

JAHRESBERICHT 1999

Zu den Arbeiten gemäss dem Vertrag 66760

Titel des Projekts:

Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3

Zusammenfassung:

In der Phase 3 des Projekts "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" wurden drei Pilotanlagen gemessen. Die Anlagen in Grafstal und Schötz funktionierten einwandfrei. Bei der Anlage in Fully (Haustechnikmodul) waren umfangreiche Umrüstungen erforderlich. Die Resultate der Heizperiode 98/99 hat zu einigen Verbesserungsmaßnahmen geführt, deren Auswirkungen im folgenden beschrieben sind. Bei der Pilotanlage «Grafstal» zeigte sich, dass die Luftqualität starken Schwankungen unterworfen ist. Daher wird in den nächsten Tagen eine Einzelraumlüftung mit Mauerventilen eingebaut. Die Solepumpe der Erdsondenwärmepumpe wird ebenfalls ersetzt, mit dem Ziel, den Stromverbrauch zu halbieren. Bei der Anlage «Schötz» wurde der Warmwasserboiler nachisoliert, um dessen Bereitschaftsverluste zu reduzieren. Im Weiteren wurden die Fühler für die Aussenluft- und Zulufttemperatur umplatziert und ein Solarimeter installiert, das für die Regelung genutzt werden kann. Bei der Anlage «Fully» wurde das Haustechnikmodul HTM200 vollständig ersetzt. Anstelle des direkt kondensierenden Grundlastmoduls GLH soll eine Wandheizung mit Wasserkreislauf installiert werden. Offerten werden derzeit eingeholt.

Mit den drei Anlagen sollen Wissenslücken über *Heizkonzepte* und die *Regelbarkeit* von *Niedrigenergiehäusern* geschlossen werden. Von besonderem Interesse sind die Einflüsse des Benutzerverhaltens, die mechanische Wohnungslüftung und die sich daraus ergebenden Kennzahlen. Die resultierenden verallgemeinerbaren Aussagen werden in einem technischen Handbuch, Teil der Phase 4a, niedergelegt.

Nähere Informationen zum Projekt sind auf dem Internet unter der folgenden URL abrufbar:
<http://www.waermepumpe.ch/fe/projekte/nth>

Dauer des Projekts: **1. April 1998 bis 31. März 2000**

Beitragsempfänger: **Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung INFEL**

Berichterstatter: Dr. Thomas Afjei

Adresse: **INFEL**
Lagerstrasse 1, Postfach
8021 Zürich

Telefon: **01-299 41 82**
e-mail: **afjei@infel.ch**

1 PROJEKTZIELE 1999

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit einer Energiekennzahl von weniger als $160\text{MJ/m}^2\text{a}$ stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung. Die europäischen Wärmeschutzverordnungen, wie der MINERGIE-Standard oder die neue Energieeinsparverordnung in Deutschland, werden in wenigen Jahren diese Grenzwerte erreichen. Es ist daher wichtig, dass Architekten, Hersteller und Installateure auf diesen neuen Markt und dessen Erfordernisse optimal vorbereitet sind.

Da im MINERGIE-Standard neben allgemein formulierten Anforderungen nur Endenergiekennzahlen vorgeschrieben werden, ist die Frage, wie die erforderliche Wärme optimal erzeugt wird, noch nicht beantwortet. Hier setzt dieses Projekt an, indem bei gegebenen Komfortanforderungen das Gebäude mit der Wärmeerzeugung als integrale Einheit aufgefasst wird, um die Zielgrößen Komfort, Ökologie und Ökonomie optimal zu erfüllen.

2 ARBEITEN UND ERGEBNISSE 1999

Alle drei Pilotanlagen sind in Betrieb, erste Messresultate sind in einem Zwischenbericht [NTH3 99] enthalten.

