Laufzeit zum Voraus aufgrund der wichtigsten Parameter in Funktion der Aussentemperatur berechnet. In Bild 3.3 sind diese Überlegungen graphisch dargestellt:

- a) Bestimmung der Verdampfer-Eintrittstemperatur (= Aussenluft) und der Verflüssiger-Austrittstemperatur (letztere ist in Barzheim über den ganzen Aussentemperaturbereich annähernd konstant)
- b) Berechnung der WP-Heizleistung unter Berücksichtigung einer mittleren Abtauleistung
- 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

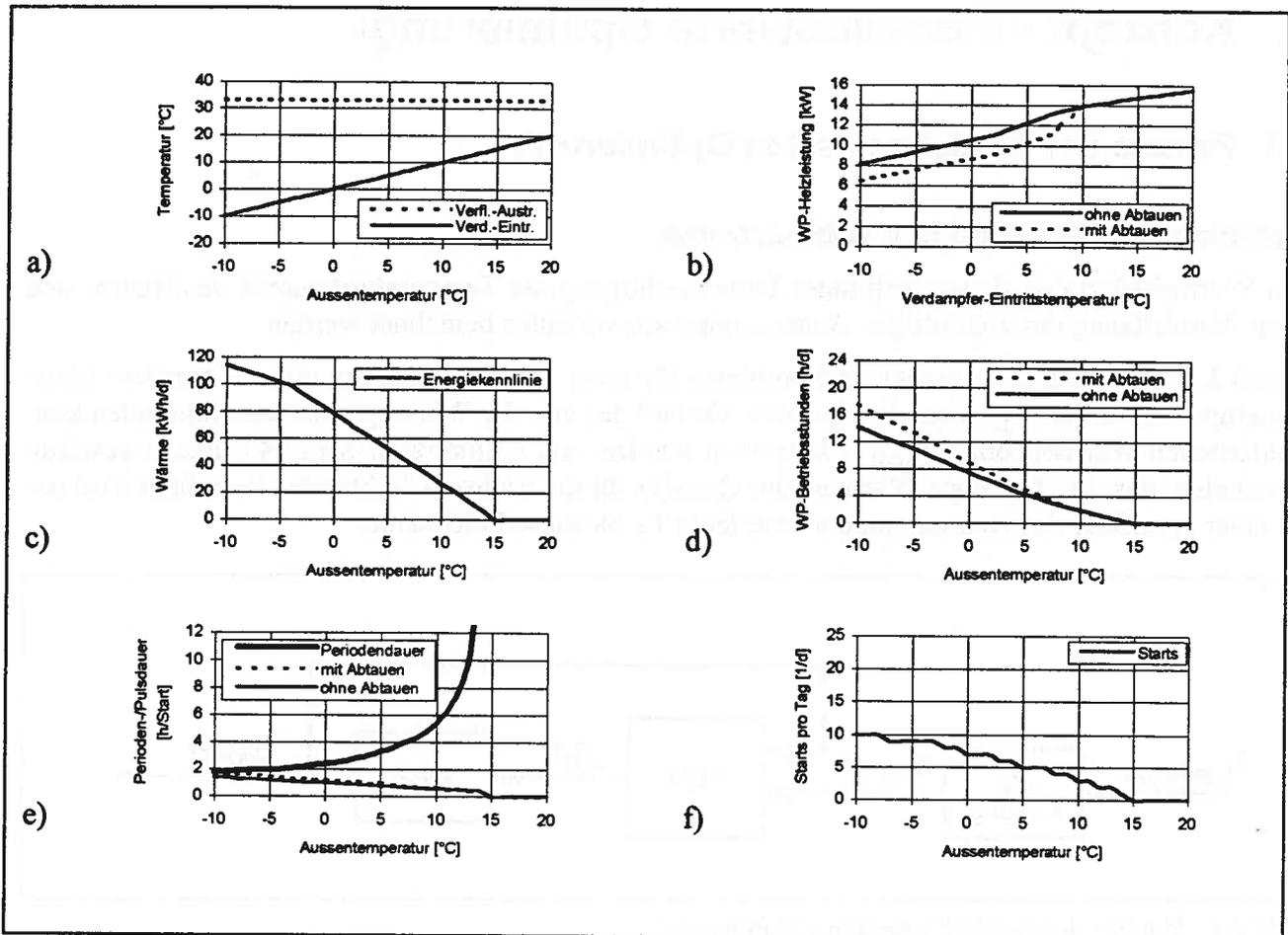


Bild 3.3: Entwurf einer einfachen Steuerung aufgrund praktischer Erfahrungen (Beschreibung im laufenden Text).

