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

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

Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Phase 3: Messungen an drei Funktionsmustern, Benutzereinfluss, Vergleich verschiedener Heiz- und Regelkonzepte

ausgearbeitet durch

Dr.Th.Afjei	**FHBB (Projektleitung)** afjei@fhbb.ch
Prof.W.Betschart	**HTA Luzern**
Prof.M.Bonvin	**EIV**
Prof.Dr.H.P.Geering	**IMRT-ETHZ**
S.Ginsburg	**IMRT-ETHZ**
P.Keller	**HTA Luzern**
Dr.E.Shafai	**IMRT-ETHZ**
D.Wittwer	**WinMarkt**
Prof.G.Zweifel	**HTA Luzern**

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2000 Schlussbericht

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Energie (BFE) Prof. Dr. M. Zogg Leiter Forschungsprogramm UAW Kirchstutz 3 3414 Oberburg	Projektbegleiter Email: martin.zogg@bluewin.ch
Beauftragter:	Fachhochschule beider Basel FHBB (Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung INFEL, bis 31.1.2000) Dr. Th. Afjei Prof. A. Binz Institut für Energie FHBB St. Jakobs-Strasse 84 4132 Muttenz	 Projektleiter stv. Projektleiter Email: t.afjei@fhbb.ch
Projektgruppe:	Ingenieurschule Wallis EIV Route du Rawyl 47 1950 Sion 2	Messungen an Pilotanlage 3 Email: michel.bonvin@eiv.ch
	ETH-Zürich Institut für Mess.- und Regeltechnik Prof. Dr. H.P. Geering Dr. E. Shafai, S. Ginsburg R.Wimmer ETH-Zentrum, ML K39 8092 Zürich	Regler Email: shafai@imrt.mavt.ethz.ch
	Hochschule für Technik und Architektur Fachhochschule Zentralschweiz Prof. W. Betschart, Prof. G. Zweifel P. Keller Abteilung HLK 6048 Horw	Messungen an Pilotanlagen 1 und 2 Email: gzweifel@hta.fhz.ch
	Pentiaq AB CarlAxel Boman P.O. Box 7 S-801 02 Gävle	Passiv-Tracergas-Messung
	WinMarkt Dieter Wittwer Seefeldstrasse 5a 8008 Zürich	Wirtschaftlichkeit / Marktpotenzial Email: mail@winmarkt.com
Beteiligte Firmen:	CTA AG, 3110 Münsingen	marco.andreoli@cta.ch
	Soltherm AG, 8852 Altendorf	soltherm@z-online.ch
	Sintro AG, 3800 Unterseen	o.schaerz@swissonline.ch
	A. Piatti AG, 8305 Dietlikon	map@piatti.net
	Renggli AG, 6247 Schötz	mail@renggli-haus.ch

Zusammenfassung

Niedrigenergiehäuser mit weniger als 160 MJ/m²a Endenergieverbrauch stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung. Dazu gehören ein deutlich geringerer Heizwärmebedarf gegenüber SIA-Grenzwertbauten, ein grösserer Energieanteil für Wassererwärmung und Hilfsaggregate und die Notwendigkeit einer Lufterneuerungsanlage. In den beiden vorangegangenen Projektphasen wurde das Verhalten des Gesamtsystems Wärmeerzeugung&Gebäude mit umfangreichen Simulationen untersucht. Ziel war, ein hohes Mass an Komfort möglichst umweltgerecht und ökonomisch zu erreichen.

In dieser dritten Projektphase wurden drei Pilotanlagen während zwei Jahren detailliert gemessen. Dabei konnten die in den ersten beiden Phasen gewonnenen theoretischen Erkenntnisse in der Praxis erprobt und neue Regelkonzepte getestet werden. Mit den drei Anlagen sollen Wissenslücken über Heizkonzepte und die Regelbarkeit von Niedrigenergiehäusern geschlossen werden.

In den Heizperioden 98/99 und 99/00 wurden die folgenden Varianten gemessen:

1. Erdsonden-Wärmepumpe mit Beistellboiler und Einzelraumlüftungsgerät in einem Holz-Leichtbauhaus nach Minergie-Standard in Grafstal, Kt. ZH.
2. Luft/Wasser-Heizwärmepumpe und separate Abluft-Warmwasser-Wärmepumpe in einem Holz-Leichtbauhaus nach Minergie-Standard in Schötz, Kt. LU.
3. Luft/Luft-Wärmepumpe (Haustechnikmodul) mit Luft-Erdregister für Heizung und Wassererwärmung in einem Massivbauhaus nach Minergie-Standard in Fully, Kt. VS.

Zum Systemvergleich wurden die Kennzahlen Wärmeerzeugungsnutzungsgrad WNG und Systemnutzungsgrad SNG gebildet. Der WNG dient zur Beurteilung der Effizienz der Wärmeerzeugung und bildet die Vergleichsgrösse zum Jahresnutzungsgrad von fossilen Heizkesseln. Demzufolge sind keine Umwälzpumpen für die Wärmeverteilung, keine Lüftungsventilatoren, keine Energiegewinne durch die Wärmerückgewinnung und keine thermischen Speicher- und Verteilverluste enthalten. Der SNG ermöglicht die energetische Beurteilung des gesamten Haustechniksystems (Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Lüftung, WRG) und eignet sich für den Vergleich von unterschiedlichen Systemkonzepten bei einer vorgegebenen Luftwechselrate und einem Norm-Warmwasserverbrauch.

Die Anlagen in Grafstal und Schötz wurden mit einer einfachen und kostengünstigen Hydraulikschaltung realisiert. Auf Pufferspeicher, Heizstäbe, Dreiwegemischer und Thermostatventile wurde verzichtet. Sie funktionierte in allen Betriebsphasen einwandfrei. Bei der Anlage in Fully (Haustechnikmodul) konnten auch nach umfangreichen Umrüstungen nicht alle Kinderkrankheiten beseitigt werden. Der über eine Jahresperiode gemessene WNG für den Heizbetrieb (Warmwasserbetrieb in Klammern) betrug in Grafstal 4,8 (2,8) und in Schötz 3,0 (2,3). Für die gesamte Wärmeerzeugung ergaben sich Systemnutzungsgrade von 3,6 (Grafstal) und 2,5 (Schötz). Darin sind die Heizumwälzpumpe, die Ventilatoren für die Lufterneuerung und die Bereitschaftsverluste des Warmwasserboilers berücksichtigt. Das Haustechnikmodul in Fully wurde Ende 1999 durch ein verbessertes Aggregat ersetzt, bei dem ein WNG von 2,9 und ein SNG von 2,5 gemessen wurde. Nicht berücksichtigt wurde dabei der Beitrag des im Boden direktkondensierenden Zusatzmoduls, das wegen technischer Schwierigkeiten kaum funktionierte. Da eine reine Luftheizung für ein Haus nach Minergiestandard nicht ausreicht, kann das in Fully eingesetzte System in dieser Form nicht empfohlen werden.