2.1 Pilotanlage Grafstal: Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellboiler

2.1.1 Stand der Messungen

Die Energieflüsse vom 30. November 1998 bis 26. September 1999 sind in Abb. 1 dargestellt. Die Energieflüsse sind MJ/m^2 angegeben, wobei die fett gedruckten Werte Messwerte und die halbfetten Werte Berechnungen sind.

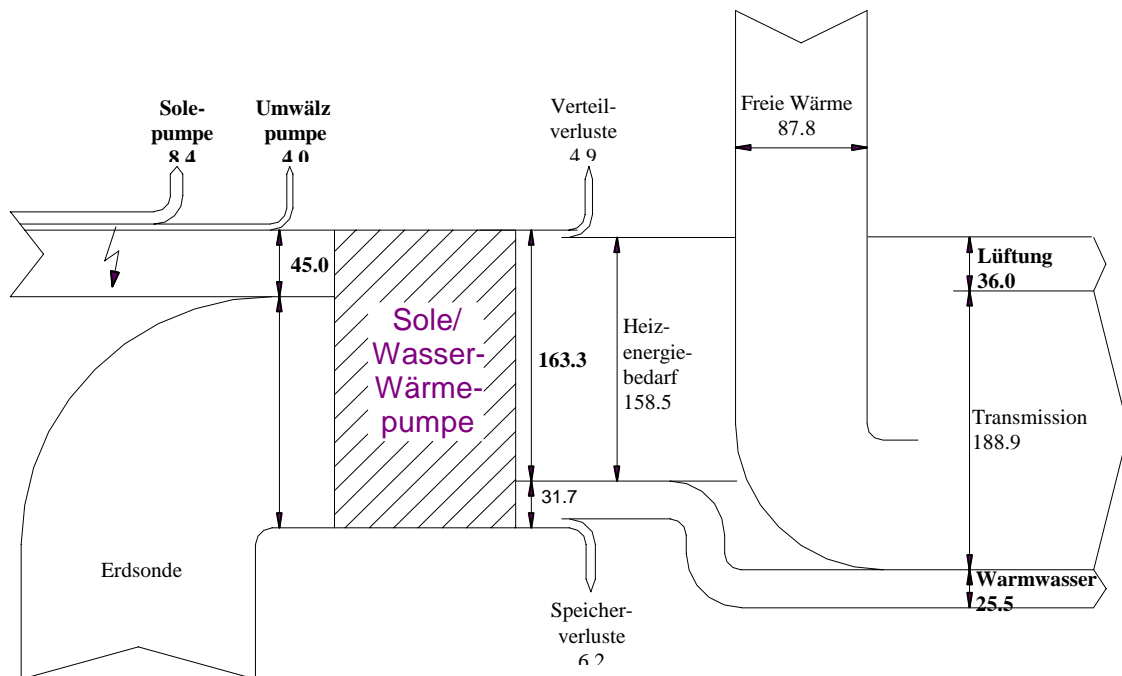


Abb. 1: Energieflussdiagramm Grafstal: Werte in MJ/m^2 für eine elfmonatige Messperiode (Anm.: **fett** = Messwert, **halbfett** = Abschätzung oder Berechnung)

2.1.2 Erkenntnisse / Verbesserungen

Luftqualität

Der CO₂-Gehalt im EG lag während ca. 14% der Messperiode über dem Richtwert von 1500 ppm. Dies deutet auf eine nur mässige Lufterneuerung hin (siehe Abb. 2). Die nun vorliegenden Resultate der Passivtracergasmessung [PentIAQ 99] bestätigen diese Vermutung (siehe Abb. 3). Mit einem mittleren Luftwechsel von ca. 0.22 h⁻¹ im Erdgeschoss und ca. 0.15 h⁻¹ im Ober- und Dachgeschoss wird der erwartete Luftwechsel von 0.4 h⁻¹ deutlich unterschritten.

Diese Messungen zeigen, dass durch die sehr dichte Bauweise auf eine Wohnungslüftung kaum verzichtet werden kann. Noch im Dezember 1999 sollen als Verbesserungsmassnahme Einzelraumlüftungsgeräte und Mauerventile in die Gebäudehülle eingebaut werden.