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. Eine bessere Lösung zeigt Bild 3.4: Hier wurde neben der minimalen Pulsdauer von 20 Minuten auch eine minimale Pausendauer von 30 Minuten definiert (inkl. Abtauung), und es wurde versucht möglichst schnell auf 10 Starts pro Tag zu kommen. Um die minimale Pausenzeit einzuhalten muss dann gegen den Auslegepunkt die Anzahl Starts wieder reduziert werden.

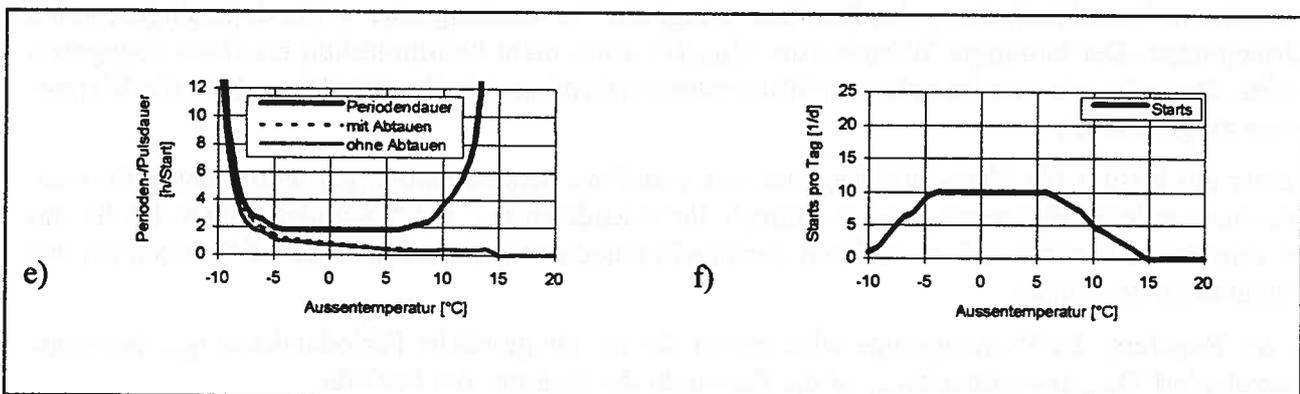


Bild 3.4: Gegenüber Bild 3.3e und Bild 3.3f optimierte Lösung (Beschreibung im laufenden Text).

4. Konzept «modellbasierte Optimierung»

4.1 Prinzip der modellbasierten Optimierung

Optimierung des benötigten Wärmestroms

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

Durch Lösung des LQ-Folgeregelungsproblems [3] unter Berücksichtigung einer Störgröße (Aussentemperaturverlauf T_L) kann der optimale Verlauf des von der Wärmepumpe zuzuführenden kontinuierlichen Wärmestroms $\dot{Q}_{Bed}(t)$ berechnet werden. Als Zeithorizont wird 24 Stunden gewählt. Dies heisst, dass der benötigte Wärmestrom $\dot{Q}_{Bed}(t)$ für die nächsten 24 Stunden berechnet wird unter einer Annahme des Aussentemperaturverlaufes T_L für diese Zeitspanne.