Die Aufnahmeleistung der Solepumpe in Grafstal konnte nach Ersatz durch eine kleinere Pumpe und Laminarbetrieb der Sonde um den Faktor 3 reduziert werden. Nach Abschalten des in Schötz installierten Heizbandes betrug der elektrische Energiebezug für die Wassererwärmung weniger als die Hälfte.

An der Anlage in Schötz sind zusätzlich zum handelsüblichen Zweipunktregler drei neue Regelkonzepte mit Pulsbreitenmodulation getestet worden. Anstelle eines Ein/Aus-Schaltvorgangs über einen Temperatursollwert wird bei der Pulsbreitenmodulation der Energieverbrauch für einen Tag im voraus berechnet. Die Wärme wird dem Haus in mehreren Pakten zu definierten Zeitpunkten zugeführt. Auf einen Raumtemperaturfühler wurde verzichtet. Bei allen Reglern konnte die Raumtemperatur mit einer auf die Aussentemperatur bezogenen Standardabweichung von 0,2-0,3 K ausreichend genau konstant gehalten werden. Beim Zweipunktregler war die auf die Heizgradtage bezogene Heizenergie am

niedrigsten. Hierzu ist anzumerken, dass der eingesetzte Zweipunktregler über einen Raumtemperaturfühler die Heizanlage bei Überschreiten einer Grenztemperatur abschaltete.

Für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit wurden aus Investitions-, Betriebs- und Energiekosten die Jahreskosten berechnet. Es zeigte sich, dass die Erdsondenwärmepumpe die teuerste und die Luft/Luft-Wärmepumpe die günstigste Variante ist. Bei der Luft/Luft-Wärmepumpe wurden die Kosten für ein handelsübliches Kombigerät in einem Passivhaus zugrundegelegt. Der bauseitige Mehraufwand für die zusätzlichen Dämmmassnahmen eines Passivhauses wurde dabei nicht berücksichtigt.

Die resultierenden verallgemeinerbaren Aussagen werden in einem technischen Handbuch [NTH4 00a] und in einer Bauherrenbroschüre [NTH4 00b], Teile der Phase 4, niedergelegt. Nähere Informationen zum Projekt sind auf dem Internet abrufbar unter:

http://www.waermepumpe.ch/fe/projekte/nth

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

Abstract

Low energy houses with an energy consumption of less than 160 MJ/m^{2}a set new requirements on the heat generation, as a significant lower space heating demand compared with the existing building standard of the Swiss Association of Engineers and Architects (SIA), a greater energy ratio for the hot water production and auxiliaries and the necessity to install a mechanical air ventilation system. Within the two previous project phases the behavior of the complete system consisting of "heat generation & building" have been investigated by comprehensive simulations. The aim of this project phases were to reach a high level of comfort in an ecological and economical feasible way.

Hence in this third project phase, measuring values of three pilot installations have been collected for a period of two years. Thereby the theoretical findings of the first two project phases could be tested in practice and new control concepts could be evaluated. With the help of this three pilot installations knowledge gaps in regard to heating concepts and controllability of low energy houses are to be closed.

Within the heating period of 98/99 and 99/00 the following heating systems have been measured:

1. Earth-coupled heat pump with indirectly heated hot water storage and single room air exchange unit installed in a light wood construction building according to the Minergy Standard in Grafstal, canton Zurich, Switzerland.
2. Air/water heat pump for space heating and separate exhaust air heat pump water heater installed in a light wood construction building according to the Minergy Standard in Schötz, canton Lucerne, Switzerland.
3. Air/air heat pump (house module) comprising of an earth pipe collector for air and tap water heating installed in a heavy weight construction building according to the Minergy Standard in Fully, canton Valais, Switzerland.

To compare the systems with characteristic key values "heat generation efficiency WNG" and "overall system efficiency SNG" have been created. The WNG is used to evaluate the efficiency of the heat generation and represents the characteristic compare value to the annual efficiency of fossil heaters. Hence no circulating pumps for heat distribution, no fans, nor energy gains by heat recovery and no thermal losses of storage and distribution are included. The SNG makes it possible to evaluate the complete system consisting of heat generation, heat distribution, ventilation and heat recovery. It is suitable to compare different system concepts with a defined air exchange rate and a standardized hot water consumption.

The installations in Grafstal and Schötz were realized by a simple and cost effective hydraulic scheme without buffer storage, three-way mixers and thermostatic valves. Both installations worked within all operation phases without problems. The installation in Fully (house module) did not run perfectly even after comprehensive modifications. The annual WNG for the heating operation (the WNG of the hot water operation is given in parentheses) was in Grafstal 4,8 (2,8) and in Schötz 3,0 (2,3). The overall system efficiencies SNG for the complete heat generation were in Grafstal 3,6 and in Schötz 2,5. Therein the pump for heat distribution, the fans for the air exchange and the stand by losses of the hot water storage are considered as well. By the end of 1999 the house module in Fully was replaced by an improved unit; thus for the winter period a WNG of 2,9 and a SNG of 2,5 have been recorded. Not included is the contribution of the backup unit, direct condensing in the floor, due to its technical problems. For a house according to the Minergy Standard a pure air heating system is insufficient. Thus the system installed in Fully cannot be recommended in this form.

The power demand of the brine pump in Grafstal was reduced by a factor of 3 after replacing it by a smaller pump and a laminar flow operation of the bore hole heat exchanger. After shutting down the heating belt installed in Schötz the electrical energy consumption for water heating was less than half.

Additionally to the market usual two point controller three new controlling concepts with pulse width modulation have been tested in Schötz. When using the pulse width modulation controller the energy consumption for a day period is calculated in advance instead of the ON/OFF switching initiated by a set temperature level. The heat is supplied to the house in several portions at defined times. A room temperature sensor was not used. All controllers could keep the room temperature sufficiently constant with a standard deviation of 0,2-0,3 K corrected by the outside temperature deviations. The heat-

ing energy consumption referring to meteorological conditions (Heating Degree Days) was the lowest when using the two point controller. In addition to this it has to be noted that the installed two point controller used a room temperature sensor to switch off the heating system when reaching a maximal temperature limit.

To investigate the economy the yearly costs were calculated by investment , operation and energy costs. The results show that the earth coupled heat pump was the most expensive system whereas the air/air heat pump was the most inexpensive one. The cost calculations of the air/air heat pump are based on a market usual unit suitable for passive houses, combining ventilation, tap water and space heating. Expenses for additional insulation of the building envelope according to the passive house standard were not considered.

The resulting findings and statements are published in a technical handbook [NTH4 00a] and a builder brochure [NTH4 00b], part of project phase 4. Detailed information about the project is available on internet under:

http://www.waermepumpe.ch/fe/projekte/nth

This work arose under contract to the Swiss Federal Office of Energy. The authors of this report are solely responsible for its contents and their conclusions.