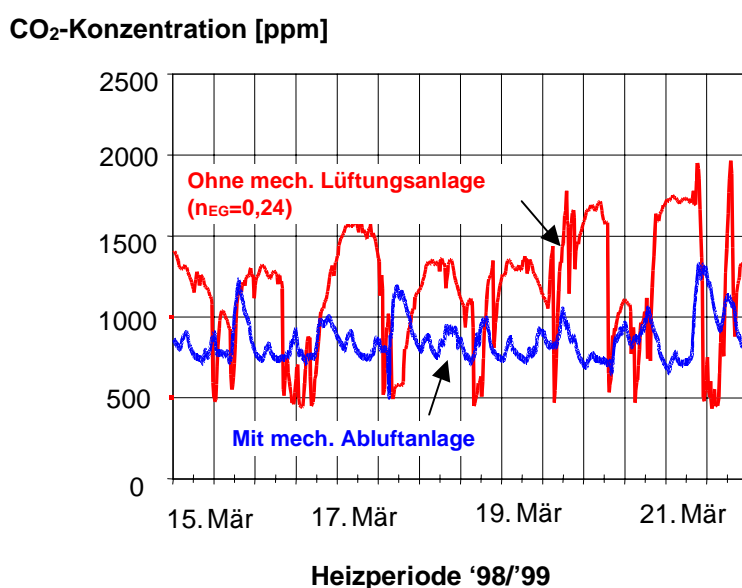


Abb. 2: Vergleich zweier Niedrigenergiehäuser mit und ohne Wohnungslüftung (Anm.: In der Grafik werden die CO₂-Konzentrationen im Erdgeschoss gezeigt; n_{EG} gibt den während der Monate Dezember bis Februar gemessenen, mittleren stündlichen Luftwechsel im Erdgeschoss an.)

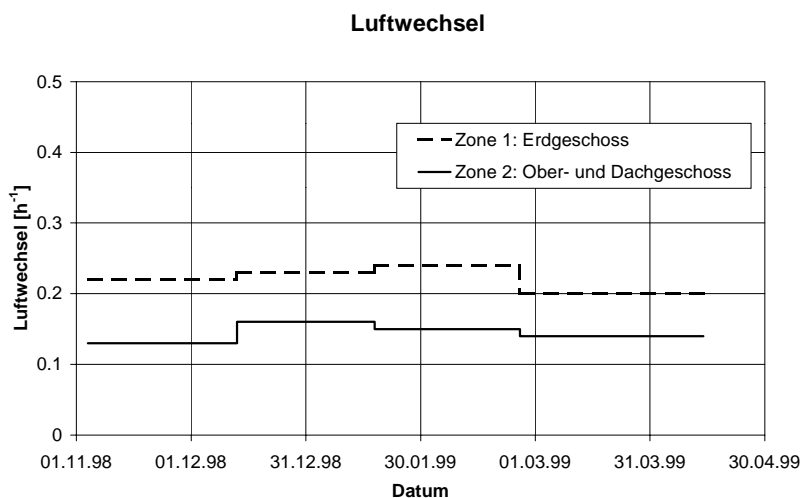


Abb. 3: Luftwechsel im Erdgeschoss sowie im Ober- und Dachgeschoss

Pumpe Raumheizung

Die Raumheizung wurde mit Vor- / Rücklauftemperaturen von ca. 35°C / 25°C betrieben (siehe Abb. 4). Um die erforderlichen Auslegungstemperaturen von 30°C / 25°C einzuhalten muss der Durchfluss erhöht werden. Die eingesetzte Gleichstrom-Umwälzpumpe funktioniert zwar einwandfrei, erreicht jedoch nicht den geforderten Durchfluss, weil sie nur in dieser kleinen Baugrösse erhältlich ist. Sie wird noch im Dezember durch eine konventionelle Pumpe mit höherem Fördervolumen ersetzt.

