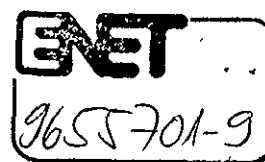


Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)



Kostengünstige Niedrig- temperaturheizung mit Wärmepumpe

**Phase 3: Messungen an drei Funktionsmustern, Benut-
zereinfluss, Vergleich verschiedener Heiz- und Regel-
konzepte**

ausgearbeitet durch

Dr.Th.Afjei
Prof.W.Betschart
Prof.M.Bonvin
Prof.Dr.H.P.Geering
S.Ginsburg
P.Keller
Dr.E.Shafai
D.Wittwer
Prof.G.Zweifel

INFEL (Projektleitung) afjei@infel.ch
HTA Luzern
EIV
IMRT-ETHZ
IMRT-ETHZ
HTA Luzern
IMRT-ETHZ
INFEL
HTA Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

August 1999

Zwischenbericht

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)	
	Prof. Dr. M. Zogg	Projektbegleiter
	Leiter Forschungsprogramm UAW	
	Kirchstutz 3	Email:
	3414 Oberburg	martin.zogg@bluewin.ch
Beauftragter:	Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung	
	Dr. Th. Afjei	Projektleiter
	D. Wittwer	stv. Projektleiter
	INFEL	
	Lagerstrasse 1, Postfach	Email:
	8021 Zürich	afjei@infel.ch
Projektgruppe:	Ingenieurschule Wallis EIV	Messungen an Pilotanlage 3
	Route du Rawil 47	Email:
	1950 Sion 2	michel.bonvin@eiv.vsnet.ch
	ETH-Zürich	Regler
	Institut für Mess.- und Regeltechnik	
	Prof. Dr. H.P. Geering	
	Dr. E. Shafai, S. Ginsburg	Email:
	ETH-Zentrum, ML K39	ginsburg@imrt.mavt.ethz.ch
	8092 Zürich	
	Hochschule für Technik und Architektur	Messungen an Pilotanlagen 1 und 2
	Fachhochschule Zentralschweiz	
	Prof. W. Betschart, Prof. G. Zweifel	
	P. Keller	
	Abteilung HLK	Email:
	6048 Horw	wbetschart@ztl.ch
	Pentiaq AB	Passiv-Tracergas-Messung
	CarlAxel Boman	
	P.O. Box 7	
	S-801 02 Gävle	

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

Zusammenfassung

Während der Heizperiode 98/99 wurden für die Phase 3 des Projekts „Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe“ drei Pilotanlagen in Niedrigenergiehäusern installiert.

1. Erdwärmesonden-Wärmepumpe mit Beistellboiler in Grafstal (Kt. ZH)
2. Luft-Wasser-Wärmepumpe und separate Abluft-Warmwasser-Wärmepumpe in Schötz (Kt. LU)
3. Luft-Luft-Wärmepumpe („Haustechnikmodul“) mit Luft-Erdregister zum Heizen und zur Warmwassererzeugung in Fully (Kt. VS)

Bei der Anlage in Grafstal wurde eine gleichstrombetriebene Umwälzpumpe mit Synchronmotor verwendet, welche im Rahmen des BFE-Projekt „Felderprobung einer Stromspar-Kleinumwälzpumpe“ ausgewertet wird.

Nach anfänglichen Problemen mit der Gleichstrom-Umwälzpumpe läuft die Anlage in Grafstal nun problemlos. Unter Berücksichtigung aller Hilfsaggregate wurde im letzten Winter mit kalter Witterung eine Jahresarbeitszahl von 3.6, ohne Sole- & Umwälzpumpe 4.6 erreicht. Die meiste Zeit der Messperiode wurde eine konventionelle Nassläufer-Kleinumwälzpumpe eingesetzt. Berücksichtigt man noch die Bereitschaftsverluste des Warmwasserspeichers ergibt sich für den WW-Betrieb eine Arbeitszahl von 2.8, eine beachtliche Steigerung gegenüber einem Elektroboiler, der je nach Warmwasserbezug einen Nutzungsgrad von 0.6 bis 0.7 aufweist. Dennoch ist eine Temperaturabnahme von 12 K pro Tag zu hoch. Durch zusätzliche Isolationsmassnahmen an Speicher, Armaturen und Leitungen könnten die Verluste vermindert werden. Auch die Raumluftqualität (CO₂-Gehalt) lag trotz des einfachen Lüftungskonzepts mit einem zeitgesteuerten Abluftventilator im Bad die meiste Zeit unter 1500 ppm, was akzeptabel ist.

In Schötz konnte nach Abstellen zweier Heizkreise die Temperaturverteilung im Haus so eingestellt werden, dass die Temperaturen im Obergeschoss, wie von den Bauherren gewünscht, um einige Grad tiefer liegt. Ein grundsätzliches Problem aller Niedrigenergiehäuser ist der Umstand, dass sie bei Auslegung nach SIA 384/2 durch Auftriebseffekte in den oberen Geschossen wärmer sind. Da dies meist nicht erwünscht ist, sollte diesem Umstand in einer neuen SIA-Norm Rechnung getragen werden. Der durch die Abluft-Wärmepumpe gewährleistete gleichmässige Luftwechsel zeigt deutlich seine Wirkung; Der CO₂-Gehalt liegt normalerweise bei rund 800 ppm. Die Arbeitszahl liegt allerdings nur bei 1.5 (inklusive Bereitschaftsverluste). Eine unzureichende Isolation des 200 l-Speichers, eine durch Absaugen im Trocknungsraum tiefe Quelltemperatur und der 24-Stundenbetrieb der Ventilatoren, welche auch bei Stillstand der WW-Wärmepumpe weiterlaufen, zeigen hier ihre Wirkung. Die WW-Wärmepumpe alleine erreicht eine Arbeitszahl von 2.6. Die Heizwärmepumpe erreichte eine Arbeitszahl von 2.8 mit bzw. 2.9 ohne Hilfsaggregate. Die erforderliche Vorlauftemperatur des Heizsystems von max. 30°C wurde meist überschritten, weil die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur der monovalent ausgelegten Wärmepumpe 5 bis 10 K betrug, obwohl nur 2 bis 5 K erforderlich wären. Zur Reduktion müsste man den Massenstrom der Heizumwälzpumpe so hochfahren, dass deren Energieverbrauch übermässig ansteigen würde, wodurch der Gewinn im COP der Wärmepumpe schnell aufgehoben wäre.

Die letzten Wochen wurde in Schötz ein modellbasierter Regler eingesetzt, der nach Anpassung der Parameter problemlos funktionierte. Im Gegensatz zum Zweipunktregler arbeitet er nicht mit Sollwerten der Rücklauftemperatur, sondern verwendet ein Pulsweitenmodulationsverfahren, wo aus verschiedenen Messgrössen der aktuelle Energiebedarf ermittelt wird, mit dem die Lauf- und Stillstandszeiten der Wärmepumpe für jedes 4-Stundenintervall neu berechnet werden. Dieses Verfahren bietet auch im Hinblick eines Sperrzeiten-Managements interessante Optionen, was Gegenstand der Untersuchungen in der nächsten Heizperiode ist.

Die dritte Anlage in Fully funktionierte ebenfalls zufriedenstellend. Die Luft-Luft-Wärmepumpe erreichte einen mittleren COP von 2.0. Mit der Vorwärmung durch das Lufterdregister und die Rückwärmung durch den Wärmetauscher ergibt sich je nach Klimabedingungen eine Wochen-Arbeitszahl von bis zu 2.8, die Jahres-Arbeitszahl liegt bei ca. 2.3. Der Nutzungsgrad, in dem die

Heizstäbe ebenfalls berücksichtigt sind, unterscheidet sich kaum von der Jahresarbeitszahl, da selten elektrisch geheizt wurde. Insgesamt war jedoch festzustellen, dass das HTM200 für das Haus in Fully zu klein dimensioniert war. Auch die bis zu fünfzehn Enteisungsvorgänge pro Woche wirkten sich negativ auf die JAZ aus. Die Warmwassererzeugung funktionierte einwandfrei und der mittlere CO₂-Gehalt von rund 800 ppm zeigte, dass die Wohnungslüftung ebenfalls einwandfrei lief. In unbenutzten Räumen unterschritt die relative Luftfeuchtigkeit 30%, was für einen angemessenen Wohnkomfort zu niedrig ist. Menschen und Pflanzen könnten hier leicht Abhilfe schaffen.

Das separate Grundlastmodul mit Direktkondensation funktionierte nicht zufriedenstellend. Die thermische Leistung hat sich fortlaufend verschlechtert und der mittlere Nutzungsgrad von 1.1 legt den Schluss nahe, dass ein Großteil des Kältemittels entwichen ist (Anm.: Es wurde zwischenzeitlich ersetzt).

Inhaltsverzeichnis

1	ZIELSETZUNG.....	1
2	DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN	2
2.1	MESSUNGEN	2
2.1.1	Messgrößen, Messprinzip	2
2.1.2	Aussenluftwechsel	2
2.1.3	Messperiode und Messprogramm.....	3
2.2	EINBAU UND FUNKTION DES H ₀ -REGLERS.....	3
2.2.1	Reglerentwurf.....	4
2.2.2	Reglereinbau.....	7
2.3	PILOTANLAGE 1: GRAFSTAL	8
2.4	PILOTANLAGE 2: SCHÖTZ.....	11
2.5	PILOTANLAGE 3: FULLY.....	14
2.5.1	Das Haus	14
2.5.2	Die Haustechnik.....	15
2.5.3	Die Messanlage	16
2.5.4	Probleme bei der Messanlage	17
2.5.5	Probleme bei der Heizanlage.....	18
3	GEWONNENE ERKENNTNISSE	19
3.1	ERGEBNISSE GRAFSTAL.....	19
3.1.1	Energieflussdiagramm	19
3.1.2	Arbeitszahlen	20
3.1.3	Komfort.....	20
3.1.4	Luftqualität und Tracergasmessungen.....	21
	Tracergasmessung.....	21
	Raumluftqualität.....	21
3.1.5	Regelung Heizanlage	22
3.1.6	Warmwasser	23
3.2	ERGEBNISSE SCHÖTZ	24
3.2.1	Arbeitszahlen	24
3.2.2	Komfort.....	25
3.2.3	Luftqualität und Tracergasmessungen.....	25
3.2.4	Regelung Heizanlage	26
3.2.5	Warmwasser	27
3.2.6	Regelung Heizanlage	28
3.3	ERGEBNISSE FULLY	29
3.3.1	Überblick der gemessenen Größen.....	29
3.3.2	Energieflussdiagramm vom HTM200.....	31
3.3.3	Thermischer Komfort.....	31
3.3.4	Regelung Heizanlage	33
3.3.5	Warmwasser	33
3.3.6	Luftqualität.....	33
4	WEITERE UNTERSUCHUNGEN	34
4.1	WEITERE UNTERSUCHUNGEN SCHÖTZ.....	34
4.2	WEITERE UNTERSUCHUNGEN FULLY.....	34

1 ZIELSETZUNG

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 ESV2000 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 nur Energiekennzahlen vorgeschrieben werden, ist die Frage, wie die erforderliche Wärme am optimalsten 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.

In den ersten beiden Projektphasen wurden die Machbarkeit und Fehlerquellen mithilfe umfangreicher Simulationsrechnungen und Testanlagenmessungen untersucht. Um diese auch bei von der Planung abweichendem Benutzerverhalten unter realen Witterungsbedingungen zu verifizieren, sind Messungen an 3 Funktionsmustern geplant. Als Anlagenkonzepte kommen die Varianten "Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellboiler" und "Luft/Wasser-Wärmepumpe mit separatem Abluftwärmepumpenboiler" zur Anwendung. Ein 3. Funktionsmuster wird in Zusammenarbeit mit der Kant. Energiefachstelle Wallis und der Ingenieurschule in Sion realisiert. Dabei handelt es sich um eine reine Luftheizung mit WRG. Dies hat den Vorteil, dass die Konzepte Wärmeverteilung mit Fussbodenheizung und Warmluftheizung miteinander verglichen werden können.

Mit den drei Anlagen sollen Wissenslücken über **Heizkonzepte** und die **Regelbarkeit** von **Niedrigenergiehäusern** geschlossen werden. Von besonderem Interesse sind die Einflüsse des Benutzerverhaltens und der mechanischen Wohnungslüftung auf den nach SIA berechneten Wärmeleistungs- bzw. Heizenergiebedarf. Die daraus resultierenden verallgemeinerbaren Aussagen werden in einem technischen Handbuch, Teil der Phase 4a, niedergelegt. Zusätzlich wird im Auftrag der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz ein Marketinghandbuch erstellt (Phase 4b).

2 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

2.1 Messungen

2.1.1 Messgrößen, Messprinzip

Folgende Größen sind erfasst worden:

- tatsächlicher Wärmebedarf Heizung und Warmwasser
- Klima (Heizgradtage)
- Raumlufttemperaturen und Raumluftfeuchte
- Vor-/Rücklauftemperaturen bzw. Zu-/Ablufttemperatur der Wärmepumpe
- Warmwassertemperatur und -menge
- Energieverbrauch Wärmepumpen und Hilfsaggregate
- Jahresarbeitszahl
- Raumluftqualität
- Aussenluftwechsel

Messgrößen	Messprinzip
Wärmebedarf Heizung und Warmwasser	Wärmezähler
Temperaturen	PT100- Fühler
Energieverbrauch Wärmepumpen	Wärmezähler
Energieverbrauch Hilfsaggregate	Laufzeiten mit Spannungssignal (5V=Ein, 0V=Aus) multipliziert mit Leistung der Hilfsaggregate
Raumluftqualität	CO ₂ -Fühler
Aussenluftwechsel	Passiv-Tracergas-Messung

Tab. 1: Messgrößen und Messprinzip

2.1.2 Aussenluftwechsel

Zur Bestimmung des Aussenluftwechsels wird die Methode der Passiv-Tracergas-Messung angewendet. Diese Methode erlaubt die Messung der Luftströme zwischen verschiedenen Räumen, Gebäudebereichen (Zonen) und der Aussenluft. Hieraus wird der Mittelwert über einen längeren Zeitraum gebildet. Mit dem Verfahren können keine Momentanwerte bestimmt werden.

Die Messung geschieht folgendermassen: Kleine Gasquellen, welche ein Spurengas mit konstantem Volumenstrom emittieren, werden in den zu untersuchenden Zonen verteilt. Mit entsprechend verteilten Absorptionselementen (sog. „Sampler“) wird die an der jeweiligen Messstelle über den entsprechenden Zeitraum aufgenommene Gasmenge gemessen. Je nach Situation ist die Definition mehrerer Zonen und der Einsatz von entsprechend unterschiedlichen Spurengasen notwendig: In der interessierenden Zone kann das extern eingeströmte Luftvolumen durch Vergleich der emittierten und der absorbierten Gasmenge bestimmt werden.

Diese Methode wird europaweit von zwei bis drei Institutionen als Dienstleistung angeboten. In diesem Projekt wird mit der aus dem schwedischen „House and Building Research Institute“ entstandenen „PentIAQ AB“ in Gävle zusammengearbeitet. Von der „PentIAQ AB“ werden folgende Dienstleistungen erbracht:

- Ausarbeiten der Messkonzepte aufgrund der Grundrisspläne
- Lieferung der Gasquellen und Absorptionselemente
- Positionierung dieser Elemente
- Analyse und Auswertung zur Bestimmung der jeweiligen Luftwechselraten

Die Messungen erfolgen monatlich, d.h. die „Sampler“ werden monatlich ausgewechselt und ausgewertet.

2.1.3 Messperiode und Messprogramm

Der vorliegende Zwischenbericht zeigt die Auswertungen für die folgenden Messperioden:

Pilotanlage 1: Grafstal	Woche 49 / 98 bis Woche 13 / 99
Pilotanlage 2: Schötz	Woche 5 / 99 bis Woche 13 / 99

Sämtliche analogen Messsignale für Temperaturen, Feuchte, CO₂ sowie Laufzeiten werden in einem Intervall von 1 Minute elektronisch erfasst und nach jeweils 15 Minuten als Mittelwert im Datenlogger gespeichert. Die Wärme- und Energiezähler verfügen über Impulsausgänge. Der Datenlogger summiert die eingegangenen Impulse und speichert den Zählerstand alle 15 Minuten. Die Datenübermittlung vom Datenlogger zum PC erfolgt über einen ISDN-Anschluss mittels Modem und Telefon.

2.2 Einbau und Funktion des H_∞-Reglers

Nachdem der modellbasierte Regler in der vorhergehenden Phase in Simulationen eingesetzt wurde, soll ein Feldtest in dieser Phase die Tauglichkeit des neuen Regelkonzeptes in der Praxis zeigen. Die in Simulink implementierten Elemente des Reglers wurden dabei mit dem in der MATLAB-Umgebung vorhandenen Compiler in Maschinensprache übersetzt und auf eine Echtzeitplattform geladen werden. Diese wurde über I/O-Einschubkarten gemäss Abb. 1 mit der Heizungsanlage verbunden.