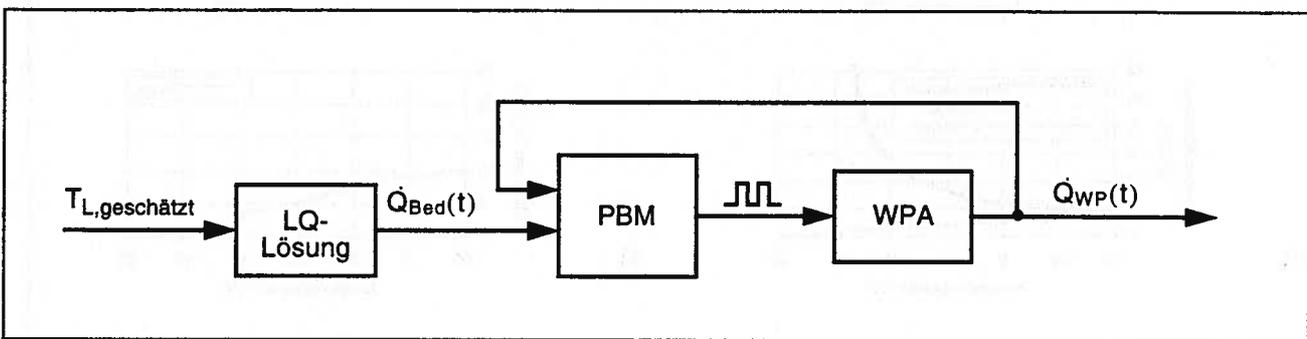


Bild 4.1: Prinzip der modellbasierten Optimierung

Berechnet man den Wärmestrom $\dot{Q}_{Bed}(t)$ 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 $\dot{Q}_{Bed}(t)$ 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 $\dot{Q}_{Bed}(t)$ 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 $t_{peri} = 1.5$ Stunden eruiert. Da für das hier verwendete Hausmodell dieser Wert noch nicht berechnet ist, wurden diese 1.5 Stunden bei den Simulationen 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.

$$Q_{Bed} = \int_{t_{Start}}^{t_{Start} + t_{peri}} \dot{Q}_{Bed}(t) dt \quad (4.1)$$

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 $\dot{Q}_{WP}(t)$ aus der Differenz der Vorlauftemperatur $T_{VL}(t)$ und der Rücklauftemperatur $T_{RL}(t)$ berechnet werden und aus $\dot{Q}_{WP}(t)$ wird mittels Integration die abgegebene Energie Q_{WP} bestimmt.

$$Q_{WP} = \int (T_{VL}(t) - T_{RL}(t)) \dot{V}_w \rho_w c_w dt \quad (4.2)$$

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.

4.2 Modell der Anlage

Die Modellstruktur wurde aus dem Projekt "Kurztestanlagen 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 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 und die Wärmeerzeugereingangstemperatur $T_{WE,e}$, 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.

Parameter

Da die Modellparameter aufgrund der Messdaten von Waltalingen noch nicht identifiziert sind, werden für die Last und die Wärmepumpe die Werte von Barzheim übernommen.

4.3 Wettervorhersage

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

Eine Verbesserung der Abschätzung bringt sicher eine Parallelverschiebung der ganzen Kurve so, dass der Wert vor 24 Stunden dem aktuellen Wert entspricht. Weiter kann noch die Steigung der Kurve an die aktuelle Steigung angepasst werden. Diese Möglichkeiten werden noch untersucht.

5. Vergleich der beiden Konzepte

5.1 Annahmen für die Simulation

- Es werden 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 Voraussinformation für beide Steuerungen gebraucht wird, sind in den Grafiken nur sechs Tage zu sehen.
- Es gibt keine Sperrzeiten.
- Das Abtauen der Wärmepumpe ist in der Wärmelieferleistung summarisch mitberücksichtigt.

5.2 Anpassung der Kennlinien der «einfachen Steuerung»

Da die Kennlinien in Kapitel 3. auf den Messdaten von Barzheim basieren, aber für die Simulation einige vereinfachende Annahmen getroffen wurden, sind die Kennlinien an das Modell angepasst worden (Bild 5.1).