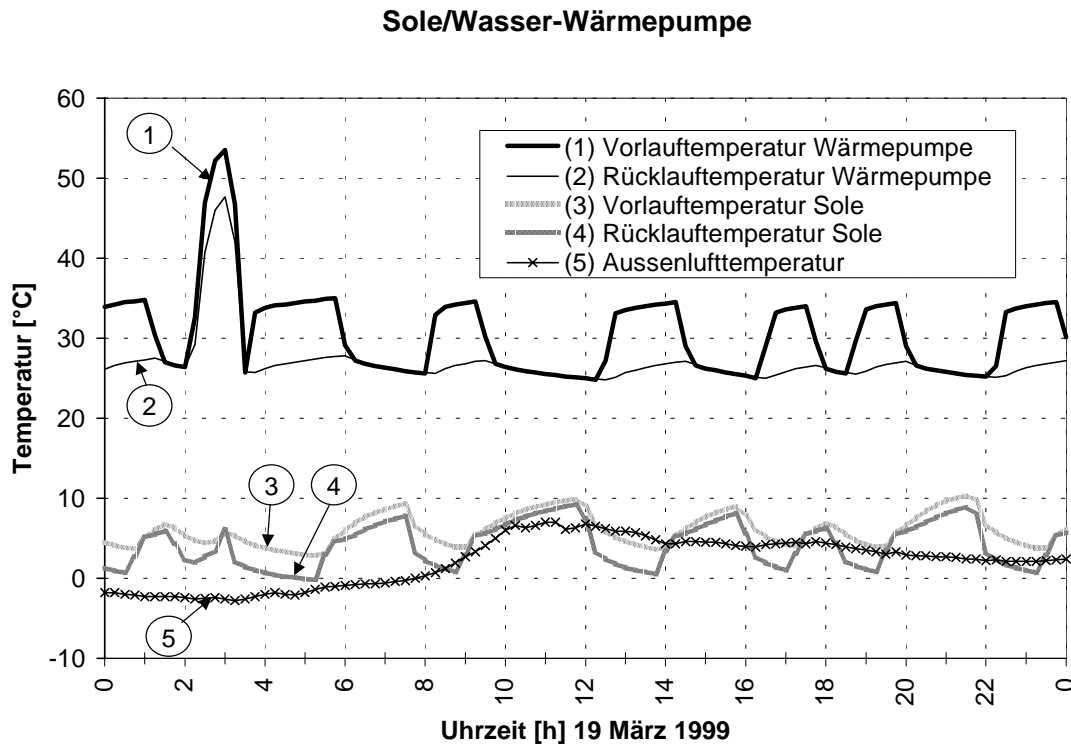


Abb. 4: Vor-/Rücklauftemperatur von Erdsonde (Soletemperatur) und Wärmepumpesowie Aussenlufttemperatur (19 März 1999)

Solepumpe

Gemäss Datenblatt des Herstellers (Smedegaard) liegt der Energiebedarf der Solepumpe (Typ Vario T-75) bei ca. 60 W. Bei einer Kontrollmessung wurde jedoch eine Leistungsaufnahme von 200 W gemessen. Nach Auskunft des Lieferanten beziehen sich die uns vorliegenden Kennlinien auf die 3-phasige Ausführung und nicht auf die in der Anlage eingesetzte einphasige Pumpe, welche einen deutlich höheren Leistungsbedarf aufweist. Da der Energieverbrauch der Solepumpe ca. 20% des Energiebedarfes der Wärmepumpe ausmacht wird die bestehende Pumpe durch eine neue (Biral M12) mit einer Aufnahmeleistung von ca. 100 W ausgetauscht.

2.2 Pilotanlage Schötz: Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-WP-Boiler

Abb. 5 zeigt das Energieflussdiagramm für die Messperiode vom 1. Februar 1999 bis 26. September 1999. Die Energieflüsse sind in MJ/m^2 angegeben.