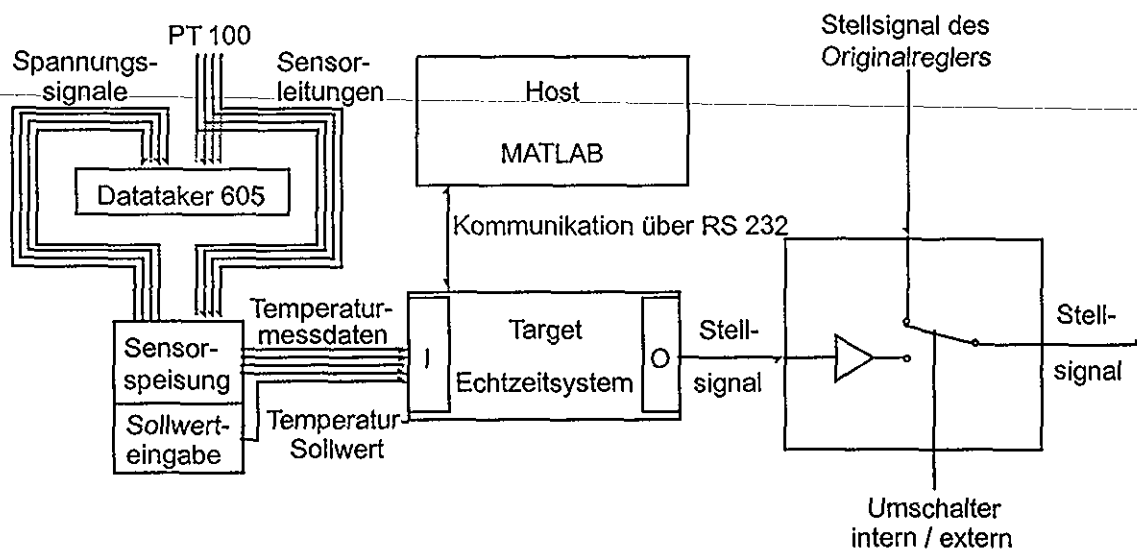


Abb. 1: Signalflussbild des implementierten Reglers

Die bereits für die Messkampagne eingesetzten Sensoren wurden zur besseren Interpretation der Resultate auch für die Regelung eingesetzt. Da das eingesetzte Messsystem "Datataker 605" die Speisung der Sensoren, die Messung der angelegten Spannung und die Digitalisierung des Messwertes in einer von aussen nicht trennbaren Einheit durchführt, konnten die Signale nicht direkt dem "Datataker 605" entnommen werden. Statt dessen wurde für die Sensoren vom Typ PT100, welche für Regelungszwecke verwendet wurden, eine separate Speisung und Auswertung neu installiert. Die Temperaturwerte werden dem Messsystem als Spannungssignal zugeführt. Zugleich wurde ein Drehpotentiometer

installiert, über das der Bewohner für die Regelung einen Temperatursollwert eingeben konnte. Das Echtzeitsystem ist in einem konventionellen PC eingebaut ("target"). Über eine RS232-Schnittstelle ist dieser mit einem zweiten PC ("host") verbunden. Auf dem "host"-Rechner läuft das Programmpaket MATLAB mit allen für die Reglerimplementation notwendigen Zusätzen. Die gesamte Struktur des Reglers mit allen Konfigurationsdaten der Ein- und Ausgangssignale ist in SIMULINK, der graphischen Oberfläche von MATLAB, programmiert. Durch den Befehl "externe Simulation" wird der Regler automatisch kompiliert und auf den "target"-Rechner geladen. Der Bildschirm des "target"-Rechners kann so konfiguriert werden, dass er aktuelle Messwerte zu Kontrollzwecken graphisch oder als Zahlenwert darstellt. Das Stellsignal wird verstärkt und über einen Wahlschalter auf die Wärmepumpe gegeben. Mit dem Wahlschalter kann zwischen dem wärmepumpeninternen und dem modellbasierten Regler umgeschaltet werden. Bei einer Störung oder Fehlfunktion des modellbasierten Reglers kann über den internen Regler die Wärmepumpe solange weiterbetrieben werden, bis die Störung behoben ist.

2.2.1 Reglerentwurf

Die in Schötz implementierte Reglerstruktur konnte unverändert von Phase 2 übernommen werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Reglerentwurfes sei auf den Schlussbericht der Phase 2 Kapitel 2.9.4 ff verwiesen. Neu ist hingegen das Gebäudemodell, das in diesem Kapitel beschrieben wird und anstelle der Resultate aus der TRNSYS-Simulation für den Entwurf des modellbasierten H_o -Reglers verwendet wird.

Dieses einfache Modell, das im Rahmen des BFE-Projektes „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen“ entwickelt wurde, beschreibt das wesentliche dynamische Verhalten des Gebäudes. Die Abb. 2 zeigt die Teilsysteme des Modells (Wärmeabgabe und Gebäude) und deren Ein- und Ausgangssignale.

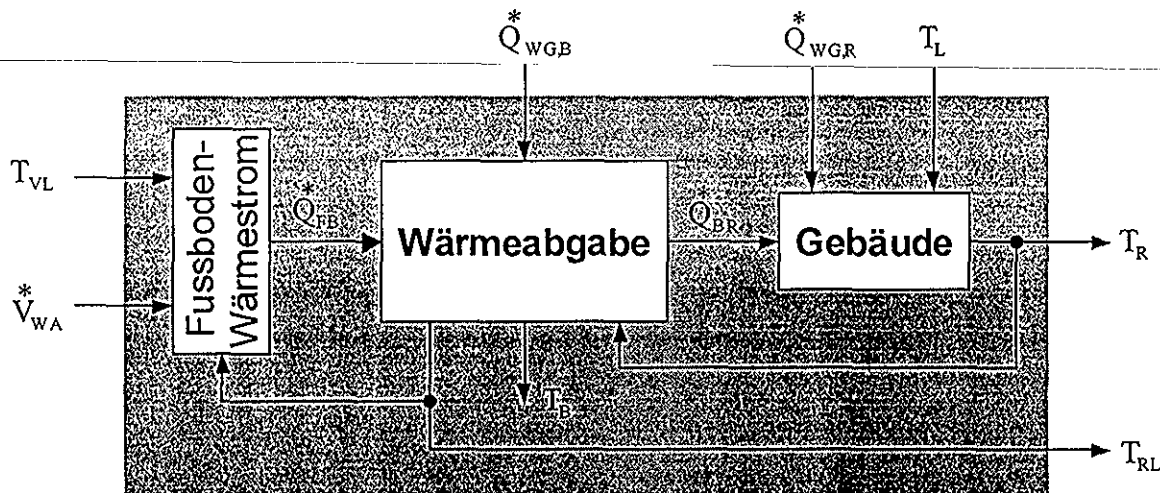


Abb. 2: Teilsysteme des Gebäudemodells

Das Teilsystem „Wärmeabgabesystem“ ist durch zwei Energiespeicher modelliert. Ein Energiespeicher ist das Heizungswasser in den Rohren mit der Rücklauftemperatur als Zustandsgrösse und der zweite Energiespeicher stellt der Fussboden mit der Bodentemperatur als Zustandsgrösse dar. Das Gebäude selber wird pauschal durch einen einzigen Energiespeicher mit der Referenzraumtemperatur als Zustandsgrösse modelliert. Für diese drei Energiespeicher können die folgenden drei Energiebilanzgleichungen aufgeschrieben werden:

$$\rho_W V_H c_W \cdot \dot{T}_{RL}(t) = \dot{Q}_{FB}(t) - \dot{Q}_{WB}(t)$$

$$m_B c_B \cdot \dot{T}_B(t) = \dot{Q}_{WG,B}(t) - \dot{Q}_{WB}(t) - \dot{Q}_{BR}(t)$$

$$\rho_G V_G c_G \cdot \dot{T}_R(t) = \dot{Q}_{WG,R}(t) - \dot{Q}_{BR}(t) - \dot{Q}_V(t).$$

Sie stellen drei gekoppelte Differentialgleichungen dar, die das dynamische Verhalten des Gebäudes beschreiben. Die Kopplungsterme bilden

- Der Wärmestrom des Wassers in den Boden $\dot{Q}_{WB}$
- Der Wärmestrom des Bodens in den Raum $\dot{Q}_{BR}$
- Der Verlustwärmestrom $\dot{Q}_V$.

Diese Wärmeströme werden jeweils durch einen linearen Ansatz beschrieben:

$$\dot{Q}_{WB}(t) = k_{WA} \cdot [T_{RL}(t) - T_B(t)]$$

$$\dot{Q}_{BR}(t) = k_B A_B \cdot [T_B(t) - T_R(t)]$$

$$\dot{Q}_V(t) = k_G \cdot [T_R(t) - T_L(t)].$$

Die Aussenlufttemperatur T_L stellt eine Störgrösse des Systems dar. Sie wird durch die Messung vollständig erfasst. Die Wärmegewinnströme in den Boden $\dot{Q}_{WGB}$ und in den Raum $\dot{Q}_{WGR}$ bilden weitere Störgrössen, die allerdings nicht vollständig erfasst werden können.

Die Enthalpiestromdifferenz des Heizungswassers

$$\dot{Q}_{FB}(t) = \rho_W c_W \dot{V}_{WA} \cdot [T_{VL}(t) - T_{RL}(t)]$$

stellt die Eingangsgrösse des Systems dar. Sie wird durch die Messung der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur (T_{VL}, T_{RL}) und des Volumenstroms der Fussbodenheizung $\dot{V}_{WA}$ bestimmt.

Die in diesem Modell eingeführten unbekannten Modellparameter werden durch Messungen der Ein- und Ausgangssignale des Gebäudemodells identifiziert. Dabei ist es auf Grund der Modellstruktur nicht möglich, die einzelnen physikalischen Parameter zu identifizieren, sondern nur die in Gruppen zusammengefassten Parameter (vgl. Tab. 2). Für die Identifikation wurde das „Maximum-Likelihood-Verfahren“ verwendet, das ein sog. Prädiktionsfehlerverfahren darstellt.

Für den Reglerentwurf wurden die identifizierten Modellparameter zugrundegelegt (vgl. Abb. 3), welche auf den Messdaten der Woche 5 im Jahr 1999 basieren. Die identifizierten Parameter sind in der Tab. 2 zusammengestellt. Die in dieser Tabelle angegebene Streuung bezieht sich auf einer entsprechenden Auswertung der Messdaten aus weiteren 8 Wochen (Wochen 52 und 53 im Jahr 1998 und Wochen 1 bis 6 im Jahr 1999).

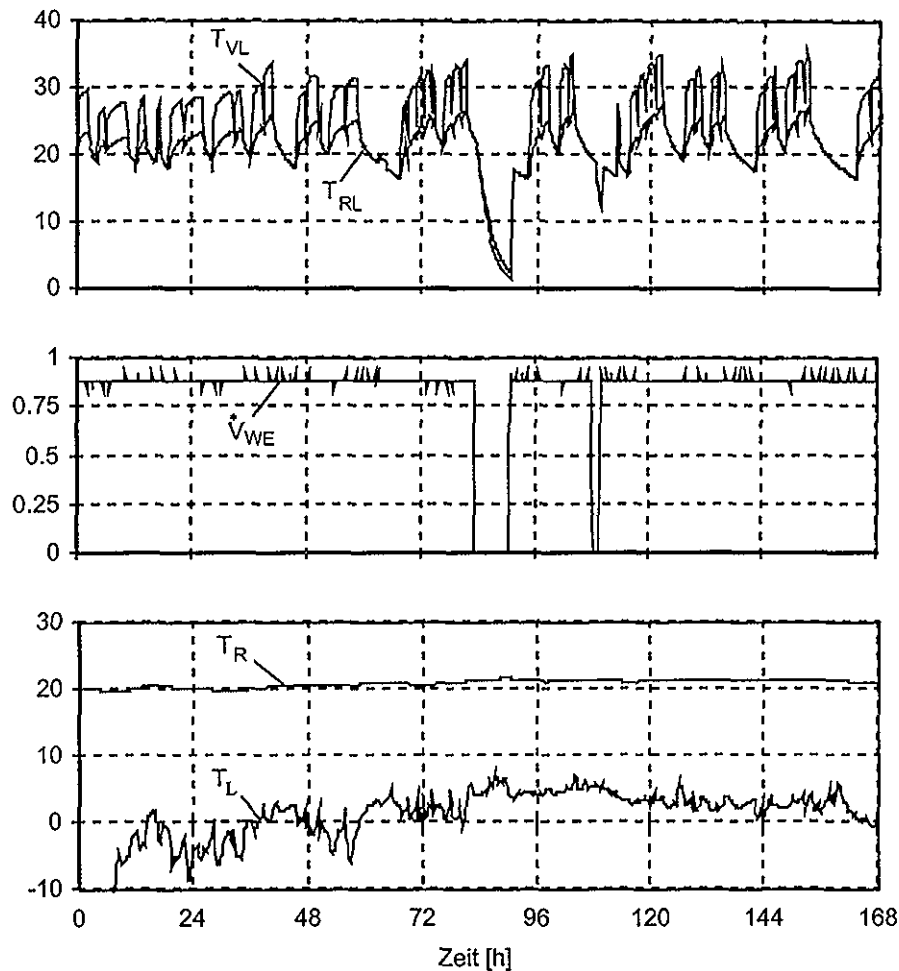


Abb. 3: Die für die Identifikation der Gebäudeparameter verwendeten Messungen (Woche 5/1999)

	V_H [m ³]	K_{WA} [W/K]	$m_B C_B$ [J/K]	$k_B A_B$ [W/K]	κ_G [W/K]	τ_G [h]
Woche 5 (1999)	0.6736	2679.0	1.656E+07	7586.2	126.2	115.3
Mittelwert	0.6768	3153.0	1.180E+07	707.5	140.1	95.4
Streuung	25%	13%	25%	14%	10%	19%

Tab. 2: Die identifizierten Parameter des Gebäudemodells für den Reglerentwurf

Die Genauigkeit der Parameterschätzung ist in der Abb. 4 durch die Abweichung zwischen den mit den geschätzten Parametern simulierten Verläufen der Rücklauf- und Referenzraumtemperatur und den entsprechenden Messungen angegeben. Die Genauigkeit ist kleiner als 1 K.

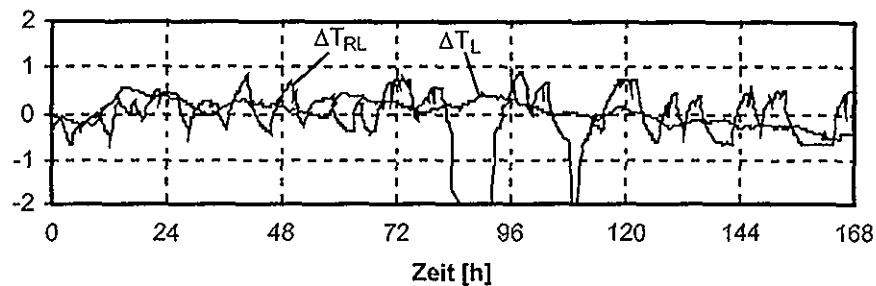


Abb. 4: Genauigkeit der Parameterschätzung (Abweichung zwischen Messung und Simulation)

Die grossen Abweichungen in der Rücklauf­temperatur sind nur während der Ab­stellzeit der Umwälz­pumpe festzustellen, die auf lokale Wärmeverluste durch schlechte Isolation der Rücklaufleitungen zu­rückzuführen sind.

2.2.2 Reglereinbau

Die gesamte Hardware wurde am 24. März 1999 im Heizungskeller in Schötz (LU) aufgebaut und in Betrieb gesetzt. Der an diesem Tag eingeschaltete Regler wurde am 27. März wieder deaktiviert, da die Folgeregelung auf den Sollwert zu langsam entworfen war. Ein Ersatzregler wurde durch Einlesen einer neuen Reglermatrix am 29. März gestartet. Mit diesem Regler lief die Wärmepumpe immer wieder in die Hochdruckstörung. Bei der Auswertung der Messdaten wurde festgestellt, dass der in der Wärmepumpe eingebaute Regler die Umwälzpumpe ein- und ausschalten konnte. Nachdem der Anschluss der Umwälzpumpe am 1. April direkt an das Stromnetz angeschlossen wurde, funktionierte der Regler einwandfrei und zur Zufriedenheit der Benutzer.