Inhaltsverzeichnis

1 ZIELSETZUNG 1

2 LÖSUNGSWEG 2

2.1 PILOTANLAGE 1: GRAFSTAL 2
2.1.1 Haustechnik Grafstal 3
2.1.2 Messkonzept Grafstal 6
2.2 PILOTANLAGE 2: SCHÖTZ 7
2.2.1 Haustechnik Schötz 8
2.2.2 Messkonzept Schötz 11
2.2.3 Messdatenerfassung 12
2.3 PILOTANLAGE 3: FULLY 12
PILOTANLAGE 3 IN FULLY 12
2.3.1 Haustechnik Fully 13
2.3.2 Messkonzept Fully 15
2.3.3 Messstellenplan Fully 16

3 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN 17

3.1 MESSUNGEN UND BERECHNUNGSMETHODEN 17
3.1.1 Systemgrenzen und Definition der Kennzahlen 17
3.1.2 Luftwechsel-Messungen Grafstal und Schötz 18
3.1.3 Energieflüsse Pilotanlage Grafstal 19
3.1.4 Energieflüsse Pilotanlage Schötz 20

4 GEWONNENE ERKENNTNISSE 21

4.1 ERGEBNISSE GRAFSTAL 21
4.1.1 Energiebilanzierung Grafstal 21
4.1.2 Kennzahlen Grafstal 22
4.1.3 Komfort mit/ohne Einzelraumlüftung Grafstal 23
4.1.4 Luftqualität und Tracergasmessungen Grafstal 25
4.1.5 Tracergasmessung 27
4.1.6 Mauerventile 28
4.1.7 Regelung Heizanlage Grafstal 28
4.1.8 Warmwasser Grafstal 29
4.2 ERGEBNISSE SCHÖTZ 31
4.2.1 Energiebilanzierung Schötz 31
4.2.2 Kennzahlen Schötz 35
4.2.3 Luftqualität und Tracergasmessungen Schötz 36
4.2.4 Warmwasser Schötz 40
4.3 ERGEBNISSE FULLY 42
4.3.1 Energieflussdiagramm Fully 42
4.3.2 Überblick der gemessenen Größen 42
4.3.3 Kennzahlen Fully 45
4.3.4 Regelung Heizanlage Fully 46
4.3.5 Warmwasser Fully 47
4.3.6 Luftqualität Fully 47
4.3.7 Thermischer Komfort 47
4.3.8 Erdregister 49
4.4 ERPROBUNG VERSCHIEDENER REGLERTYPEN 50
4.4.1 Modell der Gebäudedynamik 50
4.4.2 Funktionsprinzip der Pulsbreitenmodulation 52
4.4.3 Beobachterbasierter Regler 54
4.4.4 Energiekennlinienbasierte Steuerung 55
4.4.5 LQ-optimierte Steuerung mit Prädiktion der Aussentemperatur 56
4.4.6 Einbau der Reglerhardware 57
4.4.7 Vergleich der Regelungskonzepte 58
4.4.8 Vergleich 63

4.4.9 Fazit ... *64*

5 MARKETINGKONZEPT ... **65**

5.1 ZIELGRUPPE UND MARKTPOTENTIAL ... 65
5.2 OEKONOMIE ... 65
5.2.1 Kostensituation (Stand 1999) ... *65*
5.2.2 Kostensituation von morgen ... *66*
5.3 PRO/CONTRA DER VERSCHIEDENEN SYSTEME ... 67
5.4 ARGUMENTARIUM ... 67

6 WESENTLICHE ERKENNTNISSE AUS DEM PROJEKT ... **68**

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN ... **70**

8 SYMBOLVERZEICHNIS ... **71**

9 LITERATURLISTE ... **76**

10 ANHANG ... **79**

10.1 VERWENDETE MESSGERÄTE UND SENSOREN ... 79
10.2 GEMESSENE UND BERECHNETE GRÖSSEN IN GRAFSTAL ... 80
10.2.1 Gemessene Energieflüsse ... *80*
10.2.2 Berechnete Energieflüsse ... *80*
10.2.3 Temperaturen ... *82*
10.2.4 Luftqualität ... *83*
10.3 GEMESSENE UND BERECHNETE GRÖSSEN IN SCHÖTZ ... 84
10.3.1 Gemessene Energieflüsse Schötz ... *84*
10.3.2 Berechnete Energieflüsse Schötz ... *84*
10.3.3 Temperaturen Schötz ... *86*
10.3.4 Luftqualität Schötz ... *86*
10.4 ANNAHMEN FÜR DEN KOSTENVERGLEICH ... 87
10.4.1 Kostenzusammenstellung für Ölheizung mit Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem ... *87*
10.4.2 Kostenzusammenstellung für Luft/Wasser-WP-Heizung mit Abluft-Wärmepumpe zur Wassererwärmung ... *88*
10.4.3 Kostenzusammenstellung Gasheizung mit Beistellboiler und Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem (WRG) ... *89*
10.4.4 Kostenzusammenstellung Holzheizung mit Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem Eco Confort (WRG) ... *90*
10.4.5 Kostenzusammenstellung Luft/Luft-Kombigerät für Heizung, Lüftung und Wassererwärmung im Passivhaus ... *91*
10.4.6 Kostenzusammenstellung Sole/Wasser-WP-Heizung mit Beistellboiler und Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem (WRG) ... *92*
10.5 SCHLUSSBERICHT DER LUFTWECHSELMESSUNGEN MIT DER PASSIV-TRACERGAS-METHODE 93

1 ZIELSETZUNG

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit weniger als 160 MJ/m^{2}a Endenergie oder Passivhäuser, welche nur mit einer Luftheizung auskommen, stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung und erfordern eine Lufterneuerungsanlage. Der schweizerischer MINERGIE-Standard und die kommende, deutsche Energieeinsparverordnung EnEV zielen in diese Richtung. 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 kostengünstig zu erfüllen.

Gebäude mit einem tiefen Heizenergiebedarf sind prädestiniert für den Einsatz von Niedrigtemperaturheizungen und die Nutzung von Umbegungswärme. Im Forschungsprojekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" des Bundesamtes für Energie wurden seit 1996 verschiedene Aspekte von Niedrigenergie- und Passivhäusern untersucht, worin Gebäude und Haustechnik als Einheit aufgefasst werden.

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, werden Messungen an 3 Funktionsmustern durchgeführt. 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 wurden in einem technischen Handbuch [NTH4 00a] niedergelegt. Zusätzlich wurde im Auftrag der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz eine Bauherrenbroschüre erstellt [NTH4 00b].