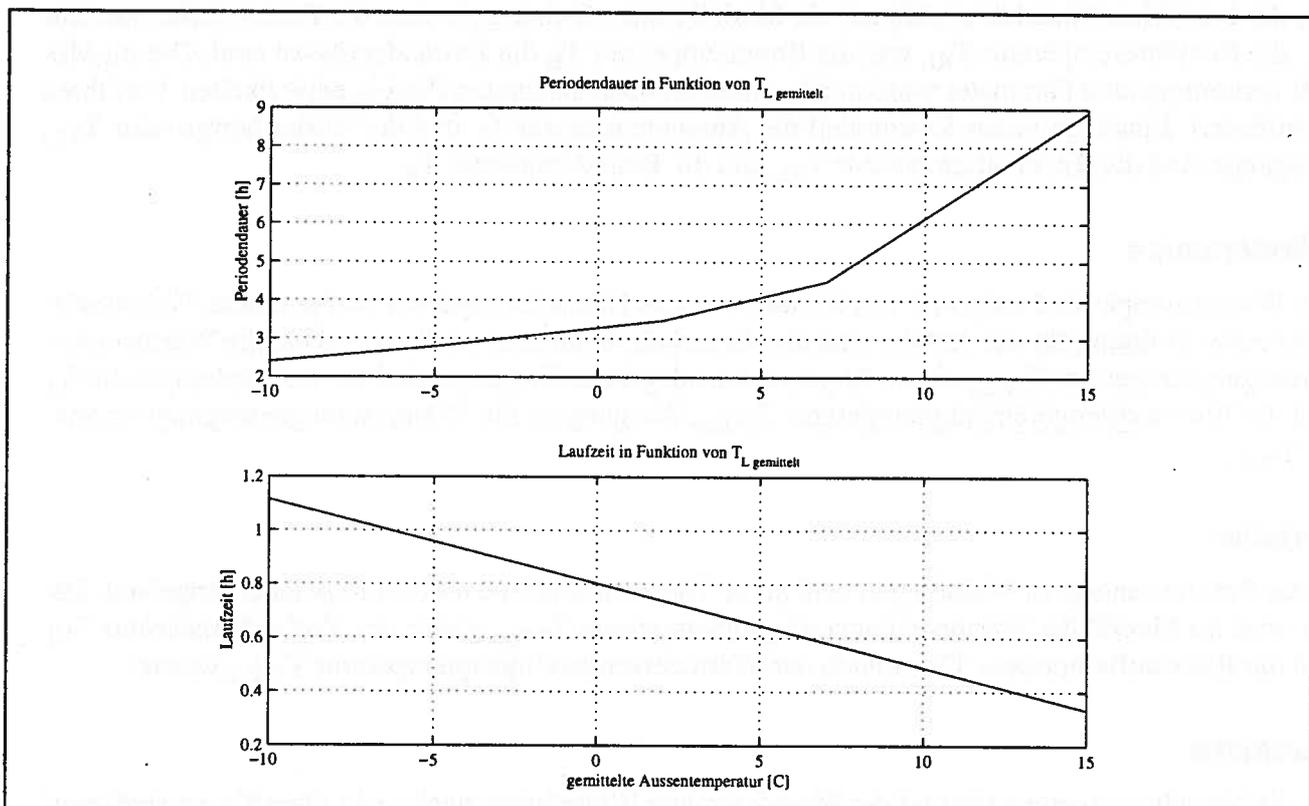


Bild 5.1: In den Simulationen verwendete Kennlinien

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 Raumtemperatur eingehalten wird.

5.3 Aussentemperaturverläufe der vier Wochen

In Bild 5.2 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.