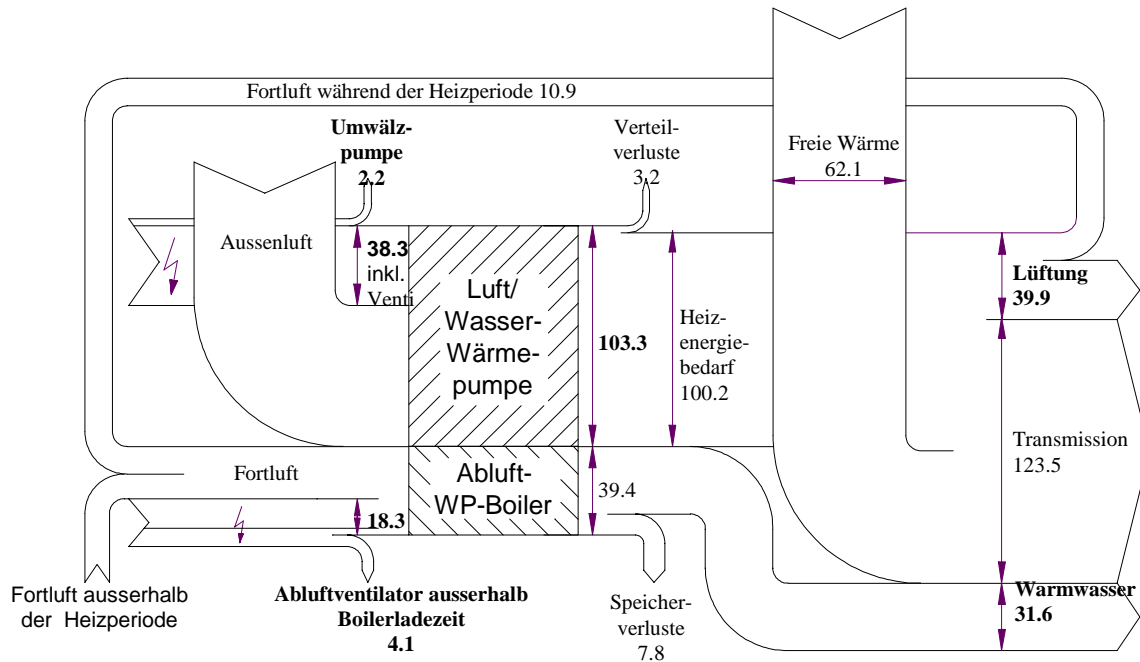


Abb. 5: Energieflussdiagramm Schötz: Werte in MJ/m^2 für eine achtmonatige Messperiode
(Anm.: **fett** = Messwert, **halbfett** = Abschätzung oder Berechnung)

2.2.1 Erkenntnisse / Verbesserungen

Boilerverluste

Die sehr grossen Verluste bei der Warmwasseraufbereitung sind unter anderem auf die schlechte Isolation des Abluft-WP-Boilers zurückzuführen. Ab Werk war der ganze Boden des Boilers und ein Schlitz von ca 6 cm Breite in der unteren Hälfte überhaupt nicht isoliert. Zu Beginn der neuen Heizperiode wurde der Boiler nachisoliert (siehe Abb. 6).



Abb. 6: links: Boiler ab Werk, Boden und ein Schlitz von ca. 6 cm Breite sind nicht isoliert; rechts: Der Boden und der Schlitz wurden nachträglich isoliert

Solarimeter

Nachträglich wurde in Schötz ein Solarimeter eingebaut. Es dient zur Verbesserung der Parameteridentifikation (Störgrösseneinfluss) und zur Erprobung neuer Regelkonzepte.