2 LÖSUNGSWEG

2.1 Pilotanlage 1: Grafstal

Anlagenkonzept		Erdsondenwärmepumpe mit Beistellboiler
Bauweise		Grosstafel-Holz-Leichtbau
Standort		8310 Grafstal (ZH)
Höhe über Meer		495 m
Heizgradtage $HGT_{12/20}$		3308 (K Tage)/a
Energiebezugsfläche		174 m^2
Nettovolumen		390 m^3
U-Werte:	Wand	0.35 W/(m^2K)
	Dach	0.26 W/(m^2K)
	Fenster	1.4 W/(m^2K)
Fensterflächen:	Süd	14.8 m^2
	Ost	7.14 m^2
	Nord	0 m^2
	West	3.5 m^2
Gebäudewärmebedarf (t_i = 22 °C)		328 MJ/(m^2a)
Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis (γ)		2.9
Temperaturen:	beheizt (EG, OG, DG)	22 °C
	unbeheizt (Keller)	13 °C
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 (20/-11°C)		215 MJ/(m^2a)
Heizwärmebezug (22/-11°C)		208 MJ/(m^2a)
Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 (20/-11°C)		5.0 kW
Wärmeleistungsbezug (22/-11°C)		4.3 kW
Vorlauf / Rücklauftemperatur:	Auslegung	30/25°C
	real	34/29°C
Sole/Wasser-WP:	Heizleistung B0/W35	4.9 kW / COP 4.6
	Heizleistung B0/W50	4.6 kW / COP 2.9
Erdwärmesonde:	Sole	Ethylenglykol (21%)
	Sondenart	32 mm doppel-U
	Bohrtiefe	100 m
Warmwasser:	Temperatur	50 °C
	Bezug	38 Liter/(Person Tag)
Leistungsaufnahmen:	Heizungspumpe	49 W
	Solepumpe	69 W
Einzelraumlüftungsgerät:	Leistungsaufnahme	8 W
	Abluftvolumenstrom	ca. 30 m^3/h
	Temperatur-Änderungsgrad (gem. Hersteller)	ca. 50%

Tab. 1: Planungs- und Auslegedaten Grafstal

Die Pilotanlage steht in Grafstal, einem kleinen Weiler in der Nähe von Effretikon im Kanton Zürich, mitten in einer Reiheneinfamilienhaus-Überbauung mit „NOAH[1]-Systemhäusern". Die Gebäude sind in Grosstafel-Holz-Leichtbauweise gefertigt. Die Messungen wurden in einem Eckhaus mit drei beheizten Geschossen und einem unbeheizten Keller durchgeführt. Im Erdgeschoss befinden sich die

[1] NOAH ist ein eingetragene Marke der Häring AG, welche von der A. Piatti AG in Lizenz gefertigt wurde

Küche, das Wohnzimmer und ein Separat-WC. Im ersten Obergeschoss ist das Elternschlafzimmer, ein Kinderzimmer und das Bad und im Dachgeschoss sind noch weitere 3 Zimmer untergebracht.



Abb. 1: Pilotanlage Grafstal

2.1.1 Haustechnik Grafstal

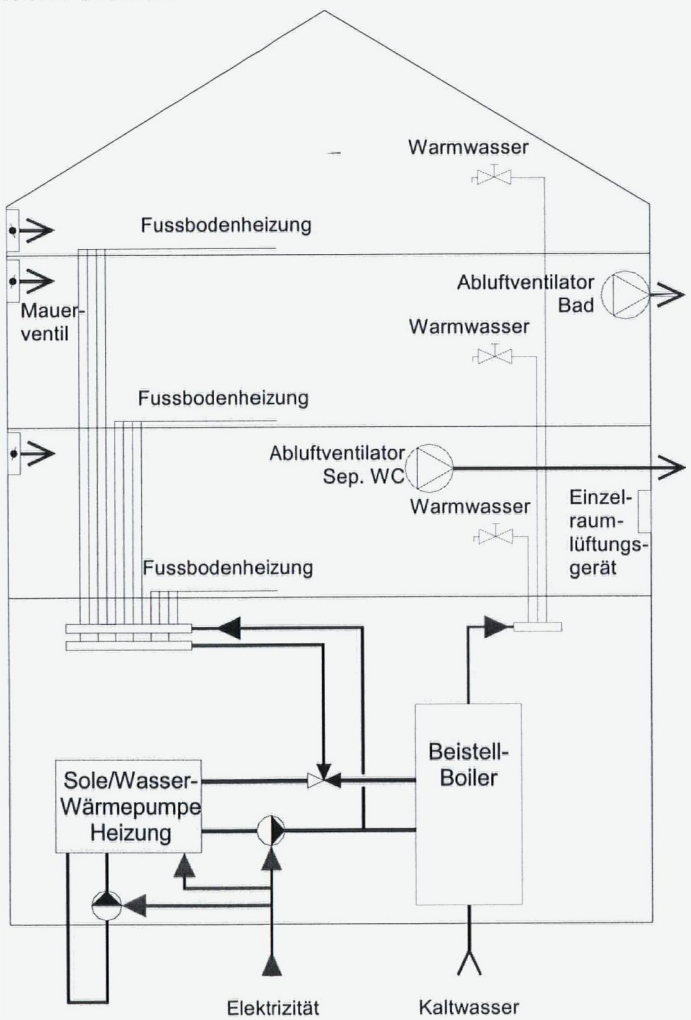


Abb. 2: Systemschema Haustechnik Grafstal

Die Haustechnik ist im unbeheizten Keller untergebracht. Der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser wird mit einer Erdsonden-Wärmepumpe gedeckt, welche primärseitig über einen Solekreislauf Wärme aus dem Erdreich bezieht. Die Wärmepumpe ist direkt in den Heizungskreislauf eingebunden und machte dadurch den Einbau eines Pufferspeichers und eines Mischventils mit der entsprechenden Regelung überflüssig. Einzig zur Umstellung von Heiz- auf Warmwasserbetrieb wird ein Dreiwegumschaltventil benötigt.

Raumheizung

Die Wärmepumpe wird mit einer aussentemperaturgeführten Rücklaufregulierung ein- und ausgeschaltet. Die Wärmeabgabe erfolgt über eine reine Fussbodenheizung bei 34°C Vorlauf- und 29°C Rücklauftemperatur. Dank dieser tiefen Temperaturen ist der Selbstregelungseffekt der Fussbodenheizung besonders ausgeprägt und es kann auf Thermostatventile und Raumfühler verzichtet werden. Unter dem Selbstregeleffekt versteht man die automatische Abnahme der Heizleistung bei steigender Raumlufttemperatur. Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Heizwasser und Raumtemperatur, desto ausgeprägter ist der Selbstregeleffekt.

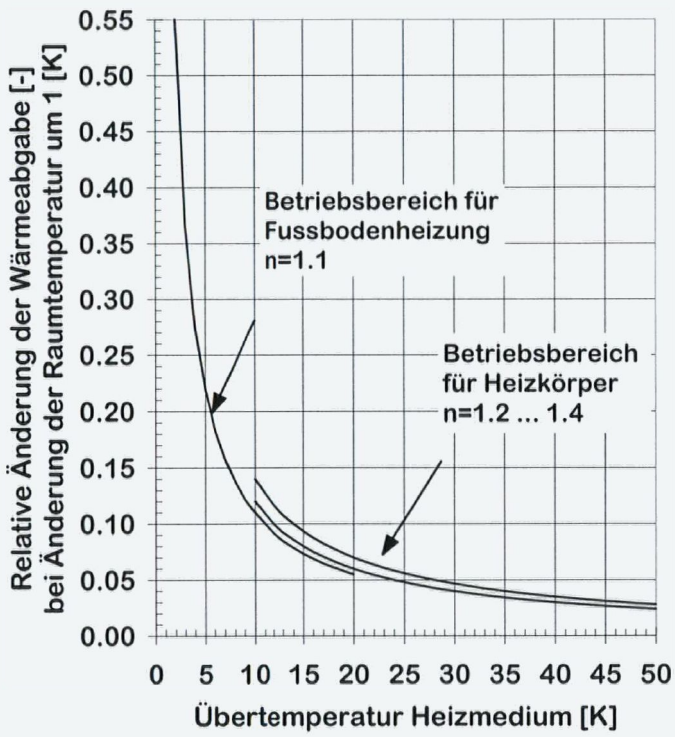


Abb. 3: Selbstregeleffekt von Wärmeabgabesystemen (bei Übertemperaturänderung von 1 K)

Warmwasseraufbereitung

Einmal pro Tag, um Mitternacht, wird das Warmwasser auf 50 °C aufgeheizt. Zur Warmwasseraufbereitung wird die Heizwassertemperatur der Wärmepumpe auf 55 °C angehoben. Mit dem Dreiwegumschaltventil wird der Raumheizungskreislauf vom Wärmeerzeuger getrennt und das Heizwasser durch ein Heizregister im Beistellboiler geführt. Dank der hohen Speicherfähigkeit der Fussbodenheizung kann die Raumtemperatur trotz des Unterbruches von ca. 2 Stunden auf dem Sollwert gehalten werden.