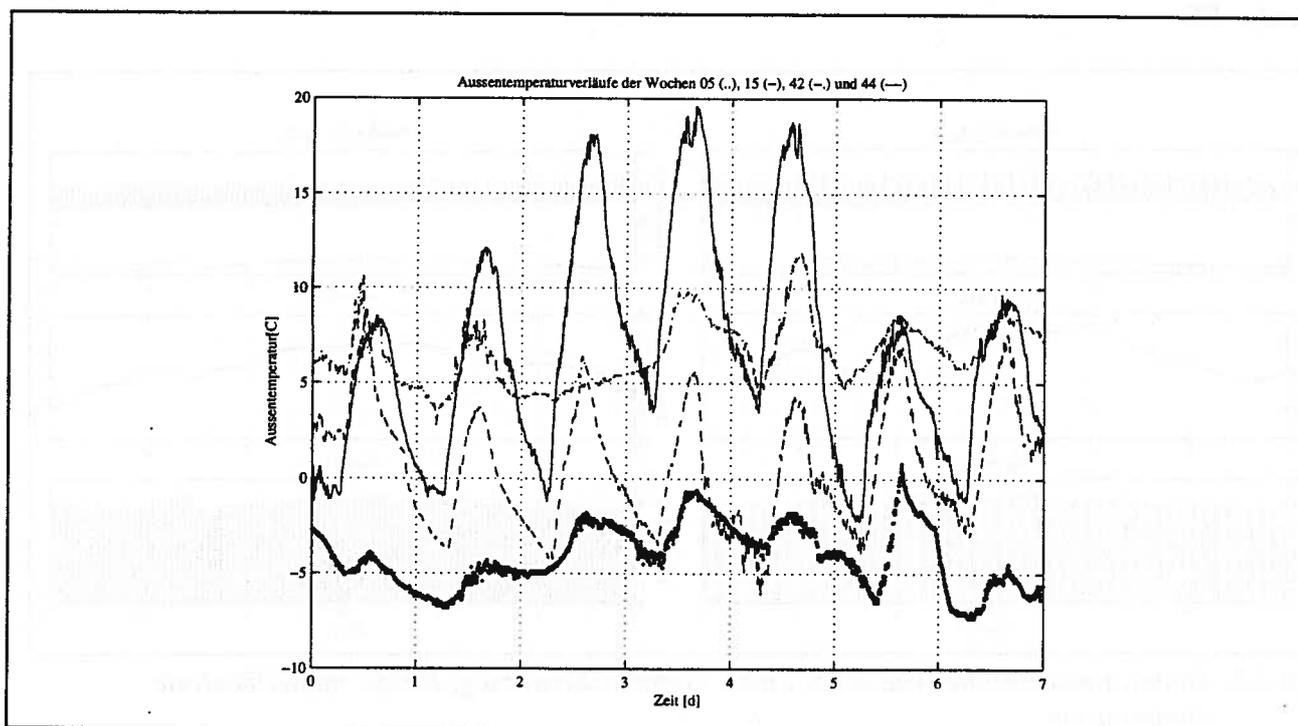


Bild 5.2: Aussentemperaturverläufe der vier Wochen

5.4 Simulationsresultate

In Bild 5.3 bis Bild 5.6 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 5.4) zu beobachten.

Die Vorlauf- und Rücklaufemperaturen 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 Tagestemperturverlauf. 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 5.6).

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 5.5). Diese Schwankungen sind jedoch so gering, dass sie keinen Einfluss auf den

Komfort haben. Bei der modellbasierten Optimierung ist dieser Effekt wegen der kürzeren Perioden-
dauer nicht bemerkbar.