2.3 Pilotanlage 1: Grafstal

Analgekonzept:	Erdsondenwärmepumpe mit Beistellboiler
Standort:	8310 Grafstal
Höhe über Meer:	556 m
Energiebezugsfläche:	174 m ²
Heizenergiebedarf nach SIA 380/1:	224 MJ/m ² a

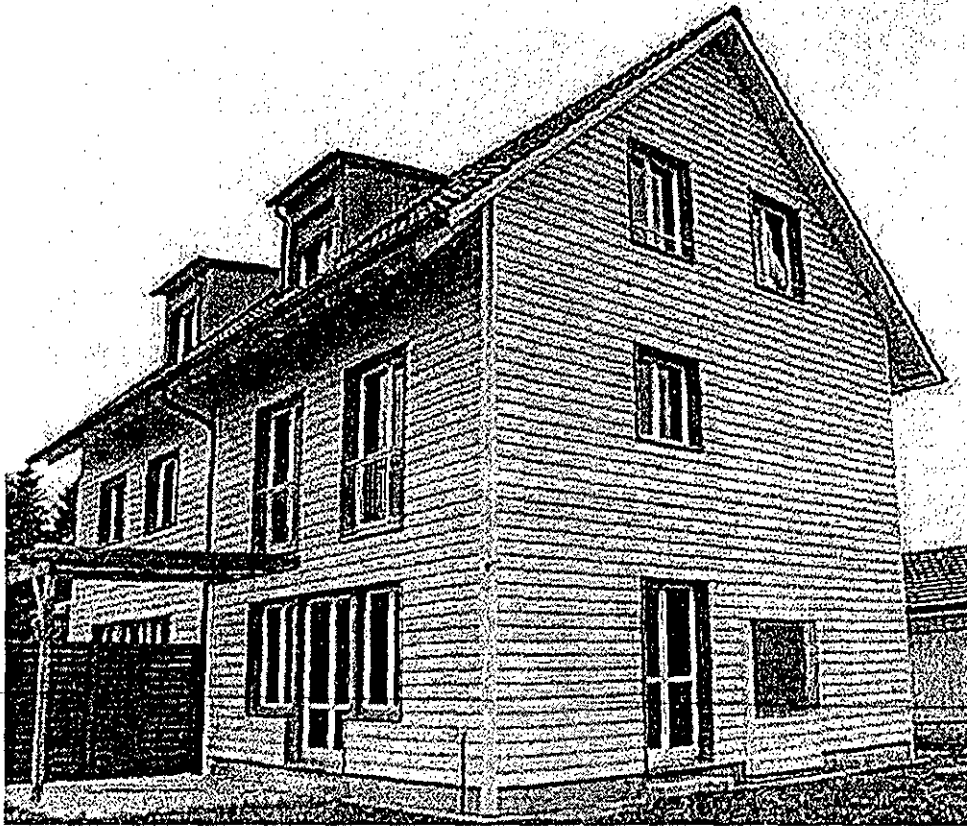


Abb. 5: Süd-Ost-Ansicht der Pilotanlage 1

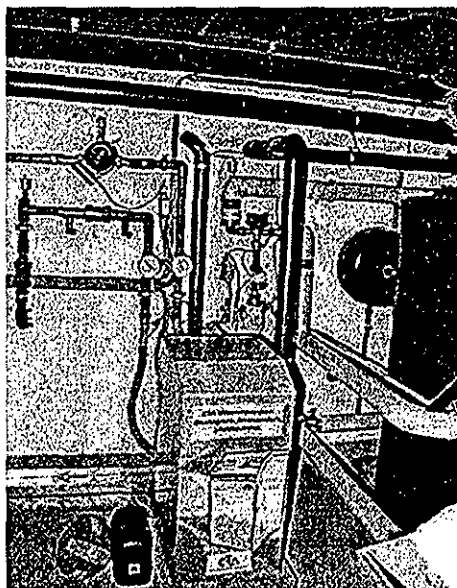


Abb. 6: Sole/Wasser-Wärmepumpe

Messkonzept

In Abb. 7 ist das vereinfachte Systemschema mit den wichtigsten Messstellen dargestellt.

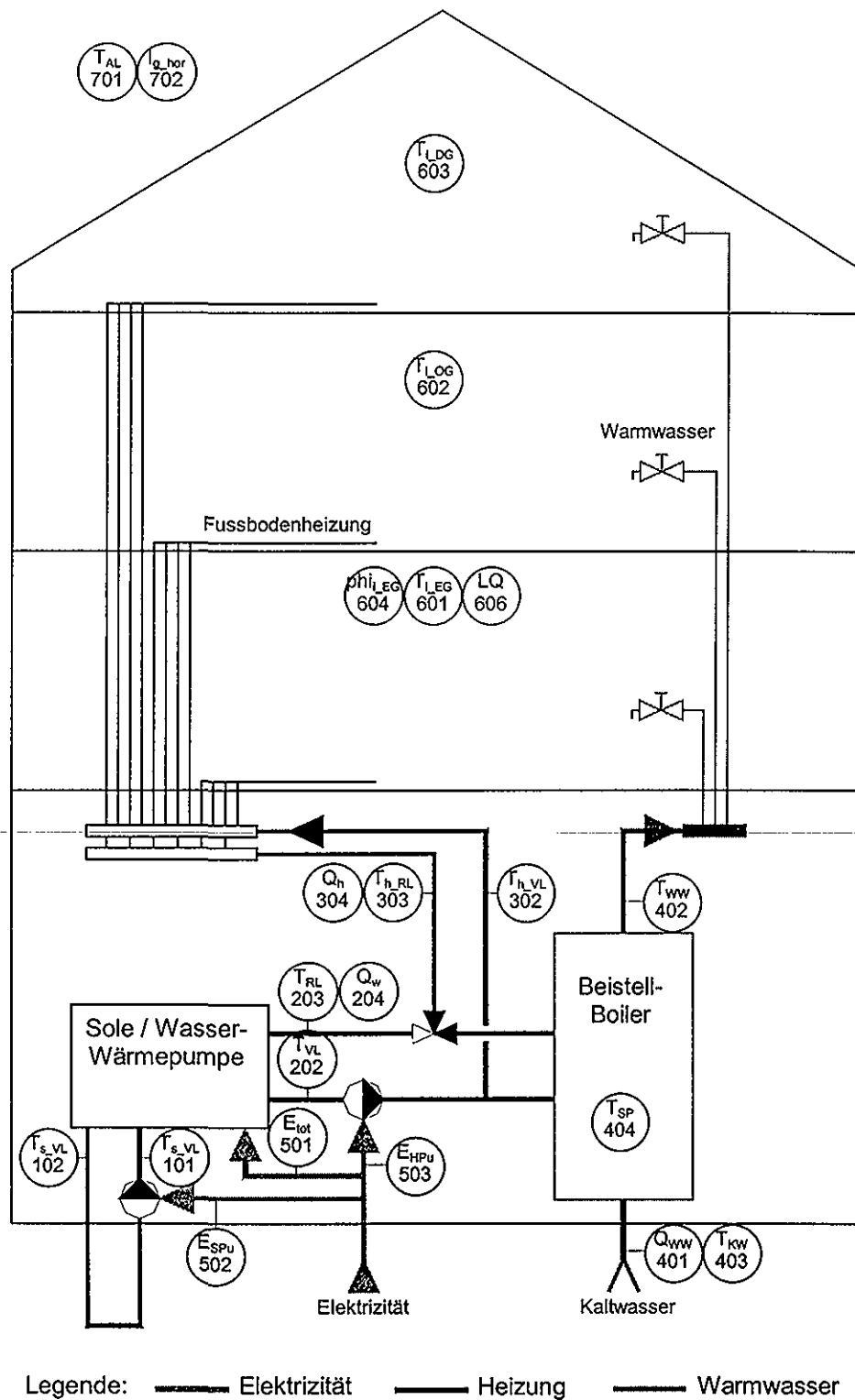


Abb. 7: Vereinfachtes Systemschema mit den wichtigsten Messgrößen

elektronisch erfasste Messgrößen

Pos.	Symbol	Einheit	Messgrösse
101	T_{s_VL}	°C	Vorlauftemperatur Sole
102	T_{s_RL}	°C	Rücklauftemperatur Sole
201	V_W	m³/h	Durchfluss Raumheizung und Warmwasser
202	T_{VL}	°C	Vorlauftemperatur Wärmepumpe (Raumheizung und Warmwasser)
203	T_{RL}	°C	Rücklauftemperatur Wärmepumpe (Raumheizung und Warmwasser)
204	Q_W	kWh	Energieverbrauch Raumheizung und Warmwasser
301	V_h	m³/h	Durchfluss Raumheizung
302	T_{h_VL}	°C	Vorlauftemperatur Raumheizung
303	T_{h_RL}	°C	Rücklauftemperatur Raumheizung
304	Q_h	kWh	Energieverbrauch Raumheizung
401	Q_{WW}	kWh	Energieverbrauch Warmwasser
402	T_{WW}	°C	Temperatur Warmwasser
403	T_{KW}	°C	Temperatur Kaltwasser
404	T_{SP1}	°C	Speichertemperatur unten
405	T_{SP2}	°C	Speichertemperatur oben
501	E_{tot}	kWh	Energieverbrauch WP und Hilfsaggregate
502	t_{Spu}	h	Laufzeit Solepumpe
503	t_{HPu}	h	Laufzeit Heizungspumpe
601	T_{I_EG}	°C	Raumlufttemperatur Erdgeschoss
602	T_{I_OG}	°C	Raumlufttemperatur Obergeschoss
603	T_{I_DG}	°C	Raumlufttemperatur Dachgeschoss
604	ϕ_{I_EG}	r.F	Feuchte Erdgeschoss
606	LQ	ppm	CO ₂
701	T_{AL}	°C	Aussenlufttemperatur
702	I_{g_hor}	W/m²	Globalstrahlung horizontal
801	Π_{WP}	-	Ein- bzw. Ausschaltungen Wärmepumpe

Tab. 3: Messgrößen, aufgezeichnet mit dem Datenlogger

Die Energieverbräuche der Sole- und der Heizungspumpe werden rechnerisch aus den Leistungen und den aufgezeichneten Laufzeiten bestimmt:

$$E = P \cdot t$$

mit E = Energieverbrauch

t = Laufzeit

P = Leistung

Die Leistungen wurden im Betriebszustand auf der Anlage gemessen. In Grafstal wurde auch der Prototyp MC10 der Fa. Biral eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine gleichstrombetriebene Umwälzpumpe mit Synchronmotor. Ihre Drehzahl kann stufenlos zwischen 1500 und 3600 U/min variiert werden und sie nimmt dabei eine elektrische Leistung von 5 bis 25 W auf. Derartige Umwälzpumpen haben einen doppelt so hohen Wirkungsgrad ($\eta \approx 30\%$) wie die üblicherweise eingesetzten Kleinumwälzpumpen, sog. Nassläufer, mit einem Wirkungsgrad zwischen 8 und 15%. Die Entwicklung erfolgte im Rahmen des BFE-Projekts „Felderprobung einer Stromspar-Kleinumwälzpumpe“.

Heizungspumpe:	
- Prototyp MC10 (1500 bis 3600 U/min)	5 – 25 W
- Nassläufer	
Stufe 1	23.5 W
Stufe 2	38.0 W
Solepumpe	200.0 W

Tab. 4: Leistungen Hilfsaggregate

2.4 Pilotanlage 2: Schötz

Analgekonzept:	Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-WP-Boiler
Standort:	6247 Schötz
Höhe über Meer:	508 m
Energiebezugsfläche:	154.5 m ²
Heizenergiebedarf nach SIA 380/1:	181 MJ/m ² a



Abb. 8: Süd-West-Ansicht der Pilotanlage 2

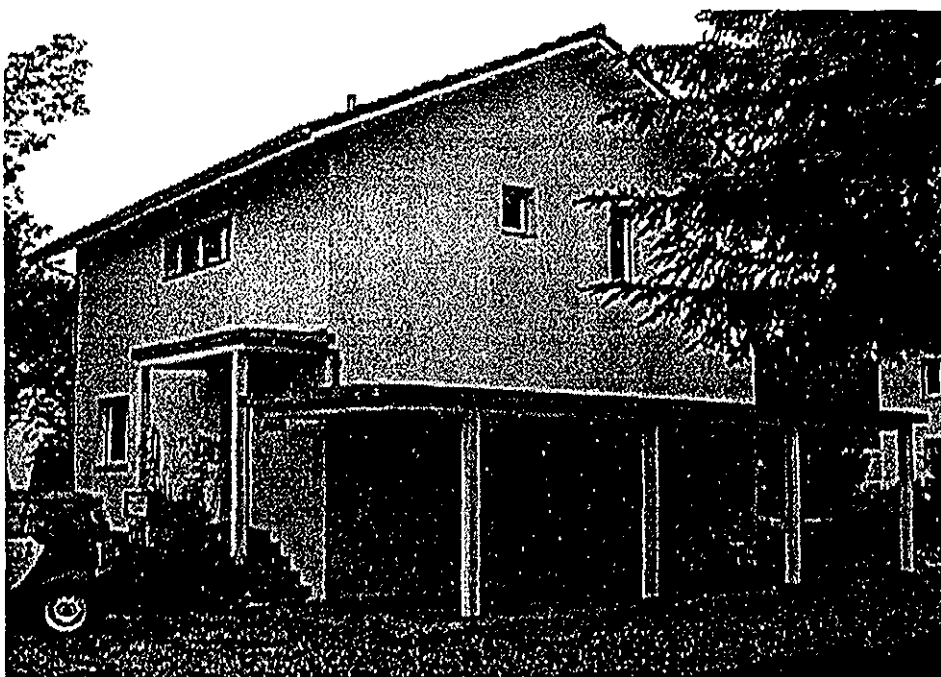
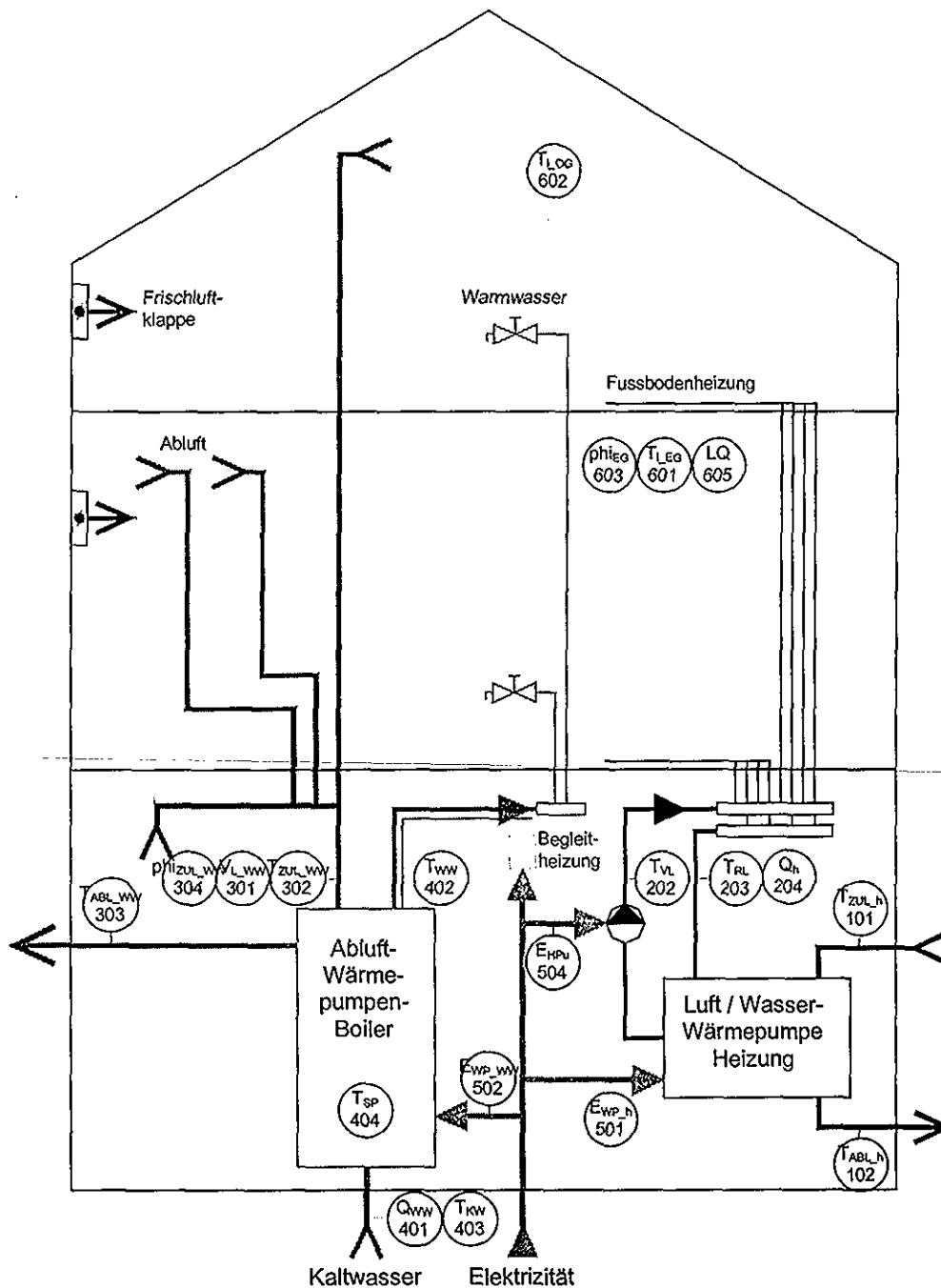


Abb. 9: Nord-Ost-Ansicht der Pilotanlage 2

Messkonzept

Abb. 10 zeigt das vereinfachte Systemschema mit den wichtigsten Messstellen. Auf Wunsch des Eigentümers wurde zusätzlich Luft aus dem unbeheizten Trockenraum gesogen, um den Trocknungsprozess der Wäsche zu beschleunigen.