Kontrollierte Wohnungslüftung

Von Haus aus wird bei den „NOAH-Systemhäusern" auf eine mechanische Lüftungsanlage verzichtet. Bei der Pilotanlage wurde jedoch nachträglich im Wohnzimmer (EG) ein Einzelraumlüftungsgerät mit

WRG installiert. In den Obergeschossen wurden in den Zimmern an geeigneten Stellen Mauerventile eingebaut. Über einen Abluftventilator im Badezimmer im 1. Obergeschoss wird eine Querlüftung erzeugt und die verbrauchte Abluft wird aus den beiden Obergeschossen abgesogen und ins Freie geführt. Durch den dabei entstehenden Unterdruck im Gebäude strömt frische Aussenluft durch die Mauerventile kontrolliert ins Gebäude.

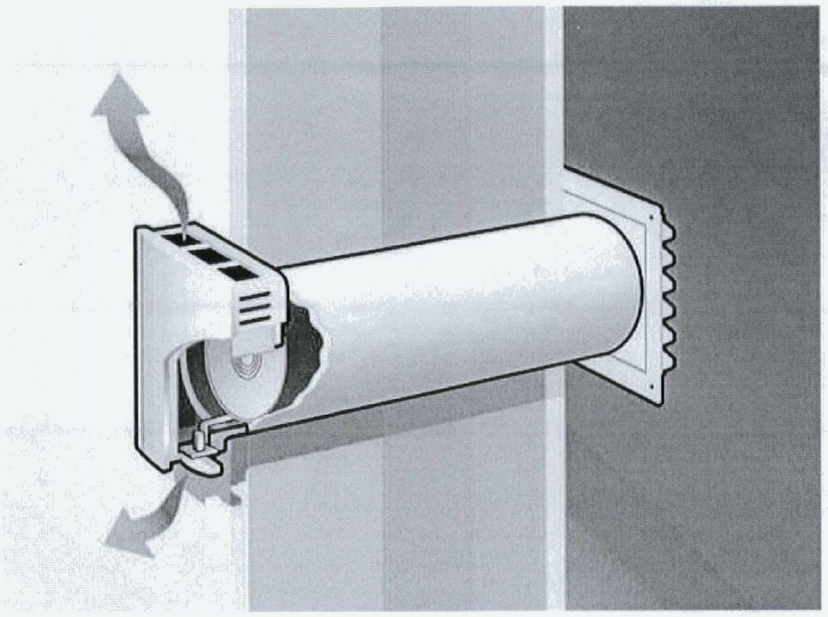


Abb. 4: Über das Mauerventil strömt die Aussenluft kontrolliert in den Wohnraum

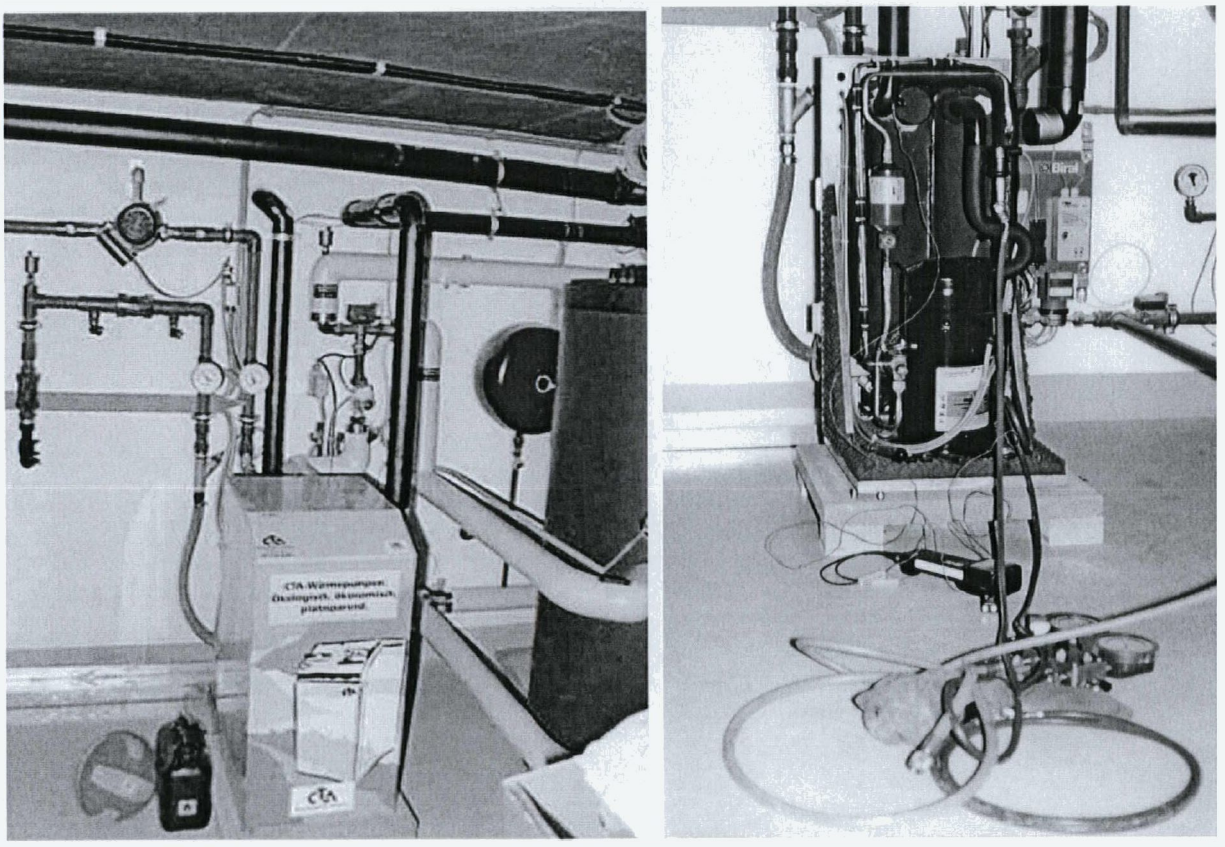


Abb. 5: Bild Erdsonden-Wärmepumpe mit Beistellboiler in Grafstal; rechts: Inbetriebnahme mit Füllstation und Druckanzeigegeräten