Temperaturfühler EG und Aussenluft

Der Temperaturfühler im EG wurde während der Wintermonate kurz vor Sonnenuntergang von der Sonne beschienen, was zu Fehlmessungen führte. Der betreffende Fühler wurde ersetzt. Der Temperaturfühler zur Erfassung der Aussenlufttemperatur (gleichzeitig Zulufttemperatur der WP) war im Ansaugschacht der WP montiert. Der starken Temperaturschwankungen lassen jedoch darauf schliessen, dass die Temperatur im Schacht nicht der effektiven Aussenlufttemperatur entspricht, sondern von der WP beeinflusst wird. Der Fühler wurde nun nachträglich auf eine Höhe von ca. 3 m ab Boden an der Nordwand befestigt.

2.3 Pilotanlage Fully: Haustechnikmodul HTM200 mit Grundlastmodul GLH

2.3.1 Stand der Messungen

Die Messanlage läuft seit dem 21. Dezember 1998. Die Auswertung der Messungen der Wintermonate (21. Dez. 1998 bis 18. April 1999) ist im Zwischenbericht veröffentlicht worden [NTH3 99]. Die Messwerte, die im Sommer registriert wurden, sind für den Heizbetrieb bedeutungslos, da nur Warmwasser mit dem HTM200 vorbereitet wurde.

2.3.2 Erkenntnisse

Wie im Energieflussdiagramm vom HTM200 (siehe Abb. 7) ersichtlich ist, wurden die Heizstäbe kaum in Betrieb genommen. Trotzdem ist die während der viermonatigen Messperiode gemessene Arbeitszahl der Wärmepumpe mit 2.25 relativ niedrig. Einer der Gründe liegt darin, dass das Erdregister ab Mitte März keine Wärme mehr geliefert hat (Aussenluft war wärmer als Erdreich). Bei kälteren Perioden stieg die Arbeitszahl auf bis zu 2.8 (z.B. Woche vom 8. bis zum 14. Februar).

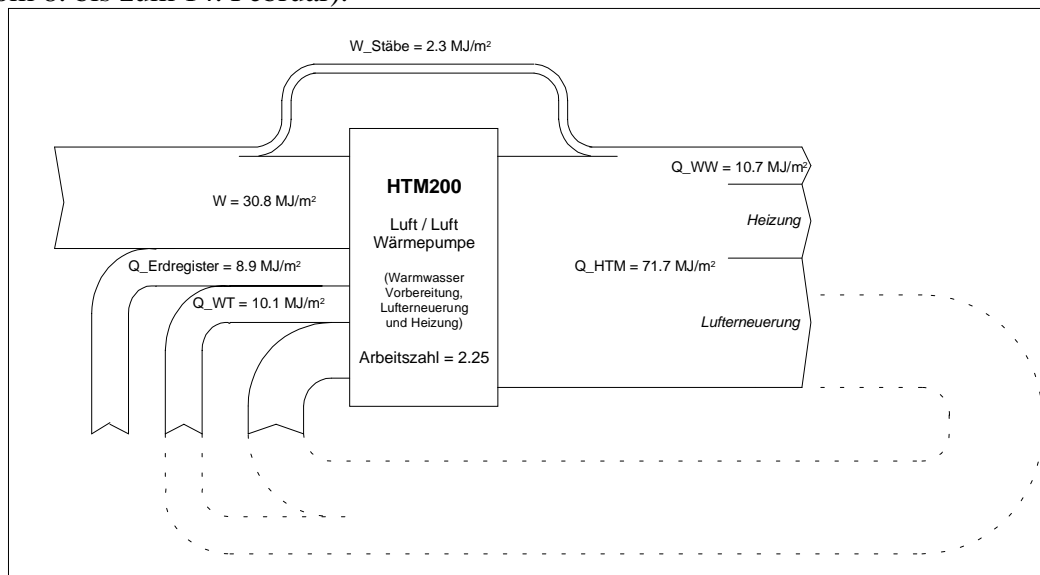


Abb. 7: Energieflussdiagramm des HTM200 für die Messperiode von Woche 52/98 bis 16/99 (W = Elektrizitätsverbrauch (Verdichter, Ventilatoren und Regelung); $W_{\text{Stäbe}}$ = Elektrizitätsverbrauch der Heizstäbe für Warmwasser und Luft-Nacherwärmung; $Q_{\text{Erdregister}}$ = Wärme, die aus dem Erdregister entzogen wurde; Q_{WT} = Wärme, die aus dem Wärmetauscher zurückgewonnen wurde; Q_{WW} = Energiebedarf Warmwasser; Q_{HTM} = Gesamtwärme, die durch das HTM200 geliefert wurde)