Legende: — Lüftung — Warmwasser — Elektrizität — Heizung

Abb. 10: Vereinfachtes Systemschema mit den wichtigsten Messgrößen

elektronisch erfasste Messgrößen

Pos.	Symbol	Einheit	Messgrösse
101	T_{ZUL_h}	°C	Temperatur Eintrittsluft Wärmepumpe Raumheizung
102	T_{ABL_h}	°C	Temperatur Austrittsluft Wärmepumpe Raumheizung
201	V_h	m³/h	Durchfluss Raumheizung
202	T_{VL}	°C	Vorlauftemperatur Raumheizung
203	T_{RL}	°C	Rücklauftemperatur Raumheizung
204	Q_h	kWh	Energieverbrauch Raumheizung
301	V_{L_WW}	m³/h	Luftvolumenstrom Wärmepumpe Boiler
302	T_{ZUL_WW}	°C	Temperatur Eintrittsluft Wärmepumpe Boiler
303	T_{ABL_WW}	°C	Temperatur Austrittsluft Wärmepumpe Boiler
304	Φ_{iZUL_WW}	% r.F	Feuchte Zuluft Wärmepumpe Boiler
401	Q_{WW}	kWh	Energieverbrauch Warmwasser
402	T_{WW}	°C	Temperatur Warmwasser
403	T_{KW}	°C	Temperatur Kaltwasser
404	T_{SP1}	°C	Speichertemperatur unten
405	T_{SP2}	°C	Speichertemperatur oben
501	$E_{tot_WP_h}$	kWh	Energieverbrauch WP Heizung
502	$E_{tot_WP_WW}$	kWh	Energieverbrauch Wärmepumpe Boiler
503	t_{WP_WW}	h	Boiler-Ladezeit (Laufzeit WP-Warmwasser)
504	t_{HPU}	h	Laufzeit Heizungspumpe
601	T_{LEG}	°C	Raumlufttemperatur Erdgeschoss
602	T_{LOG}	°C	Raumlufttemperatur Obergeschoss
603	ϕ_{i_EG}	r.F	Feuchte Erdgeschoss
604	LW	-	Passiv Tracergasmessung
605	LQ	ppm	CO ₂
701	T_{AL}	°C	Temperatur Zuluft Wärmepumpe Heizung (101)
801	t_{WP}	h	Laufzeit Wärmepumpe

Tab. 5: Messgrößen, aufgezeichnet mit dem Datenlogger

Der Energieverbrauch der Heizungspumpe wird rechnerisch bestimmt:

Heizungspumpe

$$E_{HPU} = P_{HPU} \cdot t_{HPU}$$

mit E_{HPU} = Energieverbrauch Heizungspumpe

t_{HPU} = Laufzeit Heizungspumpe

P_{HPU} = Leistung Heizungspumpe

Die elektrische Aufnahmeleistung der konventionellen Heizungspumpe (Nassläufer) auf der Anlage „Schötz“ beträgt 64 W.

2.5 Pilotanlage 3: Fully

2.5.1 Das Haus

Lage	Fully /VS
Höhe	500 m.ü.M.
Heizgradtage	3237 K d/a
Mittlere Temp. während der Heiztage (20 / 12 °C)	4 °C
Anzahl Heiztage	202 d/a
Globalstrahlung während der Heiztage :	GH = 1654 MJ/m ² a GS = 1881 MJ/m ² a GE = 947 MJ/m ² a GW = 1018 MJ/m ² a GN = 473 MJ/m ² a

Tab. 6: Meteoangaben der Ortslage



Abb. 11: Das Haus in Fully : Süd-West-Ansicht

Bauweise	massiv mit Aussenisolation
Energiebezugsfläche	264 m ²
Beheiztes Volumen	525 m ³
Verglasungen	k = 1.07 W/m ² K, g = 0.42
Türe	k = 1.2 W/m ² K
Dach	k = 0.2 W/m ² K
Mauern	k = 0.19 W/m ² K
Gegen ungeheizte Räume	k = 0.3 W/m ² K

Tab. 7: Hausangaben

Wärmeverluste	166 MJ/m ² a
Gewinne	61 MJ/m ² a
Heizwärme	105 MJ/m ² a

Tab. 8: Heizwärme nach SIA 380/1

2.5.2 Die Haustechnik

Die Wärmeproduktion und der kontrollierte Luftwechsel werden durch zwei Aggregate produziert :

- Das HTM200
Haustechnik Modul mit integriertem 200 l-WW-Boiler

Das HTM200 ist eine Luft-Luft Wärmepumpe, die durch einen elektrischen Verdichter (800 W_{el}) angetrieben wird (Abb. 12).

Das HTM200 ist hauptsächlich für die kontrollierte Lüfterneuerung und die Warmwasseraufbereitung vorgesehen. Im Winterbetrieb leistet es zusätzlich einen Beitrag für die Wohnraumheizung. Im Sommerbetrieb, kann es auch die Zuluft kühlen, indem es ihr Wärme zur Warmwasserproduktion entzieht.

FUNKTIONSWEISE (siehe Abb. 13):

Eingangskanal. Nach Durchströmen eines Erdregisters (ca. 35 m lange Röhre mit 20 cm Durchmesser, installiert in 2 m Tiefe) wird die frische Aussenluft durch einen Kreuzstrom-Wärmetauscher (Wirkungsgrad ca. 25 %) geführt; von dort wird sie über das Heizregister (Kondensator der Wärmepumpe) in die verschiedenen Räume geführt. Zusätzlich können noch zwei elektrische Heizstäbe mit je 450 W_{el} die Zuluft nacherwärmen.

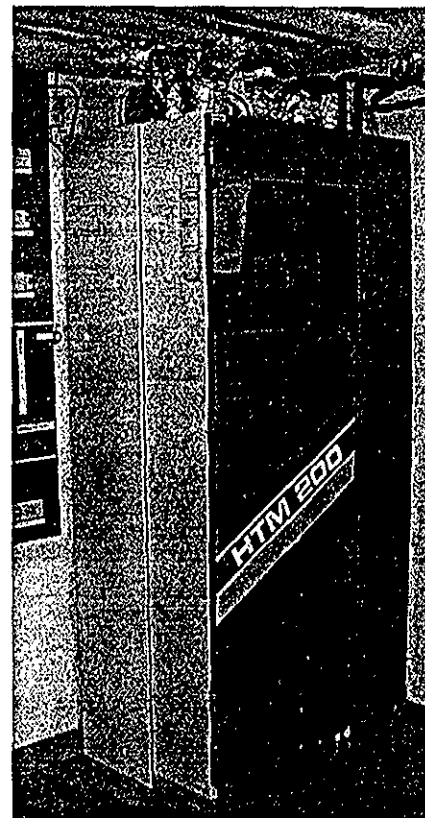


Abb. 12: Das HTM200-Modul (links) und das GLH- Modul (Halbmodul, rechts)
Ausgangskanal. Nur ca. die Hälfte der Abluft durchströmt den Kreuzstrom-Wärmetauscher, die andere Hälfte wird im Normalbetrieb erst nach dem Wärmetauscher der Fortluft zugeführt. Dann strömt die Fortluft über das Kühlregister (Verdampfer der Wärmepumpe). Beim sog. Ferienbetrieb wird die Hälfte der Luft, die normalerweise den Wärmetauscher umgeht, rezirkuliert.

Warmwasserproduktion. Mit der aus der Fortluft (Winter- oder Normalbetrieb) oder der Zuluft (Sommer-Betrieb) entzogenen Wärme wird das Warmwasser produziert. Für den Notfall gibt es noch die Möglichkeit, einen elektrischen Heizstab (1.2 kW_{el}) zuzuschalten.

- Das GLH-Modul
 Grundlast-Heizung

Eine kleine Luft-Wärmepumpe (Verdichter : 1.2 kW_{el}) mit im Boden verlegten, direkt kondensierenden Rohren, deckt den Rest des Wärmebedarfs. Nur das Badezimmer und der Wohnraum werden mit dieser Fussbodenheizung versehen.

2.5.3 Die Messanlage

Das Hauptziel dieser Messungen ist die Untersuchung des HTM200, insbesondere die Ermittlung dessen Jahresarbeitszahl. Zu diesem Zweck wurde das folgende Messsystem vorgesehen (Abb. 13) :

- Im Eingangskanal der Zuluft: Verschiedene Temperatur-, relative Feuchte- und Strömungsgeschwindigkeitsmesser;
- Beim Boiler: ein Wärmezähler;
- Zeitmesser, um die Betriebszeiten der verschiedenen Heizwiderständen zu registrieren;
- Beim Verdichter: Ein Wattmeter.

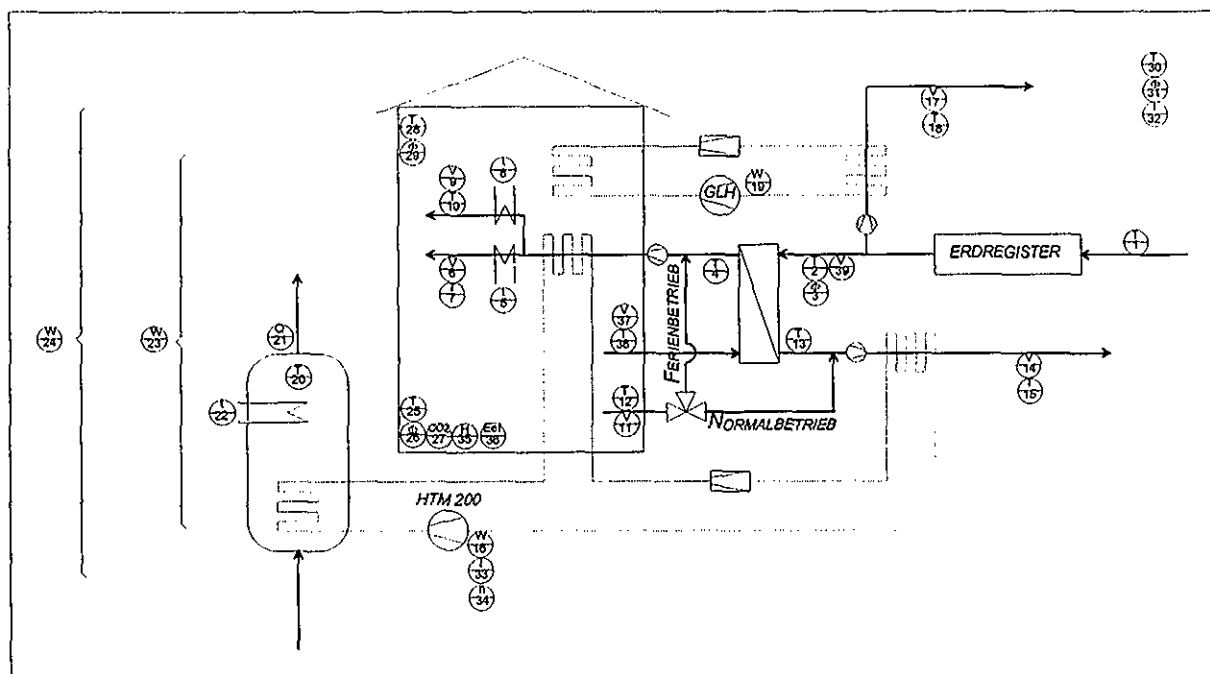


Abb. 13: Messstellenschema für die Pilotanlage 3

Schlussendlich werden weitere Grössen aufgenommen, die für die Abschätzung der Arbeitszahl des GLH-Moduls notwendig sind.

Dazu werden noch Komfort-Grössen (Temperaturen, relative Feuchten und der CO₂-Gehalt) sowie Klimadaten (Temperatur und relative Feuchte der Aussenluft sowie vertikale Sonneneinstrahlung auf die Südfassade) gemessen.

Jede gemessene Grösse wird in Zeitabständen von 10 Sekunden gemessen. Gespeichert werden die Mittelwerte in 10-Minuten-Intervallen.

Messgrösse	Symbol	Einheitl	Verfahren	Genauigkeit
LUFTTEMPERATUR	T	°C	PT100	± 0.5 K
RELATIVE FEUCHTE	ϕ	% ϕ	FEUCHTE-MESSER	2 % (10–90 % RF)
CO ₂ -GEHALT	CO ₂	ppm	CO ₂ -MESSGERÄT	-
STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT	V	m ³ /s	STRÖMUNGS-MESSUMFORMER	5 %
LUFTWÄRME	Q	W	RECHNUNG	-
WARMWASSERWÄRME	Q	W	WÄRMEZÄHLER	-
WARMWASSEITEMPERATUR	T	°C	PT100	± 0.5 K
ELEKTRISCHE ENERGIE	W	W	ELEKTROZÄHLER	2 %
JAHRESARBEITSZAHL	JAZ	-	RECHNUNG	-
SONNENEINSTRALUNG,	I	W/m ²	SOLARIMETER	3.5 %
LAUFZEIT, BETRIEBSZEIT	t	h	ZEITMESSER	-
LAUFZYKLEN	n	-	IMPULSZÄHLER	-
HOLZFEUERUNGSMENGE	Holz	kg	ABSCHÄTZUNG	-

Tab. 9: Messstellenplan für die Pilotanlage 3

2.5.4 Probleme bei der Messanlage

- Bei der Inbetriebsetzung der Messanlage wurde festgestellt, dass der Geschwindigkeitsmesser V17 im kalten Kreislauf der GLH-Moduls defekt war. Bis zum 25. März 1999 hat die Messanlage diese Geschwindigkeit nicht registriert.
- Am 9. Januar 1999 (Woche 2) hat ein Fehler im Geschwindigkeitsmesser V14 unzuverlässige Messungen für die Geschwindigkeiten V6, V9, V11 und V37, sowie auch für die CO₂-Konzentration verursacht. Dieser Fehler wurde am 15. Januar 1999 behoben.
- Es wurde festgestellt, dass die Strömungsmessumformer, welche nach dem Heissfilmanemometerprinzip arbeiten, immer kleiner werdende Messergebnisse anzeigten, obwohl es keine Erklärung dafür gab, warum sich der Volumenstrom der Ventilatoren geändert haben sollte. Die plausibelste Erklärung dafür ist, dass sich Staub auf dem Messfilm sammelt, viel auf den Fortluftmessgeräten, bei welchen die Luft nicht gefiltert ist, und relativ wenig auf den Frischluftmessgeräten, bei welchen die Luft direkt nach dem Elektrofilter gemessen wird. Nach Entfernen dieses Staubes läuft für ein paar Tage alles einwandfrei, bevor dasselbe Phänomen wieder auftrat. Deshalb wurde mit den Geschwindigkeitsmessungen folgendermassen verfahren :

Ausgehend von der Annahme, dass die Ventilatoren immer gleich arbeiten, wenn sie in Betrieb sind, wurden während einer Woche nach der Reinigung der Messgeräte Geschwindig-

keitswerte aufgenommen. Diese Wochenmittelwerte werden nachher für die Berechnung der Luft-Volumenstrommengen in den verschiedenen Leitungen benützt.

- Bis zum 25. März hat der Zeitmesser t22 falsche Einschaltzeiten gemessen. Anstelle die Einschaltzeiten des Heizstabs für das Warmwasser zu registrieren, wurden diejenige des GLH-Verdichters gemessen. Folglich wurde für diese Messperiode die produzierte Wärmemenge des Boiler-Heizstabs nicht direkt gemessen, sondern aus anderen Messwerten indirekt abgeleitet. (Die in der Tab. 12 angezeigten negativen Werten für die produzierten Wärmemengen sind durch das Kombinieren von gemessenen Grössen mit ihren Messfehlern zu verstehen).

2.5.5 Probleme bei der Heizanlage

Im Laufe der Zeit hat sich die Funktionsweise des GLH-Moduls so verschlechtert, dass es sich ab Ende 1998, das heisst während der ganzen Messperiode, praktisch wie eine Elektrodirektheizung verhalten hat. Wahrscheinlich befindet sich im Kreislauf kein Kältemittel mehr. Dieser Mangel konnte bis jetzt noch nicht behoben werden. Die Reparatur ist für den Sommer 1999 geplant.

3 GEWONNENE ERKENNTNISSE

3.1 Ergebnisse Grafstal

3.1.1 Energieflussdiagramm

Für die Messperiode von Woche 49 / 98 bis Woche 13 / 99 sind die gemessenen oder aus den Messwerten ermittelten Energieflüsse in Form eines Energieflussdiagrammes in Abb. 14 dargestellt.

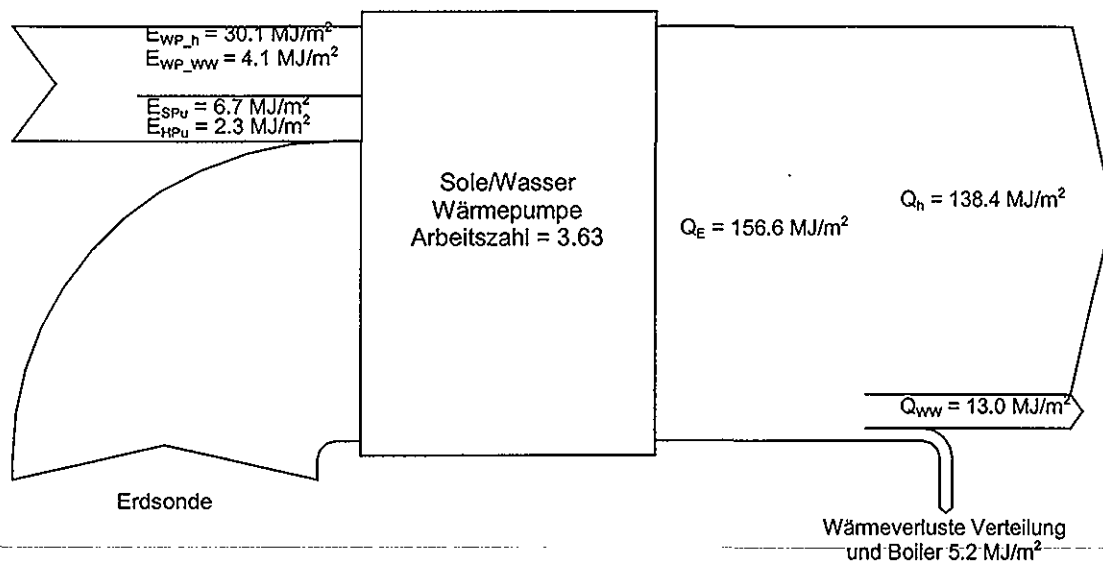


Abb. 14: Energieflussdiagramm „Grafstal“ für die Wochen 49/98 bis 13/99

($E_{WP,h}$ = Elektrizitätsverbrauch WP zur Deckung des Heizenergiebedarfes, $E_{WP,WW}$ = Elektrizitätsverbrauch WP zur Deckung des Energiebedarfes Warmwasser, E_{HPu} = Elektrizitätsverbrauch Umwälzpumpe, E_{SPu} = Elektrizitätsverbrauch Solepumpe, Q_E = Endenergie, Q_h = Nutzenergie Heizung, Q_{WW} = Nutzenergie Warmwasser).