2.1.2 Messkonzept Grafstal

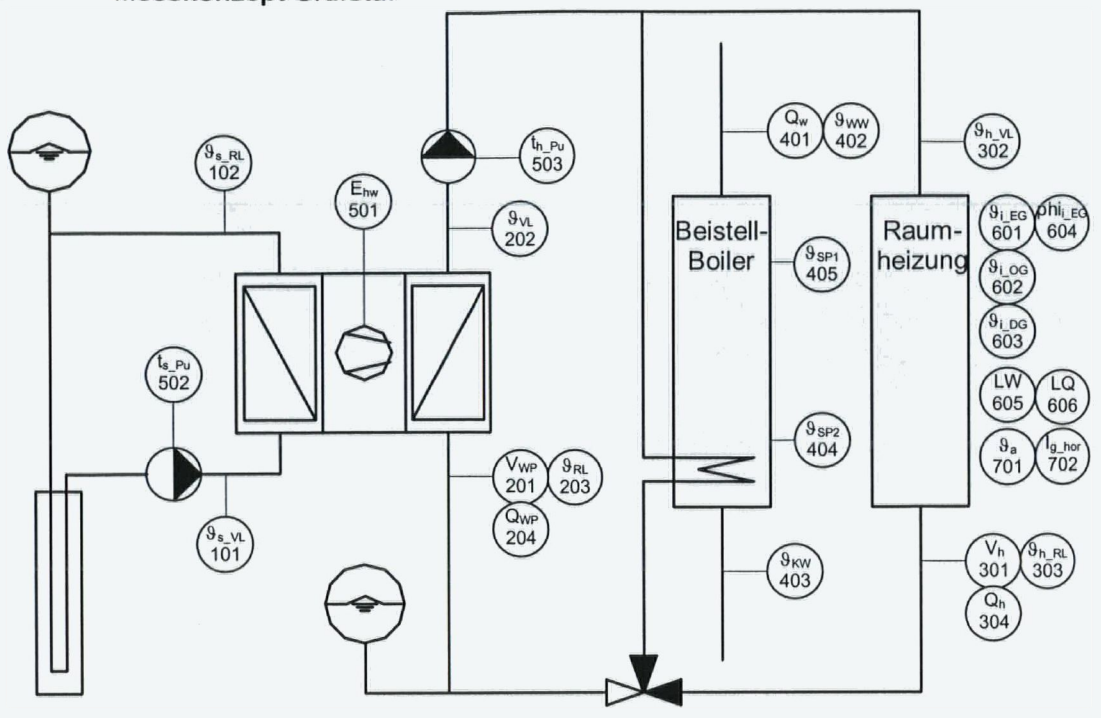


Abb. 6: Messschema Grafstal

Pos.	Symbol	Einheit	Messgrösse	Messprinzip	Genauigkeit
101	ϑ_{s_VL}	°C	Vorlauftemperatur Sole	PT100	± 0.5 K
102	ϑ_{s_RL}	°C	Rücklauftemperatur Sole	PT100	± 0.5 K
201	V_{WP}	m^3/s	Durchfluss Heizung und Warmwasser	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
202	ϑ_{VL}	°C	Vorlauftemperatur Heizung und Warmwasser	PT100	± 0.5 K
203	ϑ_{RL}	°C	Rücklauftemperatur Heizung und Warmwasser	PT100	± 0.5 K
204	Q_{WP}	kWh	Heizwärme Wärmepumpe	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
301	V_h	m^3/s	Durchfluss Heizung	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
302	ϑ_{h_VL}	°C	Vorlauftemperatur Heizung	PT100	± 0.5 K
303	ϑ_{h_RL}	°C	Rücklauftemperatur Heizung	PT100	± 0.5 K
304	Q_h	kWh	Heizwärmebezug	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
401	Q_w	kWh	Wärmebezug für Warmwasser	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
402	ϑ_{WW}	°C	Temperatur Warmwasser	PT100	± 0.5 K
403	ϑ_{KW}	°C	Temperatur Boilerzuleitung	PT100	± 0.5 K
404	ϑ_{SP2}	°C	Oberflächentemperatur Speicher unten	PT100	± 0.5 K
405	ϑ_{SP1}	°C	Oberflächentemperatur Speicher oben	PT100	± 0.5 K
501	E_{hw}	kWh	Energiebezug Heizung und Warmwasser	Energiemesser	Klasse 2 (IEC1036)
502	t_{S_Pu}	h	Laufzeit Solepumpe	Relais*	± 2%v.MW**
503	t_{h_Pu}	h	Laufzeit Heizungspumpe	Relais*	± 2% v.MW**
601	ϑ_{i_EG}	°C	Raumlufttemperatur Erdgeschoss	PT100	± 0.5 K
602	ϑ_{i_OG}	°C	Raumlufttemperatur Obergeschoss	PT100	± 0.5 K
603	ϑ_{i_DG}	°C	Raumlufttemperatur Dachgeschoss	PT100	± 0.5 K
604	phi_{i_EG}	%r.F	Relative Feuchtigkeit Erdgeschoss	Kapazit. Sensor	± 2.5%r.F
605	LW	h^{-1}	Luftwechsel (Passiv Tracergas-Messung)		
606	LQ	ppm	CO_2-Konzentration (Luftqualität)	CO_2 Fühler	± 2% v.MW**
701	ϑ_{AL}	°C	Aussenlufttemperatur	PT100	± 0.5 K
702	I_{g_hor}	W/m^2	Globalstrahlung horizontal	Silizium Pyra-nometer	± 1%v.MW**

* Während der Betriebszeit wird über ein Relais ein Spannungssignal von 5 Volt auf den Datenlogger gegeben.
** vom Messwert

Tab. 2: Messstellenplan Grafstal

2.2 Pilotanlage 2: Schötz

Anlagenkonzept		Luft/Wasser-Heizwärme-pumpe und separater Abluft-WP-Boiler
Bauweise		Grosstafel-Holz-Leichtbau
Standort		6247 Schötz (LU)
Höhe über Meer		508 m
Heizgradtage $HGT_{12/20}$		3294 (K Tage)/a
Energiebezugsfläche		155 m^2
Nettovolumen		365 m^3
U-Werte:	Wand	0.18 W/(m^2K)
	Dach	0.2 W/(m^2K)
	Fenster	1.3 W/(m^2K)
Fensterflächen:	Süd	14.9 m^2
	Ost	5.8 m^2
	Nord	1.1 m^2
	West	10.9 m^2
Gebäudewärmebedarf (t_i = 23°C)		350 MJ/(m^2a)
Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis (γ)		3.22
Temperaturen:	beheizt (EG und OG)	23 °C
	unbeheizt (Keller)	16 °C
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 (20/-9°C, n = 0.3h^{-1})		181 MJ/(m^2a)
Heizwärmebezug (23/-9°C)		242 MJ/(m^2a)
Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 (20/-9°C)		3.64 kW
Wärmeleistungsbezug (23/-9°C)		4.1 kW
Vorlauf / Rücklauftemperatur:	Auslegung	30/25°C
	real	35/30°C
Luft/Wasser-WP:	Heizleistung A7/W35	7.2 kW / COP 4.0
	Heizleistung A-7/W35	4.6 kW / COP 2.5
Leistungsaufnahme Heizungspumpe		69 W
Abluft-WP-Boiler:	Heizleistung A20W50	1000 W
	Leistungsaufnahme (inkl. Abluftventilator)	408 W
Warmwasser:	Temperatur	50 °C
Bezug		57 Liter/(Person Tag)
Leistungsaufnahme Abluftventilator		48 W
Abluftmenge		140 m^3/h