Woche 05

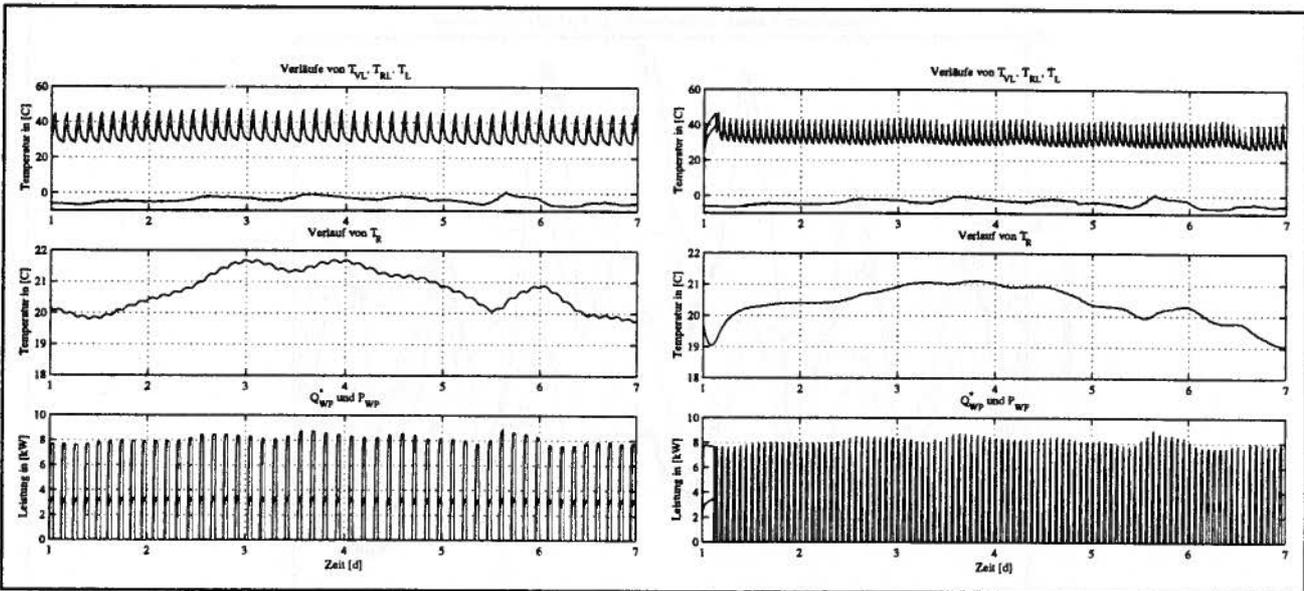


Bild 5.3: Simulationsergebnisse Woche 05. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 15

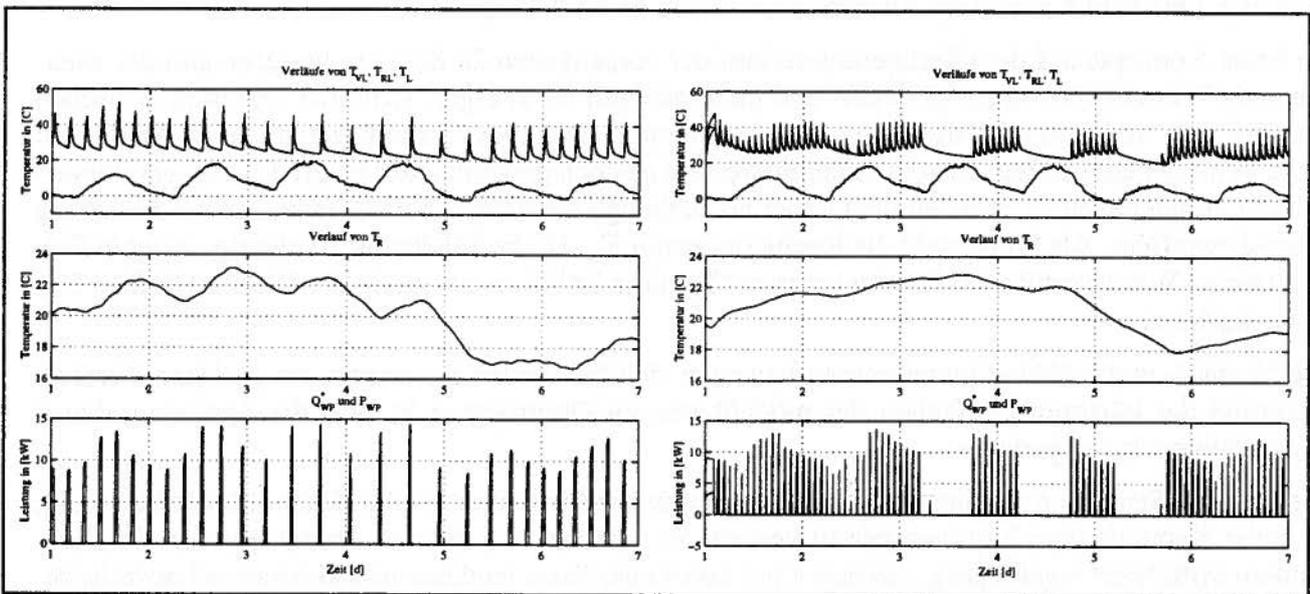


Bild 5.4: Simulationsergebnisse Woche 15. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 42