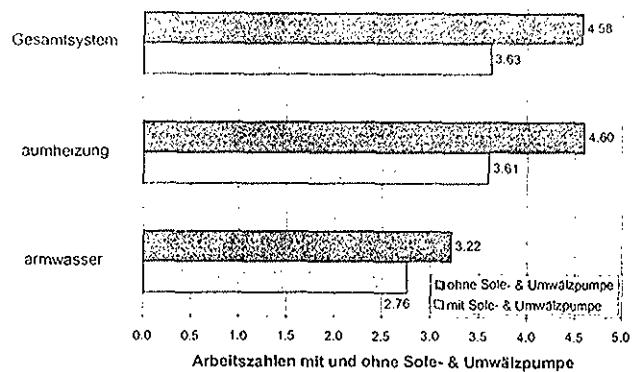
Anhand der aus den Messwerten ermittelten Heizgradtage (Raumtemperatur 20°C, Heizgrenze 12°C), welche mit langjährigen Mittelwerten der Station Zürich-SMA auf eine ganze Heizperiode extrapoliert werden, wurde der elektrische Energieverbrauch zur Deckung des Heizenergiebedarfes für die gesamte Heizperiode abgeschätzt: Für die Heizperiode 1998 / 1999 wurde zum Heizen ein Elektrizitätsverbrauch von ca. 54 MJ/m² a ermittelt.

3.1.2 Arbeitszahlen

Die Arbeitszahl gibt das Verhältnis zwischen Nutzen (Raumheizung und Warmwasser) und Aufwand (Energieverbrauch Wärmeerzeugung und Wärmetransport) an.

In Abb. 15 sind die Arbeitszahlen für das ganze System (Gesamtsystem), die Raumheizung und das Warmwasser jeweils mit und ohne Sole- & Umwälzpumpen aufgeführt. Zur Berechnung der Arbeitszahl „Gesamtsystem“ wird die von der Wärmepumpe produzierte Wärme verwendet, bei der „Raumheizung“ und beim „Warmwasser“ wird die Nutzwärme ab Heizverteiler bzw. Zapfstelle verwendet.

Die relativ tiefe Arbeitszahl „Warmwasser“ von 2.8 ist in erster Linie auf die Speicherverluste zurückzuführen. Die Brutto-Arbeitszahl ohne



Speicherverluste wäre mit 3.8 um ca. 20% höher.

Abb. 15: Arbeitszahlen mit und ohne Sole- & Umwälzpumpe

3.1.3 Komfort

Die durchschnittlichen Raumlufttemperaturen betrugen während der Messperiode 23.8 °C im Erdgeschoss, 22.5 °C im Obergeschoss und 22.4 °C im Dachgeschoss und liegen somit über dem optimalen Bereich für eine leichte, sitzende Tätigkeit von 20°C bis 22°C. Die relative Raumluftfeuchte im Erdgeschoss lag mit durchschnittlich 36 %r.F. knapp über der Behaglichkeitsgrenze von 30 %r.F. [SIA V 382/1]

Abb. 16 zeigt die Raum- und Aussenlufttemperatur sowie die horizontale Globalstrahlung der Woche 11 / 99. Die Abnahme der Raumlufttemperatur im Erdgeschoss um 2 bis 3 K am frühen Nachmittag kennzeichnet die Zeitpunkte, an denen die Fenster zum Lüften geöffnet wurden.

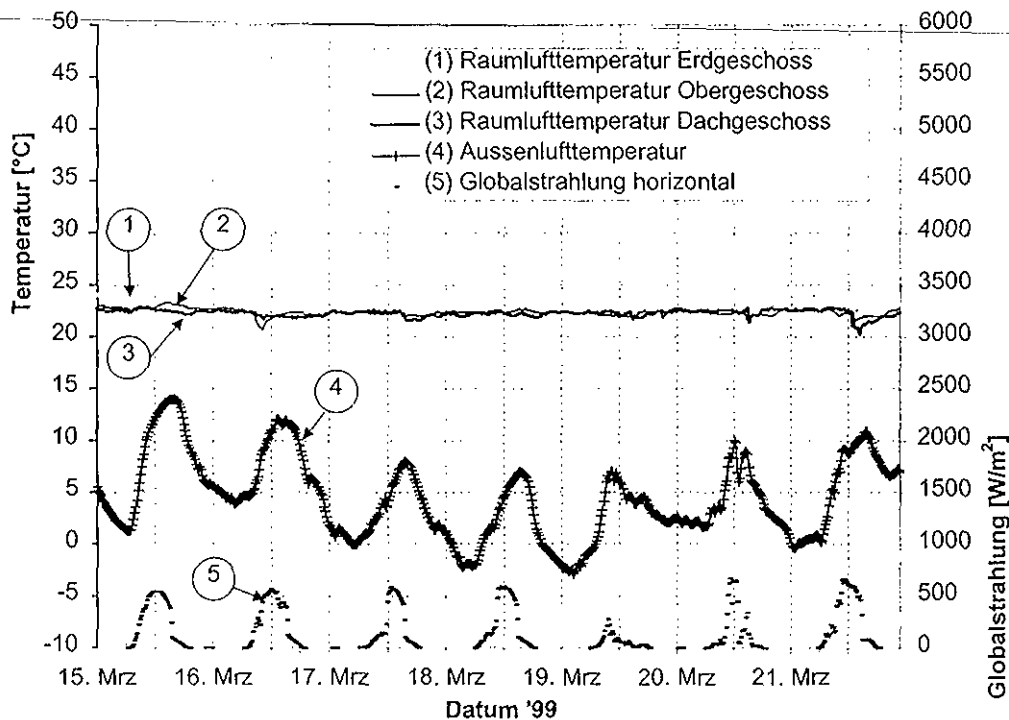


Abb. 16: Aussen- und Raumlufttemperaturen, horizontale Globalstrahlung

3.1.4 Luftqualität und Tracergasmessungen

Tracergasmessung

Bis zum Zeitpunkt der Zwischenberichterstellung lagen erst die Auswertungen für die Messperiode Dezember 1998 bis Februar 1999 vor. Die gemessenen Luftwechsel sind in Tab. 10 aufgeführt.

Für die Aufenthaltsräume (ohne Keller) ergibt sich ein relativ tiefer mittlerer Aussenluftwechsel von ca. 0.2 h^{-1} (zum Vergleich: Aussenluftwechsel nach SIA 380/1, Standardnutzung EFH = 0.4 h^{-1}). Speziell in die Zimmer 8 und 9 im Obergeschoss gelangt sehr wenig Frischluft. Demgegenüber ist der Aussenluftwechsel im Keller ungewöhnlich hoch.

Raum	Aussenluftwechsel [h^{-1}]		
	Dez. 98	Jan. 99	Feb. 99
Keller	0.46	0.84	1.00
Wohnen / Essen	0.23	0.23	0.24
Küche	0.21	0.26	0.24
Flur EG	0.38	0.38	0.42
Flur OG	0.16	0.18	0.20
Zimmer 8	0.13	0.16	0.16
Zimmer 9	0.10		0.11
Dachgeschoss	0.13	0.16	0.16

Tab. 10: Aussenluftwechsel

Bei der Messung werden zwei verschiedene Spurengase eingesetzt. Dadurch kann das Gebäude in zwei Zonen unterteilt werden: Zone 1 = EG und Keller, Zone 2 = OG und DG. Abb. 17 sind die Luftströme zwischen den Zonen und der Aussenluft eingezeichnet. Der Luftaustausch zwischen Keller und EG kann anhand der Messwerte nicht explizit ermittelt werden, da beide Gebäudeteile der gleichen Zone angehören. Aufgrund der sehr grossen unterschiedlichen Luftwechsel zwischen Keller und EG kann jedoch davon ausgegangen werden, dass keine Frischluft vom Keller ins Erdgeschoss strömt.

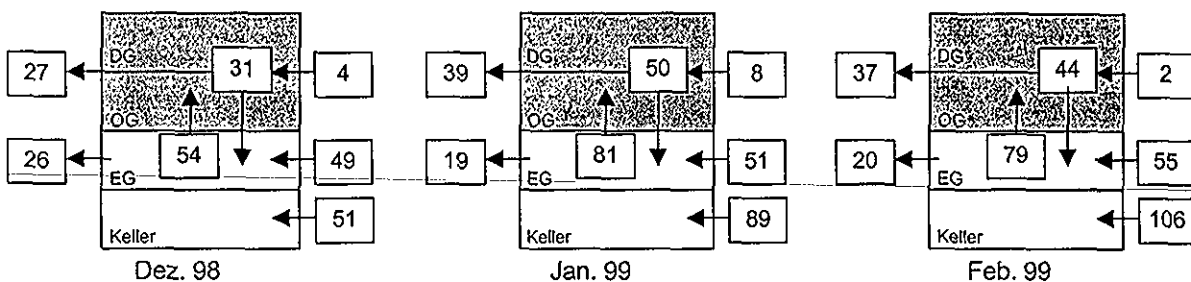


Abb. 17: Luftströme in m^3/h zwischen den Zonen (Zone 1 = Keller / EG, Zone 2 = OG / DG) und der Frischluft

Raumluftqualität

Zur Beurteilung der Raumluftqualität wird der CO_2 -Gehalt der Wohnzimmerluft gemessen. Der Kohlendioxidgehalt kann als Vergleichsmass für die Verunreinigung der Raumluft herangezogen werden. Um eine gute Luftqualität bezüglich CO_2 zu gewährleisten, sollte die Konzentration unter 1500 ppm liegen, für besonders hohe Ansprüche unter 1000 ppm . Ein typischer Verlauf des CO_2 -Gehaltes ist in Abb. 18 ersichtlich. Die Konzentration nimmt im Verlauf des Nachmittags bis zum späteren Abend stetig zu und bleibt dann relativ konstant bis durch Öffnen der Fenster wieder gelüftet wird.

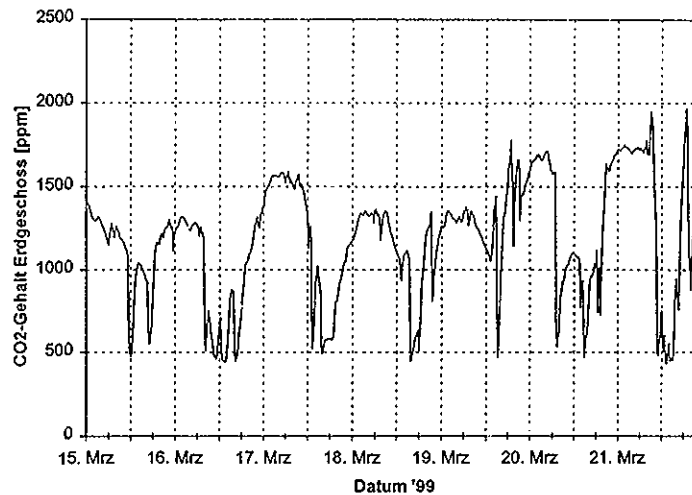


Abb. 18: CO₂-Gehalt im Erdgeschoss

Über die Messperiode lag der arithmetisch gemittelte CO₂-Gehalt der Raumluft im Erdgeschoss bei 1100 ppm und überschritt während 12,5 % oder 378 Stunden der Messperiode den Richtwert von 1500 ppm. Die Konzentration unterschritt nur geringfügig 500 ppm und überschritt zeitweise die Messgrenze von 2000 ppm.

3.1.5 Regelung Heizanlage

Ein charakteristischer Verlauf der Vor- / Rücklauftemperatur Sole und Wärmepumpe (Raumheizung und Warmwasser) und der Aussenlufttemperatur ist in Abb. 19 aufgezeichnet. Die Wärmepumpe wird mit einer Schaltdifferenz von ca. 2 K über die Rücklauftemperatur geregelt. Bei Heizbetrieb kann die Vorlauftemperatur je nach Heizenergiebedarf bis 40 °C steigen. Während der Boileraufladung erreicht die Vorlauftemperatur ca. 50 bis 55 °C. Pro Tag schaltet die Wärmepumpe zwischen 5 bis 8 mal ein.

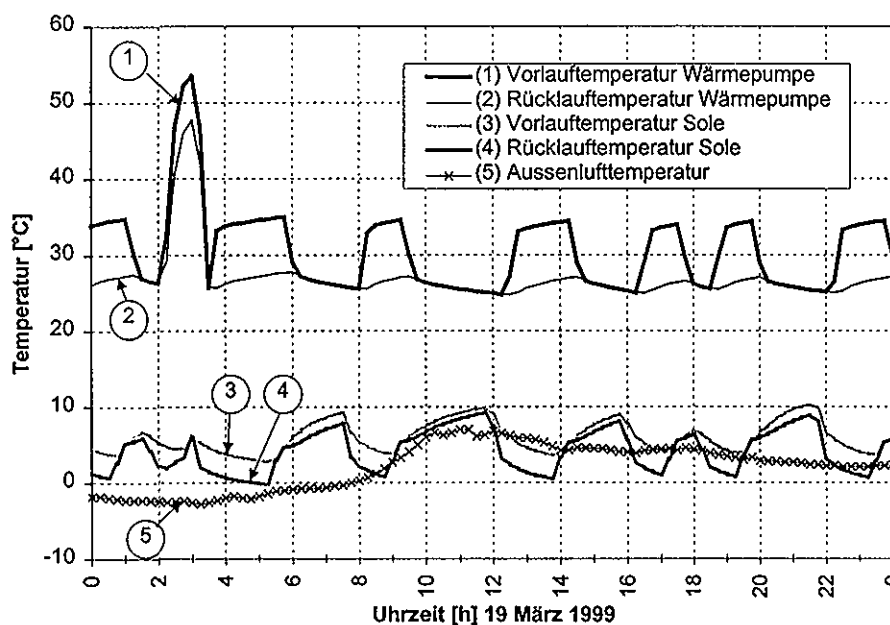


Abb. 19: Vor- / Rücklauftemperatur Sole und Wärmepumpe und Aussenlufttemperatur am 19.3.99

3.1.6 Warmwasser

Das Warmwasser wird täglich einmal auf knapp 50 °C aufgeheizt. Die Boilertemperatur nimmt auch ohne Bezug pro Stunde ca. 0,3 K ab (geschätzte Speicherverluste pro Tag ca. 1,8 kWh). Abb. 20 zeigt den Verlauf der Speichertemperaturen im Boiler (Temperatur Boiler oben und unten), der Temperatur in der Warmwasserleitung (Temperatur Warmwasser) und der Temperatur in der Boilerzuleitung (Kaltwassertemperatur).

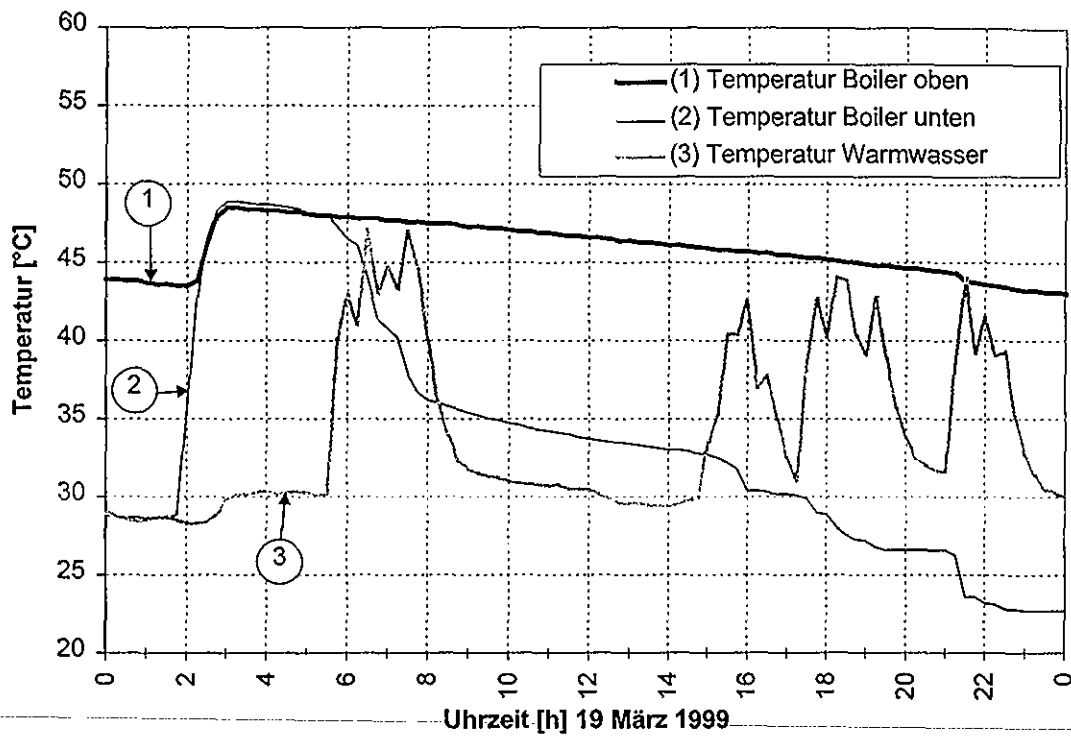


Abb. 20: Temperaturverläufe Boilerladung und Entladung

3.2 Ergebnisse Schötz

Abb. 21 zeigt die gemessenen oder aus den Messwerten ermittelten Energieflüsse in Form eines Energieflussdiagrammes für die Messperiode von Woche 05 / 99 bis Woche 13 / 99.