Tab. 3: Planungs- und Auslegedaten Schötz

Die im Herbst 1998 fertiggestellte Liegenschaft liegt in Schötz, einer kleinen Ortschaft im Luzerner Hinterland. Das freistehende Einfamilienhaus ist ein Leichtbau aus Holz und wird beim Hersteller in Grosstafel-Bauweise vorgefertigt und auf der Baustelle fertiggestellt. Es umfasst drei Geschosse, das unbeheizte Untergeschoss, das Erdgeschoss mit der Küche, dem Wohn- und Esszimmer sowie einem Separat-WC und das Dachgeschoss mit zwei Kinderzimmer, einem Elternschlafzimmer und einem Badezimmer.



Abb. 7: Pilotanlage Schötz

2.2.1 Haustechnik Schötz

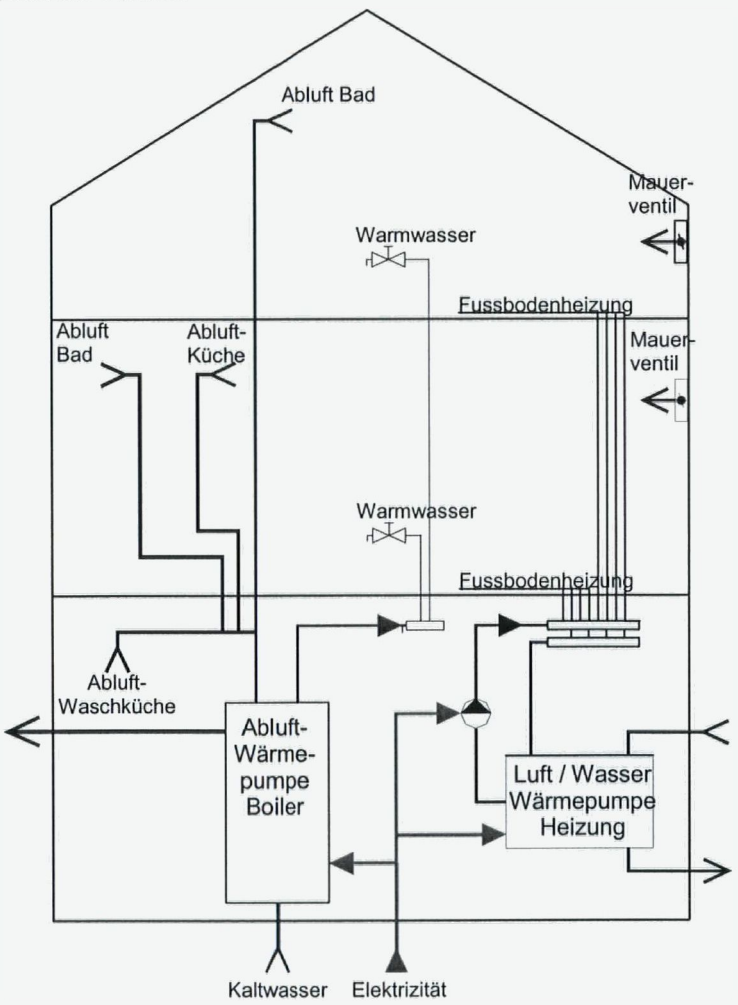


Abb. 8: Systemschema Haustechnik Schötz

Die haustechnischen Anlagen sind im unbeheizten Keller untergebracht. Zur Wärmeerzeugung werden zwei Wärmepumpen eingesetzt. Eine Luft/Wasser-Wärmepumpe deckt den Wärmebedarf für die Raumheizung und mit einem Abluft-Wärmepumpen-Boiler wird das Brauchwarmwasser aufbereitet. Dank dem Einsatz einer Abluft-Wärmepumpe und der damit verbundenen Abluftanlage wird eine gute Luftqualität durch einen kontrollierten Luftwechsel sichergestellt und der Wäschetrockenraum effizient entfeuchtet.

Raumheizung

Der Wärmebedarf für die Raumheizung wird mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gedeckt. Die Aussenluft wird auf der Westseite angesaugt und auf der Nordseite ins Freie geführt. Auf eine Luftvorwärmung über ein Erdregister wurde aus Kostengründen verzichtet. Die Wärmepumpe wird mit einer aussentemperaturgeführten Rücklaufregulierung ein- und ausgeschaltet.

Die Wärmeabgabe erfolgt über eine Fussbodenheizung ohne Thermostatventile. Dank der tiefen Vorlauftemperatur von max. 35 °C ist auch hier der Selbstregelungseffekt der Fussbodenheizung ausgeprägt. Dies zeigt sich auch darin, dass aufgrund der kleinen Temperaturdifferenzen zwischen der Raum und der Heizwasser bei einer Raumtemperatur von ca. 23 °C durch die Bodenheizung keine Wärme mehr abgegeben werden kann. Auf einen Raumtemperaturfühler konnte dadurch verzichtet werden.

Warmwasseraufbereitung und kontrollierte Wohnungslüftung

Das Brauchwarmwasser wird mit der Abluft-Wärmepumpe des Typs Elektro Standard 550 D erwärmt [ES550D 95]. Damit kann das Warmwasser mit der abgesaugten Raumluft als Wärmequelle erzeugt und gleichzeitig der notwendige Luftwechsel sichergestellt werden. Die Wassertemperatur ist auf einen Sollwert von 50 °C eingestellt.

Die Abluftmenge ist auf den für die Wassererwärmung minimalen Wert von ca.120 m^3/h eingestellt. Damit wird ein Luftwechsel von 0.3 1/h erreicht. Die Abluft wird im Erdgeschoss in der Küche (30 m^3/h) und im Separat-WC (30 m^3/h) und im Dachgeschoss im Badezimmer (60 m^3/h) abgesogen und im Keller über den Verdampfer ins Freie geführt. Auf Wunsch der Bauherrschaft besteht zusätzlich die Möglichkeit, Luft aus der unbeheizten Waschküche abzusaugen. Die Arbeitszahl der Wärmepumpe wird aber durch die tiefere Ablufttemperatur reduziert. Die Absaugöffnung ist daher mit einer Klappe versehen, die am Ende der Wäschetrocknung wieder geschlossen werden kann. Von Vorteil ist, dass auf einen separaten Entfeuchter verzichtet werden kann.

Die Abluftanlage erzeugt im Gebäude einen leichten Unterdruck. Frische Aussenluft strömt über sechs Mauerventile (je 3 Mauerventile im Erd- und Obergeschoss) kontrolliert in das Gebäude.