Die Innentemperatur war im Erdgeschoss (Wohngeschoss) immer über 20 °C, obwohl das GLH-Modul defekt war und über der Messperiode nur 17 % der gesamten Heizwärme geliefert hat. Das Obergeschoss war aber deutlich zu kalt (oft nur 17 °C). Dies zeigt klar, dass das HTM200 allein nicht ausreichte, ein Haus dieser Grösse zu beheizen und gleichzeitig Warmwasser zu produzieren.

Der Luftwechsel ist mit ca. 180 m³/h ausreichend. Dies zeigte sich auch bei der CO₂-Konzentration der Innenluft, die während der meisten Zeit unterhalb 1000 ppm blieb. Wegen der durch die Lüftungsanlage verursachten Entfeuchtung blieb die Innenluft aber eher trocken. Die Messwerte der relativen Feuchte liegen im Bereich von 30 %.

2.3.3 Verbesserungen

Ausgehend von den Erfahrungen der ersten Messperiode sollen die folgenden Änderungen vorgesehen werden :

- Das installierte GLH-Modul (direktkondensierende Wärmepumpe) verhielt sich bezüglich der Energieeffizienz ähnlich wie eine Elektrodirektheizung und wurde deshalb im Juli 99 ausgewechselt. Es zeigt sich aber, dass der im Fussboden eingebettete Kondensator zu klein dimensioniert ist. Daraus ergeben sich hohe Kondensationstemperaturen und eine ungenügend Wärmeabgabe. Es ist daher geplant, ein hydraulisches Wärmeverteilsystem mit Wandheizung oder Heizwänden zu installieren. Die produzierte Wärme kann dann über einen Wärmezähler einfach gemessen werden.
- Das in Fully installierte Haustechnikmodul HTM200 hatte u.a. den Nachteil, dass Warmwasser- und Luftheizung über eine Serienschaltung von zwei Heizregistern erfolgte. Deswegen wurde es im Laufe des Monats Oktober durch ein neues Modell ersetzt, das die folgende Verbesserungen aufweist:
 - Warmwasseraufbereitung mit Hilfe eines separaten Wärmetauschers (sog. MAGRO-Schaltung), der nur während der Nachtstunden in Betrieb ist.
 - Effizientere Wärmerückgewinnung.
 - Stärkere Ventilatoren mit höherem Fördervolumen im Heizbetrieb und reduziertem Fördervolumen beim reinen Luftwechselbetrieb (ohne WRG).

2.3.4 Stand der Umrüstung

Bezüglich der Wärmeverteilung über das GLH-Modul haben sich Hausbesitzer und Installationsfirma noch nicht entschieden, ob Wandheizungen installiert werden oder nur ein zusätzlicher direktkondensierender Radiator eingebaut wird. Die ARGE NTH3 und der Hausbesitzer würden stark zur Wandheizung tendieren. Diesbezügliche Offerten werden derzeit eingeholt. Das HTM200-Gerät wurde bereits gewechselt. Beim neuen Modell muss der einphasige Elektrizitätszähler gegen einen dreiphasigen ausgetauscht und es müssen noch zwei Heizstäbe für die Luftnachheizung an den Zähler angeschlossen werden.