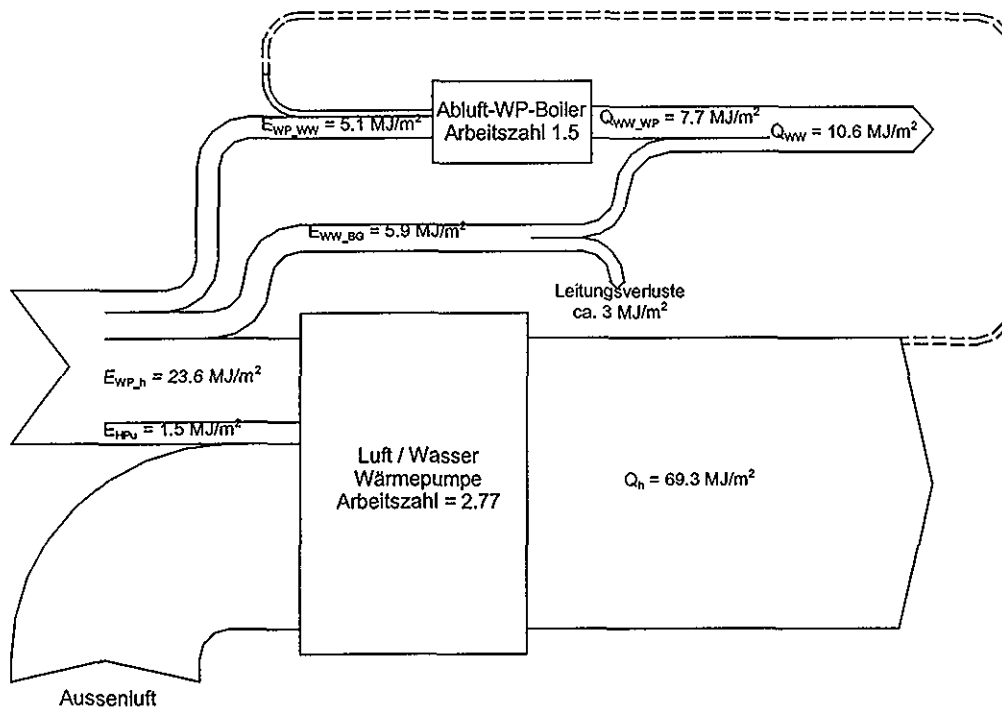


Abb. 21: Energieflussdiagramm Schötz für die Wochen 5/99 bis 13/99

(E_{WP_h} = Elektrizitätsverbrauch WP zur Deckung des Heizenergiebedarfes, $E_{WP_{WW}}$ = Elektrizitätsverbrauch WP zur Deckung des Energiebedarfes Warmwasser, E_{HPU} = Elektrizitätsverbrauch Umwälzpumpe, Q_h = Nutzenergie, Q_{WW} = Nutzenergie Warmwasser, $Q_{WW_{WP}}$ = Nutzenergie Warmwasser, gedeckt mit Abluft-WP-Boilers)

Für die gesamte Heizperiode 1998 / 1999 wäre mit einem Elektrizitätsverbrauch ca. 88 MJ/m² a zu rechnen gewesen. Dieser Wert wurde mit den gemessenen Heizgradtagen (Raumtemperatur 20°C, Heizgrenze 12°C) aus den Messwerten ermittelt und mit Daten von langjährigen Mittelwerten der Station Luzern auf eine volle Heizperiode extrapoliert.

3.2.1 Arbeitszahlen

Abb. 22 zeigt die Arbeitszahlen der Luft/Wasser-Wärmepumpe mit und ohne Umwälzpumpe und die Arbeitszahl des Abluft-WP-Boilers mit Ventilator mit und ohne Speicherverluste. Die Arbeitszahl des Abluft-WP-Boilers ist stark abhängig von der Lufteintrittstemperatur. Auf Wunsch des Eigentümers wird auch Luft aus dem unbeheizten Trockenraum angesogen. Dadurch sinkt die Eintrittstemperatur gegenüber der Raumtemperatur um bis zu 8 K. Dies kann eine Verschlechterung der Arbeitszahl bis 20% zur Folge haben.

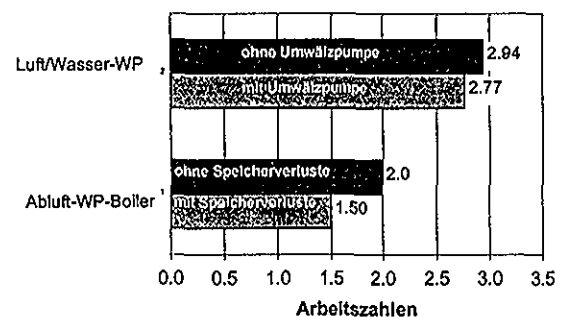


Abb. 22: Arbeitszahlen Luft/Wasser-WP und Abluft-WP-Boiler

3.2.2 Komfort

Während der Messperiode betrug die durchschnittliche Raumlufthtemperatur im Erdgeschoss 23.6 °C, im Obergeschoss 21.9 °C und die relative Raumlufthfeuchte im Erdgeschoss 41 %r.F.

In Abb. 23 sind die Verläufe der Raum- und Aussenlufttemperaturen und der Globalstrahlung eingezeichnet. Die Globalstrahlung wurde nicht bei der Pilotanlage sondern in Horw gemessen (Distanz Schötz – Horw ca. 15 km) und soll nur die sonnigen Tage anzeigen. Der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Raumlufthtemperatur kann gut beobachtet werden: An sonnigen Tagen erwärmt sich gegen Mittag der Raum um 2 bis 3 K (1. bis 4. Feb), an Schlechtwettertagen (5. bis 7. Feb) bleibt die Temperatur relativ konstant.

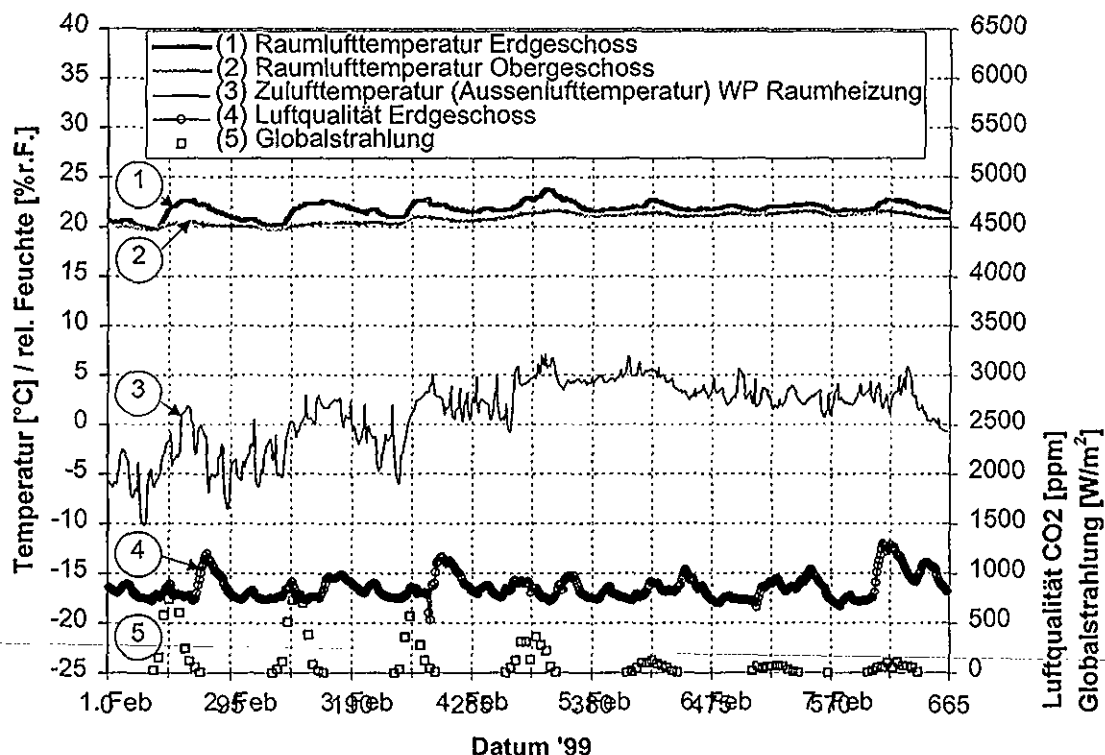


Abb. 23: Aussen- und Raumlufthtemperaturen

3.2.3 Luftqualität und Tracergasmessungen

Tracergasmessung

Bis zum Zeitpunkt der Zwischenberichterstellung lagen leider noch keine Resultate der Tracergasmessung vor.

Luftqualität

In Abb. 24 ist der Verlauf der CO₂-Konzentration im EG über eine Woche eingezeichnet, welcher als repräsentativ für die ganze Messperiode bezeichnet werden kann. Die Konzentration schwankt in geringem Ausmass um den Mittelwert von 800 ppm. Während 1.3 % der Messperiode oder 20 Stunden wurde der Richtwert von 1500 ppm überschritten, wovon während ca. 5 Stunden die Konzentration über 2000 ppm lag.

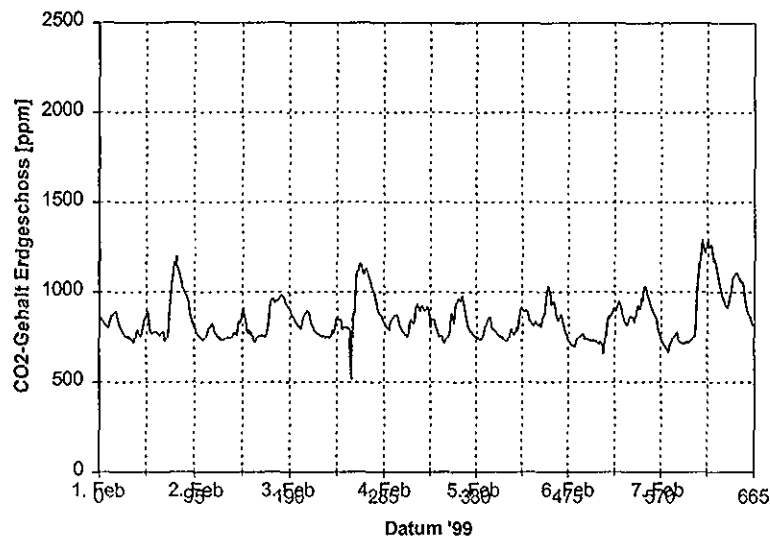


Abb. 24: CO₂-Gehalt im Erdgeschoss

3.2.4 Regelung Heizanlage

Abb. 25 zeigt die Vor- und Rücklauftemperatur der Raumheizung und die Zu- und Ablufttemperatur der Heizungswärmepumpe. Die kurzzeitigen Einbrüche (ca. 1:00, 9:00 und 14:00 Uhr) der Vorlauftemperatur sind Folge der Abtaung. Gut sichtbar sind auch die Sperrzeiten des Elektrizitätswerks um 2:00 Uhr und 10:00 Uhr. Die Vorlauftemperatur steigt bis auf ca. 35 bis 37 °C.

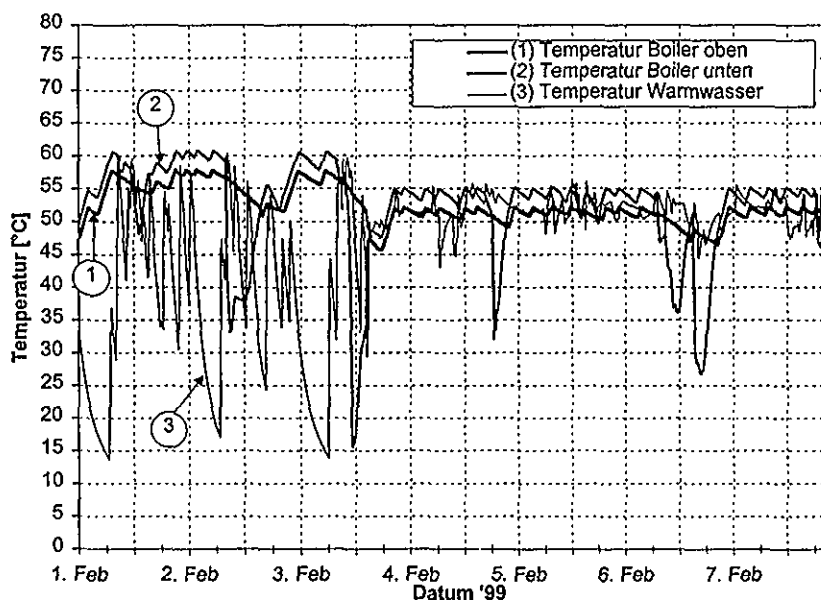


Abb. 25: Vor- / Rücklauftemperatur und Zu- / Ablufttemperatur der WP Raumheizung

Abb. 26 zeigt die Temperaturverläufe in der Warmwasserleitung (Temperatur Warmwasser) und die Speichertemperaturen (Temperatur Boiler oben und unten). Weil die Temperaturfühler aussen montiert sind und der Kondensator aus Gründen des Verkalkens aussen am unteren Teil des Boilers angebracht ist, wird die Temperatur im Boiler oben (1 m ab Boilerboden) normalerweise tiefer als die Temperatur im Boiler unten (0.4 m ab Boilerboden) gemessen.

Die Speicherverluste sind mit einer mittleren Abnahme der Speichertemperatur von ca. 0.4 K/Stunde oder ca. 1.7 KWh/Tag sehr hoch. Die Arbeitszahl des WP-Abluft-Boilers verschlechtert sich dadurch um ca. 25 %.

Am 3. Februar wurde das Heizband (Begleitheizung) zur Deckung der Leitungsverluste eingeschaltet. Dies ist deutlich sichtbar an den viel kleineren Schwankungen der Warmwassertemperatur. Gleichzeitig wurde der Sollwert der Boilertemperatur von 60 auf 55°C reduziert.

Fragwürdig ist der Einsatz der Begleitheizung. Das Heizband benötigte während der Messperiode mehr Energie als der Abluft-WP-Boiler (siehe Energieflussdiagramm). Mit dem Heizband wird zur Deckung der Leitungsverluste die Temperatur in der Leitung auf 55 °C gehalten. Bei einer Boilertladung wenn kein warmes Wasser mehr nachströmt, wie z.B. am 6. Februar, wird das Heizband zu einer Elektrozusatzheizung. Mit Berücksichtigung des durch die Begleitheizung verursachten Energieverbrauchs verschlechtert sich die Arbeitszahl des Abluft-WP-Boilers um 18 % von 1.50 auf 1.23.

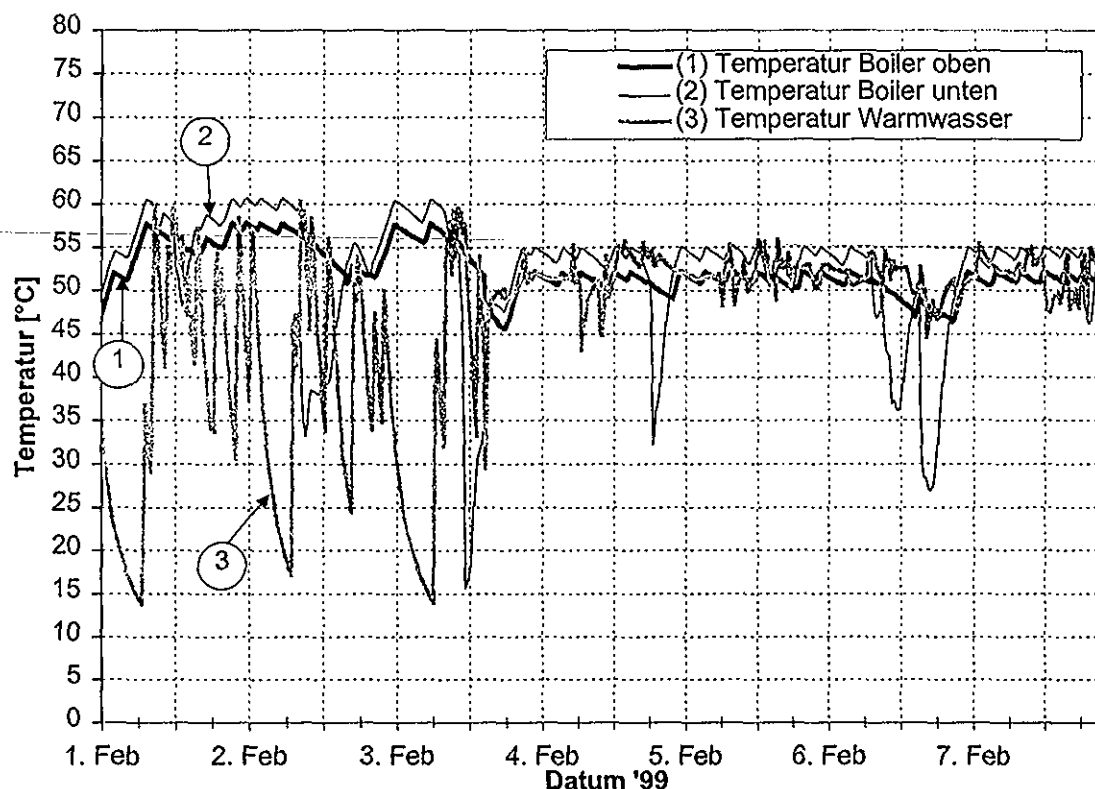


Abb. 26: Vor- / Rücklauftemperatur und Zu- / Ablufttemperatur der WP Raumheizung

3.2.6 Regelung Heizanlage

Abb. 27 zeigt den Verlauf der Aussentemperatur, der Innenraumtemperaturen in den Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperaturen des Gebäudes in Schötz während der Kalenderwoche 15 (12. – 18. April).