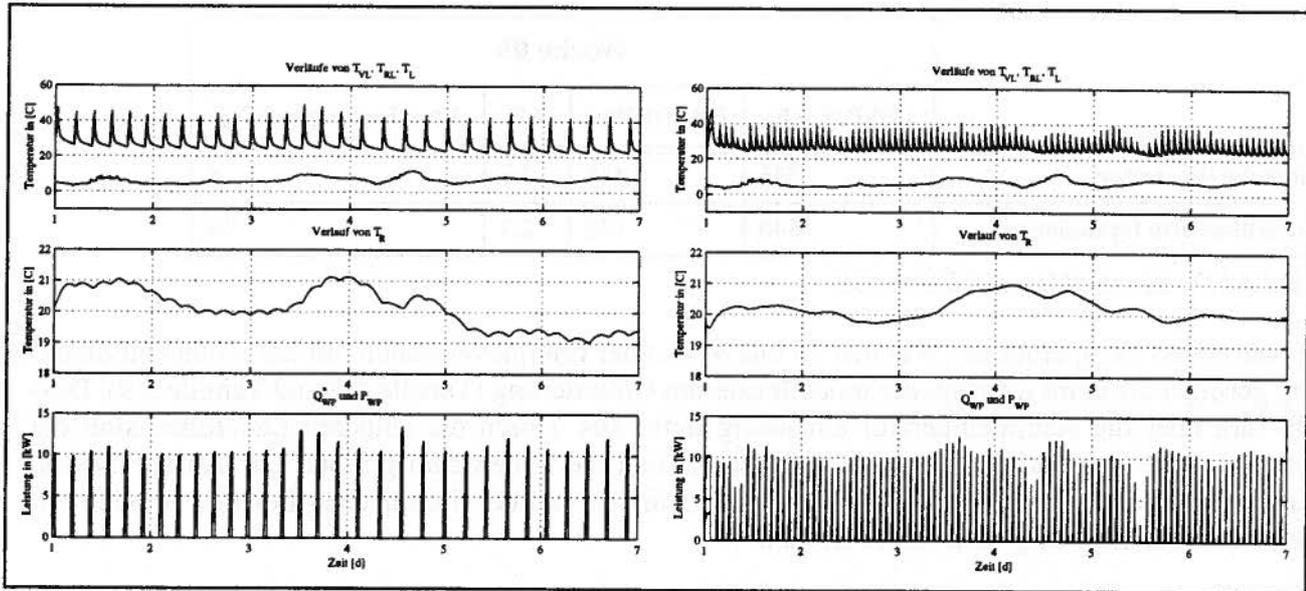


Bild 5.5: Simulationsergebnisse Woche 42. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