3 AUSBLICK UND PERSPEKTIVEN FÜR 2000

3.1 Beobachterbasierter robuster Regler

Ein mittels H_∞ entworfener linearer Regler berechnet die aktuell benötigte Heizleistung. Diese wird unter Verwendung des vom Hersteller der Wärmepumpe zur Verfügung gestellten Leistungskennfeldes in das entsprechende Laufzeitverhältnis umgerechnet. Mittels Pulsbreitenmodulation wird die Wärmepumpe während der benötigten Laufzeit (Anteil Periodendauer) eingeschaltet. EW-Sperrzeiten werden dabei durch gezielte Anpassung der Periodendauer umgangen. Dieser Regler ist im Schlussbericht zur Phase 2 detailliert beschrieben [NTH2 98].

3.2 Wärmebedarfssteuerung

Einmal täglich werden Laufzeitfenster aufgrund der Sperrzeiten und der gemittelten Aussentemperatur der letzten 24 Stunden bestimmt. Die Berechnung des für einen Tag benötigten Wärmeenergiebedarfes wird aufgrund der gemittelten Aussentemperatur laufend aktualisiert. Die zur Deckung dieses Wärmeenergiebedarfes notwendigen Wärmepakete werden proportional zur Länge der Laufzeitfenster aufgeteilt. Die Wärmepumpe wird jeweils zu Beginn eines Laufzeitfensters eingeschaltet. Der Ausschaltzeitpunkt wird aufgrund des aktuellen Wärmeenergiebedarfes laufend nachgeführt. Dieser Regler ist im Schlussbericht Phase 1 des BFE-Projektes "Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen" beschrieben [PWM 99].

3.3 Wärmebedarfsoptimierte Regelung

Unter Annahme eines prognostizierten Aussentemperaturverlaufes wird kontinuierlich ein optimaler Heizleistungsverlauf berechnet. Die Optimierung wird mit einem Prognosehorizont von 24 Stunden durchgeführt; für die Verteilung der Wärmepakete wird nur der Heizleistungsverlauf bis zur nächsten Sperrzeit weiterverarbeitet. Jeweils am Ende jeder Sperrzeit werden aufgrund der aktuellen Aussentemperatur und der Tarifstruktur Laufzeitfenster bestimmt. Für jedes Wärmepaket innerhalb des jeweiligen Laufzeitfensters wird der Ein- und Ausschaltzeitpunkt kontinuierlich optimiert.

4 PUBLIKATIONEN 1999

- [Afjei 99a] Th. Afjei: *Wohnungslüftung in der Schweiz - Trends und Marktchancen*, Fachtagung "Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung - Neue Anwendungsfelder durch die zukünftige Energieeinsparverordnung", HEA / VEW Energie AG / VEW EUROtest GmbH, 8./9.11.99, Dortmund, DE (Vortrag)
- [Afjei 99b] Th. Afjei: *Der Wandel in der Haustechnik*, Bulletin SEV/VSE 24/99, Zürich, CH (5 Seiten).
- [Bonvin 99] M. Bonvin: *HTM200 - un exemple de technique intégrée*, Vortrag im Rahmen der Veranstaltung "Le standard Minergie", Sion, 9./23.03.99, CH.
- [Ginsburg 99] S. Ginsburg: *Hierarchische Wärmepumpenregelung mit Fuzzy Control und Robust Control*, Dissertation ETH #13365, 1999, CH.
- [NTH2 98] Th. Afjei et al.: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2*, Schlussbericht zum Schlussbericht BFE-Projekt 60242, Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung Zürich, CH (150 Seiten).
- [NTH3 99] Th. Afjei et al.: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3: Messungen an drei Funktionsmustern, Benutzereinfluss, Vergleich verschiedener Heiz- und Regelkonzepte*, Zwischenbericht BFE-Projekt 66760, Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung Zürich, CH (34 Seiten).
- [PentIAQ 99] PentIAQ: *Ventilation measurements in two single family houses, Passive tracer gas technique used in Grafstal and Schötz, Part Report 1*, Auftrag von HTA Luzern an Pentiaq AB, P.O. Box 7, SE-801 02 Gävle, SE (16 Seiten).
- [PWM 99] H.R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen*, Schlussbericht Phase 1, Diessenhofen, CH (35 Seiten).