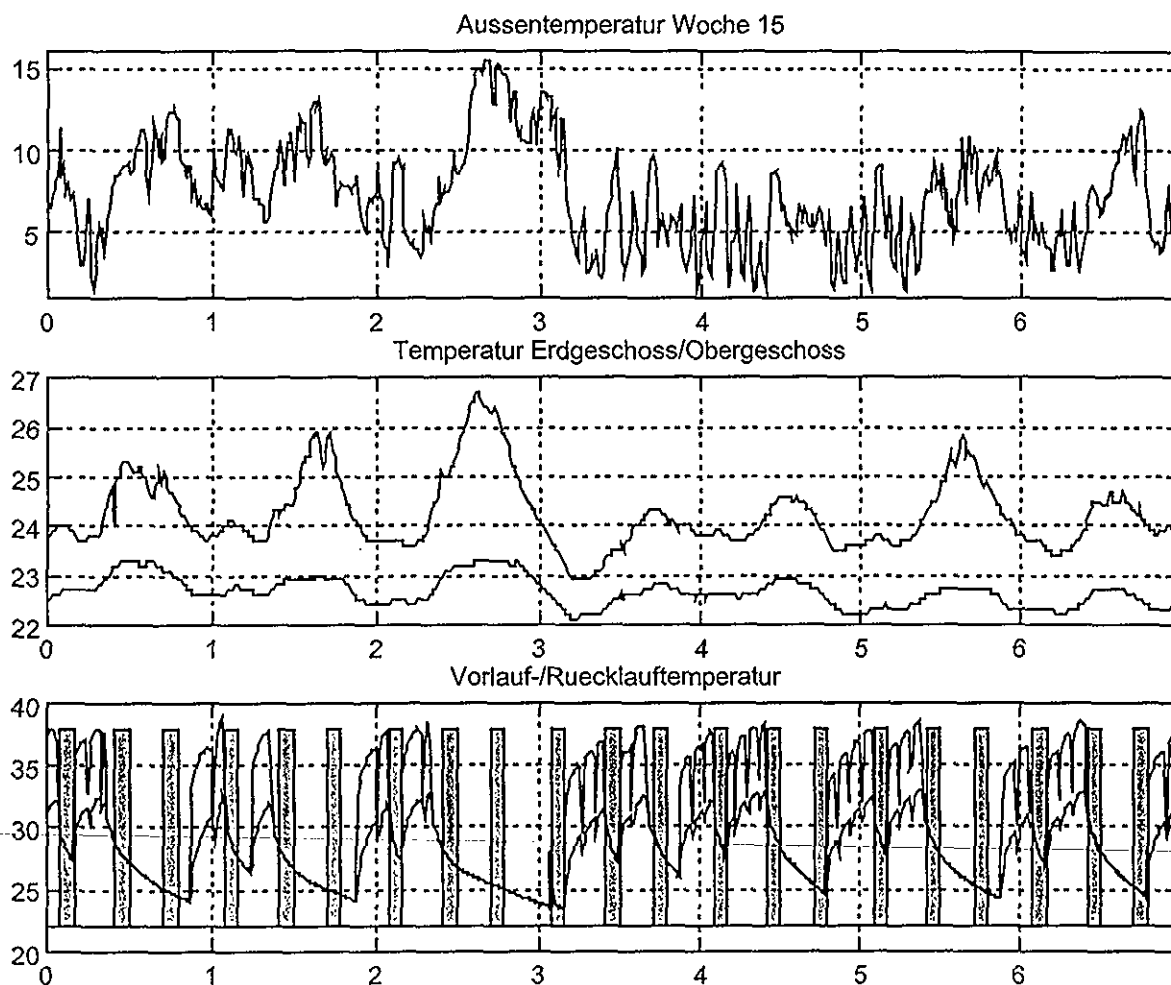


Abb. 27: Temperaturverlauf der Anlage in Schötz mit H_∞ -Regler während der Kalenderwoche 15

Die Raumtemperatur im Erdgeschoss reagiert stark auf Sonneneinstrahlung. Dies ist nicht nur auf die grosse Fensterfläche des Erdgeschosses zurückzuführen, sondern auch auf die Tatsache, dass der Sensor direkt von der Sonne beschienen wird. Die Temperatur im Obergeschoss reagiert weniger auf Sonnenstrahlung. Der Regler kann die Temperatur im Obergeschoss auch bei den starken täglichen Schwankungen der Aussentemperatur gut einhalten. Das Überschwingen in den ersten Tagen wurde durch einen zu hoch eingestellten Sollwert verursacht, der durch die Bewohner in der Folge auf einen von ihnen als angenehm empfundenen Wert zurückgestellt wurde. Der Temperaturunterschied zwischen Erd- und Obergeschoss ist auf die durch die Bewohner vorgenommene Abstimmung der Hydraulik zurückzuführen. Dabei wurden die Heizkreise im Obergeschoss ganz oder zumindest teilweise geschlossen.

Die grauen Flächen im untersten Verlauf stellen die Sperrzeiten dar. Die vertraglich Möglichen drei mal zwei Stunden werden vom lokalen Elektrizitätswerk nach einem festen Fahrplan vollständig ausgeschöpft.

Als Vergleich ist in Abb. 28 Kalenderwoche 9 aufgezeichnet (1. – 7. März). Während dieser Zeit ist der mit der Wärmepumpe gelieferte Zweipunktregler mit Bodenfühler im Einsatz.

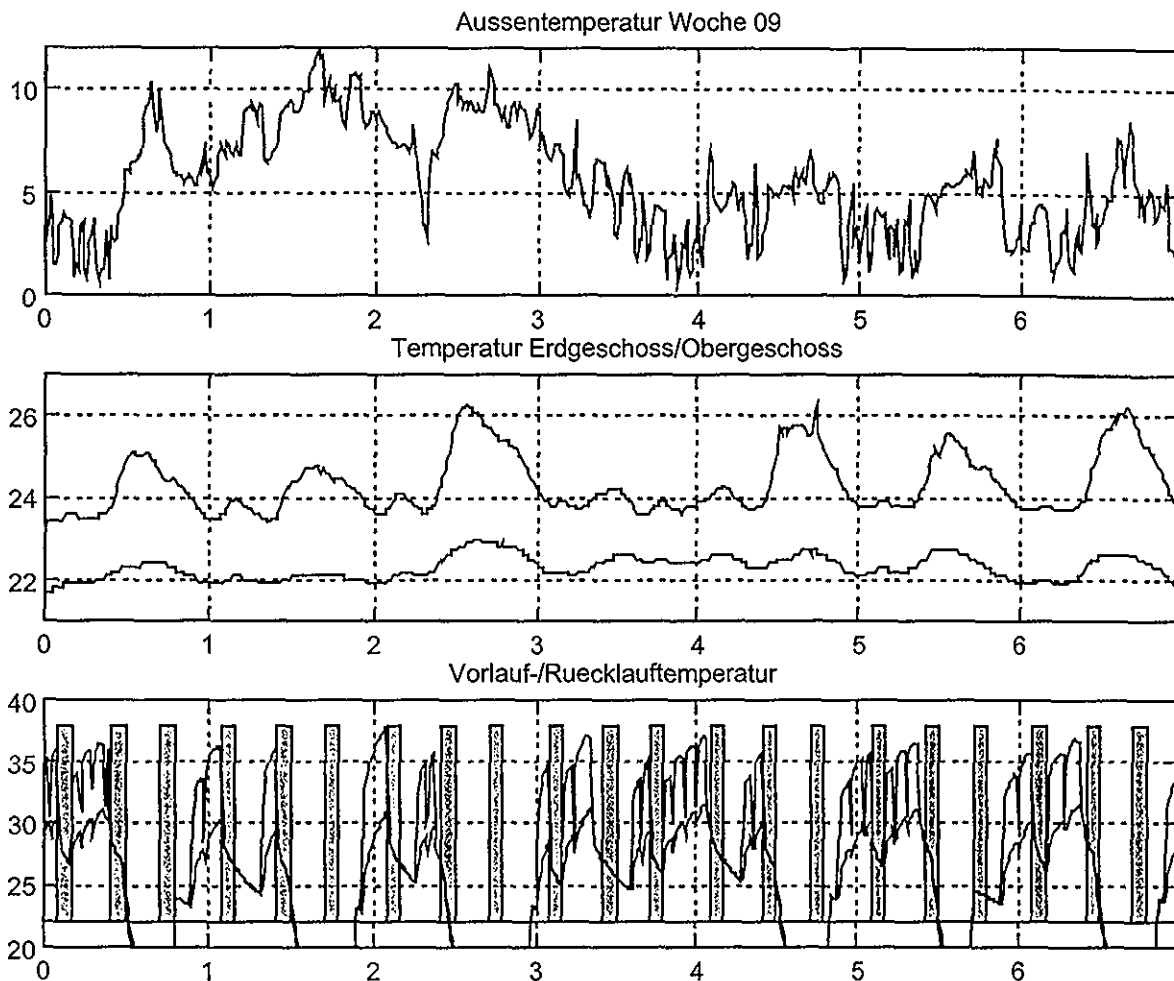


Abb. 28: Temperaturverlauf der Anlage in Schötz mit Zweipunktregler während der Kalenderwoche 9

3.3 Ergebnisse Fully

3.3.1 Überblick der gemessenen Größen

Mit den unter 2.5.4 und 2.5.5 erwähnten Schwierigkeiten wurde vom 21. Dez. 1998 bis zum 18. April 1999 gemessen. Eine zusammenfassende Darstellung der wöchentlichen Hauptresultate und -Messungen findet man in Tab. 11 und Tab. 12.

Unter **COP** versteht man hier den Quotienten der wöchentlich durch den Verdichter alleine produzierten Wärme (Warmwasser und Heizung) durch den elektrischen Verbrauch des Verdichters.

Unter **JAZ** ist der Quotient der produzierten Wärme, inklusive Erdregister und Wärmetauscher, aber ohne die elektrischen Widerstände, durch den elektrischen Verbrauch des Verdichters, der Ventilatoren und der Regelung zu verstehen.

Unter **Eta** ist der Quotient der gesamthaft produzierten Wärme durch den Verdichter, das Erdregister, den Wärmetauscher und die gesamthaft verbrauchte elektrische Energie.

Woche	Anfang	Ende	Anz. Tage	Anz. Stunden	T_aussen	RF_aussen	I	COP_HTM	JAZ_HTM_Zähler	JAZ_HTM_Nenner	JAZ_HTM_Woche	Eta_HTM_Zähler	Eta_HTM_Nenner	Eta_HTM_Woche	Eta_GLH_Zähler	Eta_GLH_Nenner	Eta_GLH_Woche	Eta_WEA_Zähler	Eta_WEA_Nenner	Eta_WEA_Woche
					oC	%	W/m2	-	kWh	kWh	-	kWh	kWh	-	kWh	kWh	-	kWh	kWh	-
52	21-déc	27-déc	7.0	168	0.5	65.3	97	2.09	394	151	2.61	399	155	2.57	90	80	1.12	489	236	2.07
1	28-déc	3-janv	7.0	168	5.6	59.5	113	2.01	355	161	2.20	357	164	2.18	24	21	1.15	382	185	2.06
2	4-janv	10-janv	7.0	168	6.2	67.3	122	1.97	354	166	2.14	356	168	2.12	0	0		356	168	2.12
3	11-janv	17-janv	7.0	168	2.0	72.9	102	2.09	338	131	2.58	354	147	2.41	88	88	1.00	442	235	1.88
4	18-janv	24-janv	7.0	168	2.5	63.6	197	2.04	303	125	2.43	319	140	2.27	33	33	1.00	351	173	2.03
5	25-janv	31-janv	7.0	168	0.5	68.6	121	1.93	302	124	2.43	316	138	2.28	108	108	1.00	424	246	1.72
6	1-févr	7-févr	7.0	168	0.7	72.2	104	2.10	342	135	2.53	346	140	2.48	102	102	1.00	449	242	1.85
7	8-févr	14-févr	7.0	168	-4.1	68.0	159	2.08	403	144	2.79	414	155	2.67	123	123	1.00	537	278	1.93
8	15-févr	21-févr	7.0	168	2.1	79.3	59	2.05	354	151	2.34	359	156	2.30	161	161	1.00	520	318	1.64
9	22-févr	28-févr	7.0	168	3.2	76.7	101	1.97	314	143	2.19	382	211	1.81	66	66	1.00	448	277	1.62
10	1-mars	7-mars	7.0	168	5.6	71.9	128	2.05	304	143	2.12	330	169	1.95	43	43	1.00	374	213	1.76
11	8-mars	14-mars	7.0	168	8.3	62.0	144	2.32	199	94	2.10	197	93	2.12	29	29	1.00	226	122	1.85
12	15-mars	21-mars	7.0	168	8.6	54.9	199	2.03	222	117	1.91	222	116	1.91	0	0		222	116	1.91
13	22-mars	28-mars	7.0	167	8.7	64.4	85	2.01	251	125	2.02	253	127	2.00	57	57	1.00	311	184	1.69
14	29-mars	4-avr	7.0	168	11.8	58.4	202	1.99	233	132	1.76	235	134	1.75	0	0		235	134	1.75
15	5-avr	11-avr	7.0	168	11.7	59.9	148	1.78	164	101	1.63	166	102	1.62	0	0		166	102	1.62
16	12-avr	18-avr	7.0	168	6.7	69.4	96	1.96	272	126	2.17	273	126	2.16	0	0		273	126	2.16
				</																

Tab. 11: Überblick der COP-, JAZ- und Eta-Werte

Woche	Anfang	Ende	Q_EG_HTM		Q_OG_HTM		Q_Erdregler		Q_Wärmetauscher		Q_EG_VS_HTM		Q_OG_VS_HTM		Q_OG_Stab		Q_WW		Q_WW_Stab		Q_V_HTM		Q_HTM		Q_GLH		Q_kalt_HTM		Q_kalt_GLH		W_V_HTM		W_V_HTM		W_V_HTM		W_V_GLH		W_Heizanlage		W_Haus				
			kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh			
52	21-déc	27-déc	196	147			112	51	129	0	87	1	55	3	267	399	90																												
1	28-déc	3-janv	177	126			44	46	136	0	90	0	54	3	277	357	24																												
2	4-janv	10-janv	185	130			36	50	146	0	96	0	41	2	280	356	0																												
3	11-janv	17-janv	178	143			72	73	118	0	90	7	33	9	225	354	88																												
4	18-janv	24-janv	155	121			59	40	104	2	76	6	43	8	207	319	33																												
5	25-janv	31-janv	155	118			74	39	98	7	68	7	43	0	195	316	108																												
6	1-févr	7-févr	175	130			66	46	117	0	80	1	41	3	234	346	102																												
7	8-févr	14-févr	206	158			105	48	126	0	88	3	49	8	252	414	123																												
8	15-févr	21-févr	189	137			40	48	139	0	94	1	34	4	262	359	161																												
9	22-févr	28-févr	183	161			35	45	141	8	125	33	37	26	236	382	66																												
10	1-mars	7-mars	160	115			15	40	129	7	88	9	55	11	245	330	43																												
11	8-mars	14-mars	95	65			7	24	77	3	49	0	37	-4	165	197	29																												
12	15-mars	21-mars	105	75			1	29	87	0	59	0	42	-1	189	222	0																												
13	22-mars	28-mars	104	78			2	43	79	0	56	0	71	2	204	253	57																												
14	29-mars	4-avr	108	77			-30	43	100	0	70	0	50	2	218	235	0																												
15	5-avr	11-avr	55	43			-16	41	41	0	31	0	68	1	138	166	0																												
16	12-avr	18-avr	135	99			37	39	97	0	65	0	39	1	201	273	0																												
21-déc	18-avr	2562	1923				658	743	1865	26	1310	68	791	78	3794	5276	926																												

Tab. 12 : Überblick der Wärmeflüsse und Elektrizitätsverbräuche. Bedeutung der Indizes :

EG, : Erdgeschoss,

OG : Obergeschoss

V : Verdichter

VS : Verdichter und Heizstäbe.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Die wöchentlichen COP-Werte liegen für die betrachtete Heizperiode bei rund 2.0;
- Die JAZ-Werte sind, dank dem Erdregister und dem Wärmetauscher, grösser und können den Wert von 2.8 erreichen (Mittelwert : 2.25)

Die Eta-Werte unterscheiden sich kaum von den JAZ-Werten, d.h. dass Heizstäbe kaum in Betrieb waren.

3.3.2 Energieflussdiagramm vom HTM200

Für die Messperiode von Woche 52 / 98 bis Woche 16 / 99 sind die gemessenen oder aus den Messwerten ermittelten Energieflüsse vom HTM200 in Form eines Energieflussdiagrammes in

Abb. 29 dargestellt. Dazu hat noch das GLH-Modul eine Wärmemenge vom 12.6 MJ/m^2 produziert. (Da sich das GLH-Modul während der Messperiode praktisch wie eine Elektrodirektheizung verhalten hat, wird hier verzichtet, ein ähnliches Energieflussdiagramm darzustellen).