Woche 44

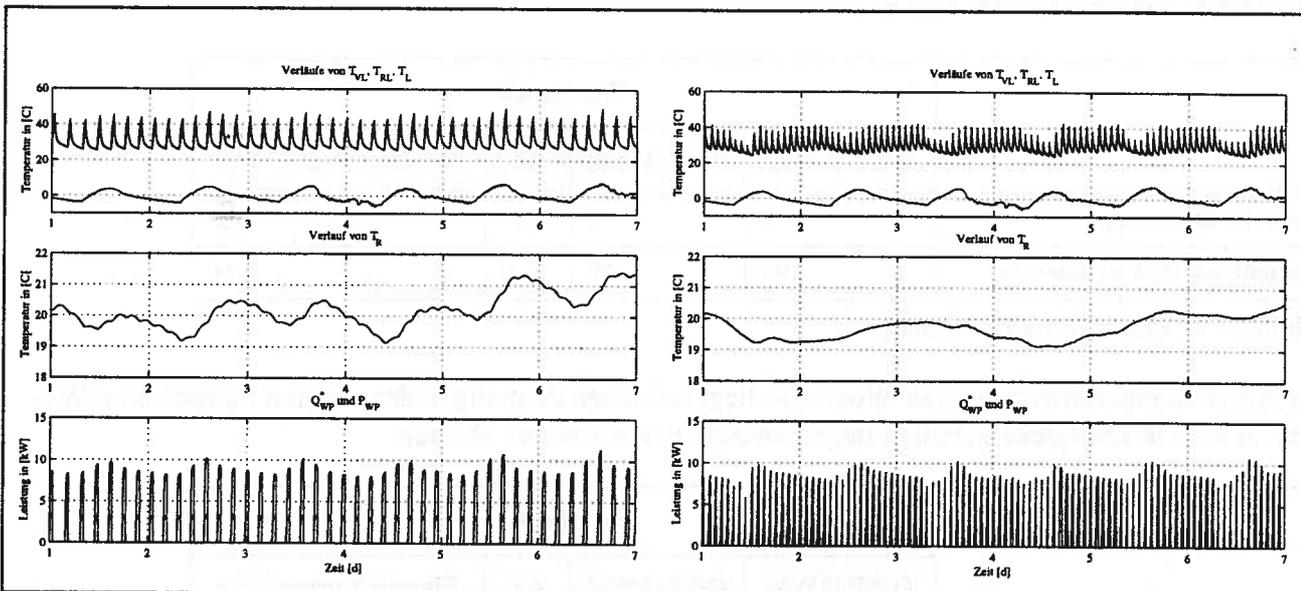


Bild 5.6: Simulationsergebnisse Woche 44. Links: einfache Steuerung, rechts: modellbasierte Optimierung.

5.5 Einige energetische Kennzahlen

Bei kaltem Wetter (Woche 05) sind die Energieaufnahme und -abgabe und damit die Arbeitszahl identisch (Tabelle 5.7). 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 5.7: 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 5.8 und Tabelle 5.9). 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 5.8: 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 5.9: 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 5.10: Kennzahlen der Woche 44

Trotz doppelt so vieler Einschaltungen der modellbasierten Optimierung bei kälteren Wetter hat dies fast keinen Einfluss auf die Arbeitszahl. Bei wärmeren Aussentemperaturen jedoch ist dieser Einfluss bemerkbar. Weitere Untersuchungen werden zeigen, wo das Optimum der Laufzeit respektive der Periodendauer liegt.

6. Weiteres Vorgehen

Bisher wurde das bereits vorhandene Simulationsmodell «Barzheim» an das vorliegende Projekt angepasst und die Entwicklung und Erprobung des neuen Simulationsmodells «Waltalingen» wurde in Angriff genommen. Auf Basis des Simulationsmodells «Barzheim» wurden zwei Regelstrategien erprobt:

- Einfache Steuerung aufgrund praktischer Erfahrungen
- Modellbasierte Optimierung einer einfachen Regelstrategie

Bis zum Abschluss von Phase 1 im April 1999 sind noch folgende Arbeiten geplant:

- Realisierung der Regelstrategie und Implementierung im Wärmepumpenregler der Referenzanlage «Waltalingen»
- Messwerterfassung und Aufbereitung der Messdaten für den Wärmepumpenregler (on line) und für das Simulationsmodell (off line)
- Simulation zur Off-Line-Optimierung des Wärmepumpenreglers mit Hilfe von Messdaten, die 1998/99 an der Referenzanlage erhoben werden
- Erprobung des Wärmepumpenreglers und laufende Implementierung der Erkenntnisse aus der Off-Line-Optimierung

7. Literatur

- [1] G. Reiner, E. Shafai, S. Ginsburg, R. Wimmer, H. R. Gabathuler, H. Mayer, H. U. Bruderer: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen. Phase 3. Schlussbericht. Bern, Bundesamt für Energie, in Vorbereitung.
- [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.