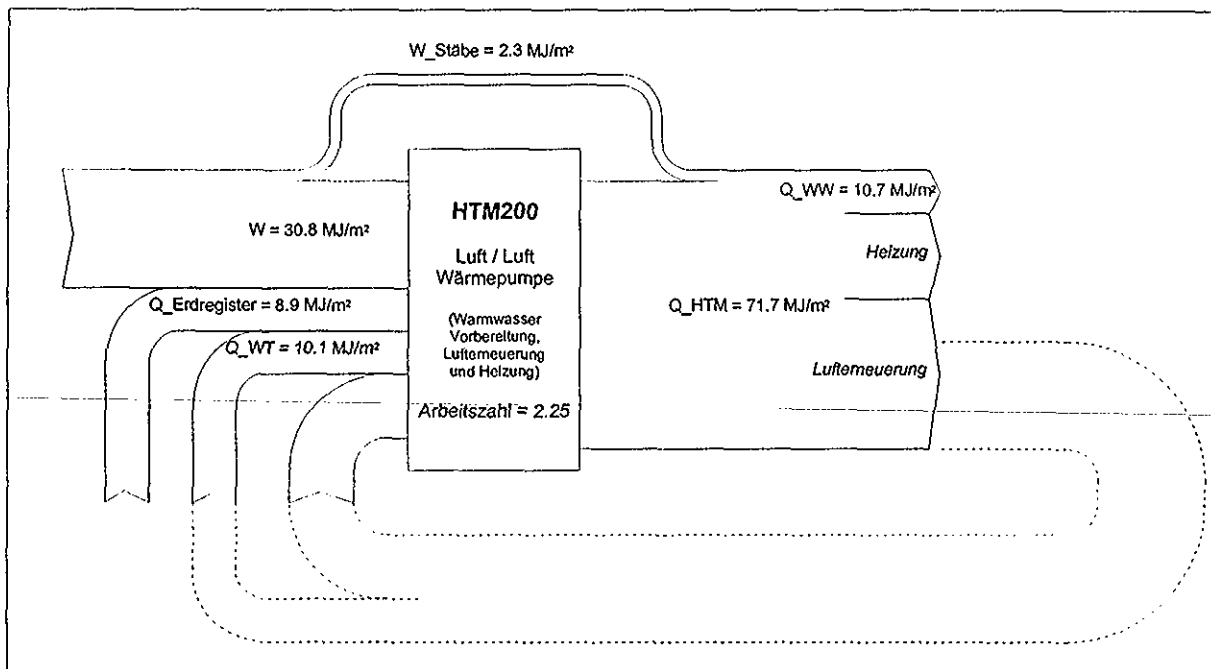


Abb. 29 Energieflussdiagramm des HTM200 für die Messperiode (Woche 52/98 - 16/99) :

W = Elektrizitätsverbrauch (Verdichter, Ventilatoren und Regelung),
 $W_{\text{Stäbe}}$ = Elektrizitätsverbrauch der Heizstäbe (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} = Nutzenergie Warmwasser,
 Q_{HTM} = Gesamte Nutzenergie, die vom HTM200 geliefert wurde

3.3.3 Thermischer Komfort

Was die Lufttemperaturen der verschiedenen Wohnräume anbelangt, kann klar gesagt werden, dass mit Hilfe des HTM200 alleine nur die unteren Werte einer normalen Behaglichkeit erreicht werden können : Das HTM200 hat für ein so grosses Haus wie in Fully zu wenig Leistung, um sowohl die Warmwasserproduktion wie auch die Heizungswärme decken zu können. Das war zu erwarten. Ein

800 W_{el} starker Verdichter produziert eine thermische Leistung von ca. 2000 W_{th} . Dazu kommen noch ungefähr 500 W_{th} vom Erdregister. Auf der anderen Seite, rechnet man 300 W_{th} für die Warmwasserproduktion und 1300 W_{th} zur Deckung der Lüftungsverluste, dann bleiben nur 900 W_{th} für die Raumheizung (und eventuell noch zusätzlich 900 W_{th} , die durch die Elektro-Heizstäbe produziert werden können). Abb. 30 zeigt einen typischen wöchentlichen Verlauf der Temperaturen im Wohnraum (Mittelwert 20.5 °C) und in einem unbewohnten Zimmer im Obergeschoss (Mittelwert 17.7 °C). In der Abb. 31 werden die Klimadaten für die gleiche Winterwoche dargestellt.

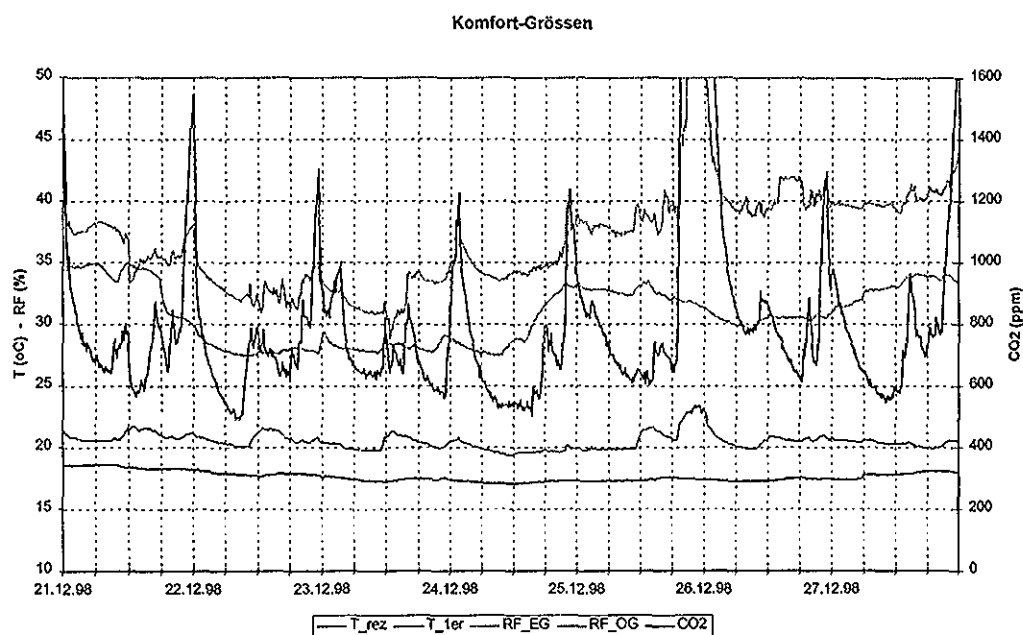


Abb. 30: Die Komfort-Grössen: Temperaturen, relative Feuchten und CO_2 -Gehalt

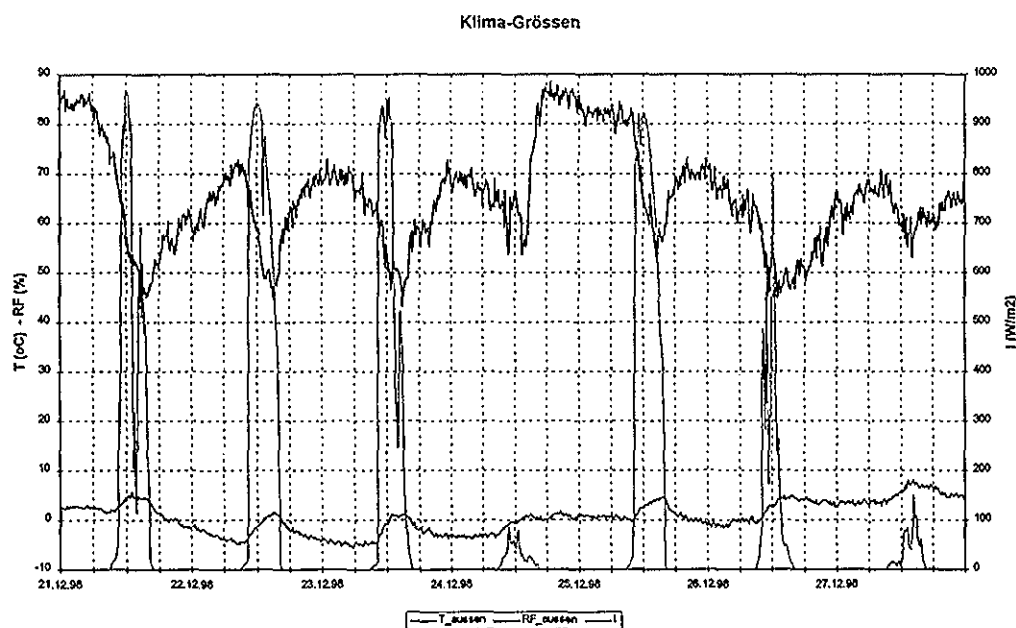


Abb. 31: Klima-Grössen: Temperatur aussen, relative Feuchte aussen und Sonneneinstrahlung vertikal Süd

3.3.4 Regelung Heizanlage

Da das HTM200 für das Haus in Fully eher unterdimensioniert ist, um den Gesamtwärmebedarf zu decken, ist zu erwarten, dass der Verdichter praktisch ununterbrochen läuft. In der untersuchten Messperiode ist er ca. 80 % der Zeit im Betrieb gewesen. Dies bedeutet aber nicht, dass die Zahl der Aus-/Einschaltvorgänge verschwindend klein ist. Pro Woche wird bis zu 15mal enteist, was zu einer Verdoppelung der Aus-/Einschaltungen führt. Die Abb. 32 zeigt einen typischen Verlauf des elektrischen Verbrauches des Verdichters während einer Winterwoche.

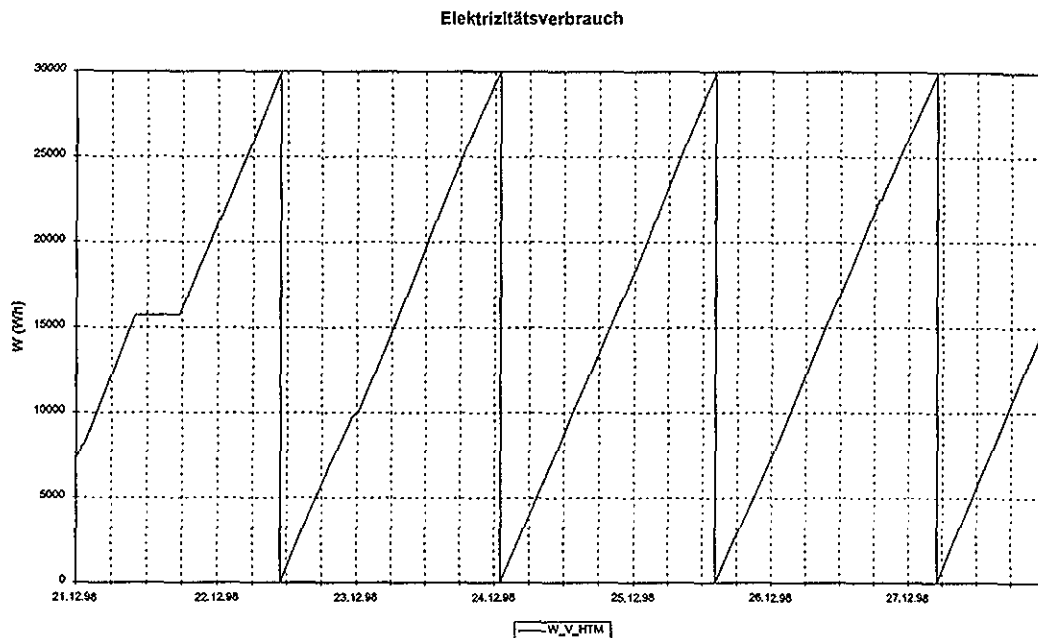


Abb. 32: Elektrischer Verbrauch des Verdichters des HTM200, fortwährend auffaddiert („Sägezahn“)

3.3.5 Warmwasser

Die Erwärmung des Warmwassers von ca. 50 kWh/Woche auf eine Temperatur von ca. 55 °C wird zu einem grossen Teil mit dem Heizregister (Kondensator) des HTM200 produziert. Zwischen dem 21. Dez. 98 und dem 18. April 99 wurden nur 10 % der gesamten Warmwassermenge durch den elektrischen Heizstab produziert.

3.3.6 Luftqualität

Zwei Grössen können verwendet werden, um die Luftqualität zu charakterisieren:
Die relative Feuchte und der CO₂-Gehalt.

- Relative Feuchte: Die innere Luft, die durch das HTM200 vorbereitet wird kann als trocken bezeichnen werden. Für die betrachtete Winterwoche, während der die Aussenluft im Mittel 0.5 °C kalt war und 65 % relative Feuchte enthielt, betrugen die wöchentlichen Mittelwerte für die relative Feuchte 37 % im Wohnraum und sogar nur 31 % im oberen unbewohnten Zimmer (Abb. 30). Grünpflanzen könnten zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit beitragen.
- CO₂-Gehalt: Für die letzte Woche 1998, die Weihnachtswoche, welche sicher eine ganz spezielle Woche im Bezug auf die Wohnverhältnisse darstellt, liegt der mittlere gemessene CO₂-Gehalt im Wohnraum bei 800 ppm (Abb. 30). Dieser Wert setzt sich zusammen aus einem Basisgehalt von 600 ppm, der während der meisten Stunden in der Woche auftritt, und Spitzenwerten am Abend von 1200 ppm, oder sogar ausnahmsweise von 2000 ppm. Das ist ein klares Indiz dafür, dass der Luftwechsel, den das HTM200 produziert ($n \approx 0.35$ 1/h), für die Normalstunden gut ausreicht, für die Spitzenstunden aber klar unzureichend ist.

4 WEITERE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Weitere Untersuchungen Schötz

Der Temperatursensor im Erdgeschoss wurde ungeschickt plziert, so dass er direkt von der Sonne beschienen wird. Eine Umplazierung ist ins Auge zu fassen, damit die Messdaten die Erwärmung der Raumluft wiedergeben und bessere Rückschlüsse auf den Komfort zulassen.

Der Temperatursensor der Aussenluft misst die Luft direkt vor der Wärmepumpe. Vor allem während der Abtauung wird diese Messung stark von der Wärmepumpe beeinflusst. Auch hier ist eine Umplazierung vorzusehen.

Die Heizumwälzpumpe wurde zu Beginn der Versuche direkt an die Stromversorgung angeschlossen, da eine Steuerung durch den Versuchsregler nicht vorgesehen war. Bei einem weiteren Versuch soll die Umwälzpumpensteuerung zusammen mit der Wärmepumpensteuerung zwischen den Reglern umgeschaltet werden können.

Der Warmwasserspeicher der Abluftwärmepumpe ist am Boden überhaupt nicht und im unteren Teil, wo der Kondensator anliegt, nur unzureichend isoliert. Zur Verbesserung der Jahresarbeitszahl muss die Isolation verstärkt werden.

4.2 Weitere Untersuchungen Fully

DIE WIRKUNG DES ERDREGISTERS

Aus der Abb. 33 ist es ersichtlich, dass während der Messperiode das Erdregister wöchentlich bis zu 112 kWh Wärme geliefert hat, was einer mittleren Leistung von rund 700 W_{th} entspricht. Auf der anderen Seite erkennt man, dass ab anfangs März praktisch keine Wärme mehr produziert wird, oder sogar ab anfangs April ein negativer Effekt auftritt: Es wäre sicher vorteilhaft, je nach Jahreszeit, das Erdregister z.B. mit einer Klappe (Bypass) umgehen zu können. Von Vorteil ist, dass das Erdregister während der ersten Winterhälfte bis zu 1 kW_{th} Wärme produziert.

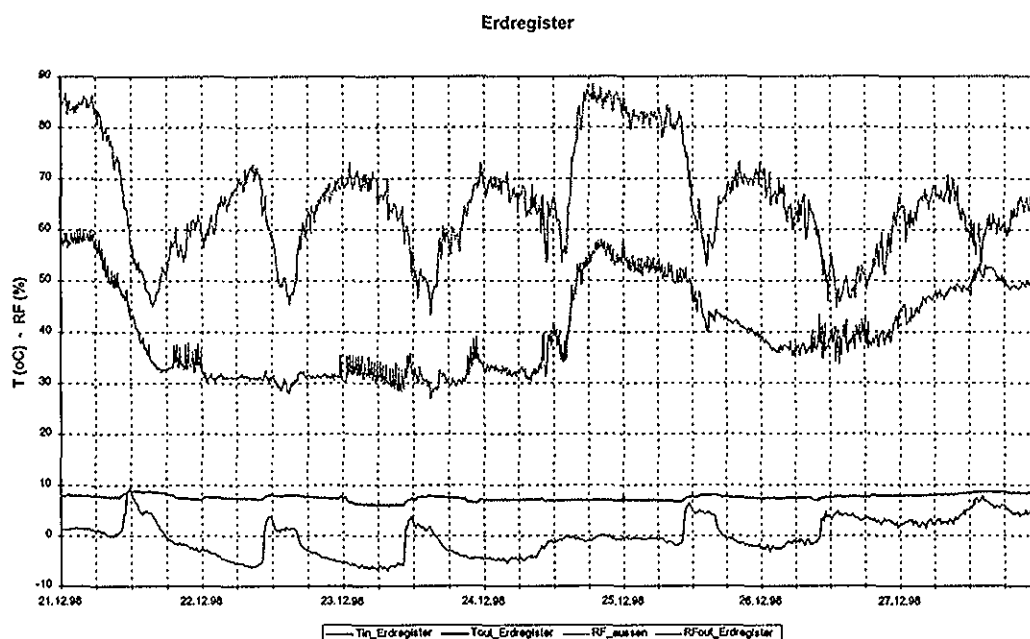


Abb. 33: Temperaturen und relative Luft-Feuchtigkeiten vor und nach dem Erdregister