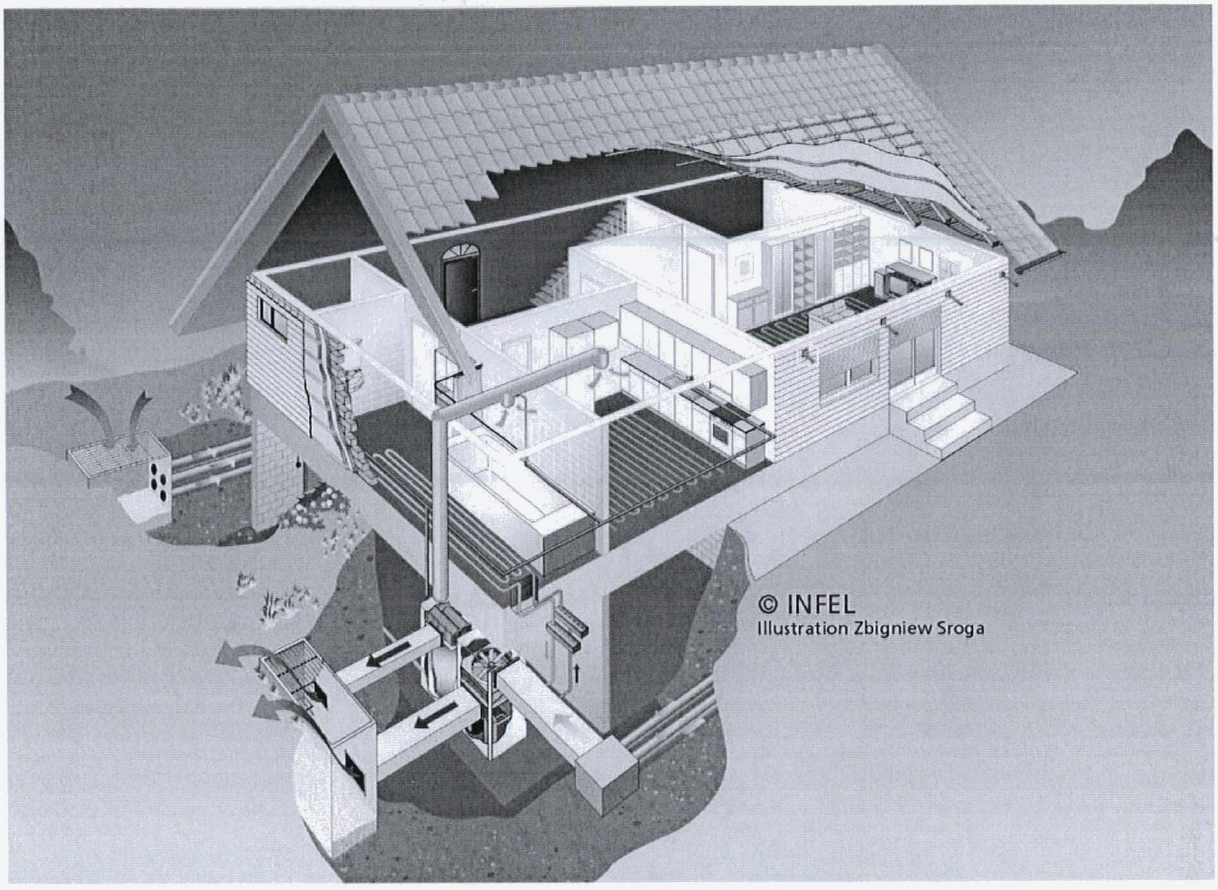


Abb. 9: Prinzipschema der Luft/Wasser-Heizwärmepumpe mit Abluft-WP-Boiler in Schötz

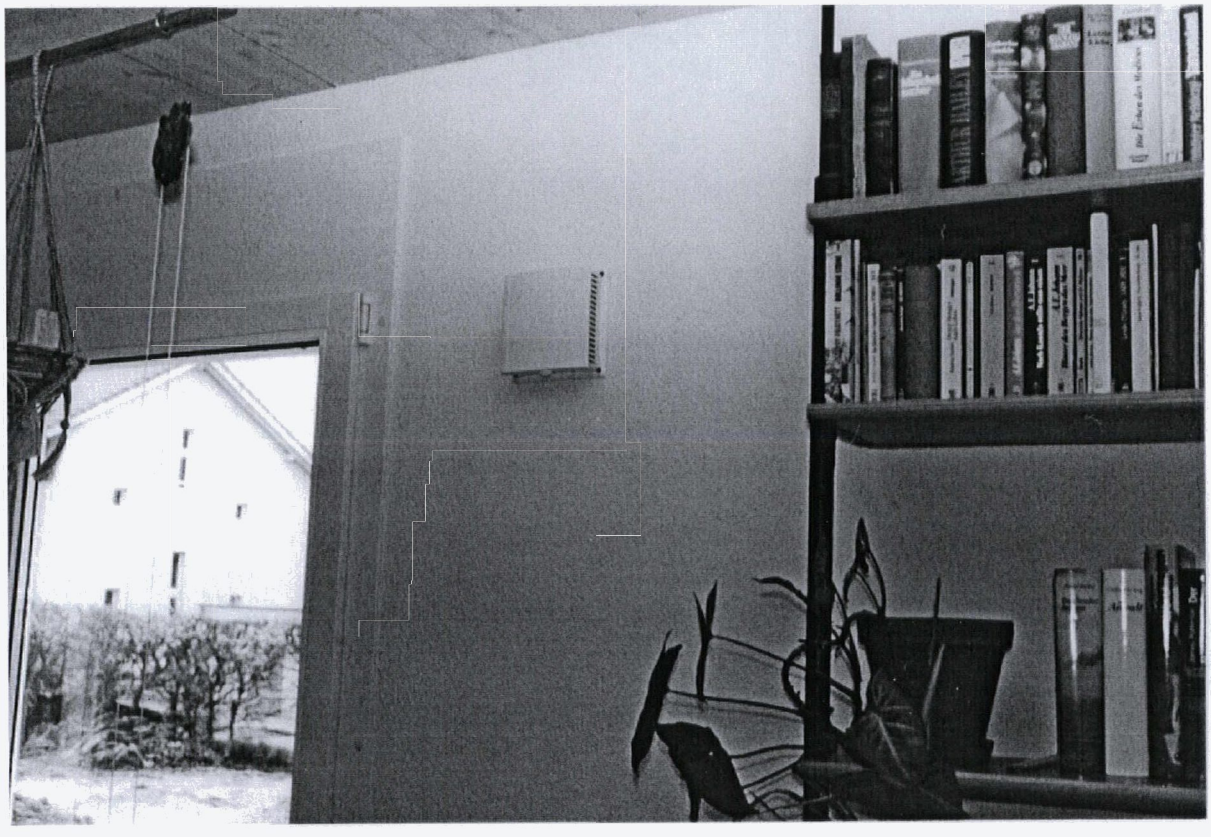


Abb. 10: Mauerventileinlass im Erdgeschoss in Schötz

2.2.2 Messkonzept Schötz

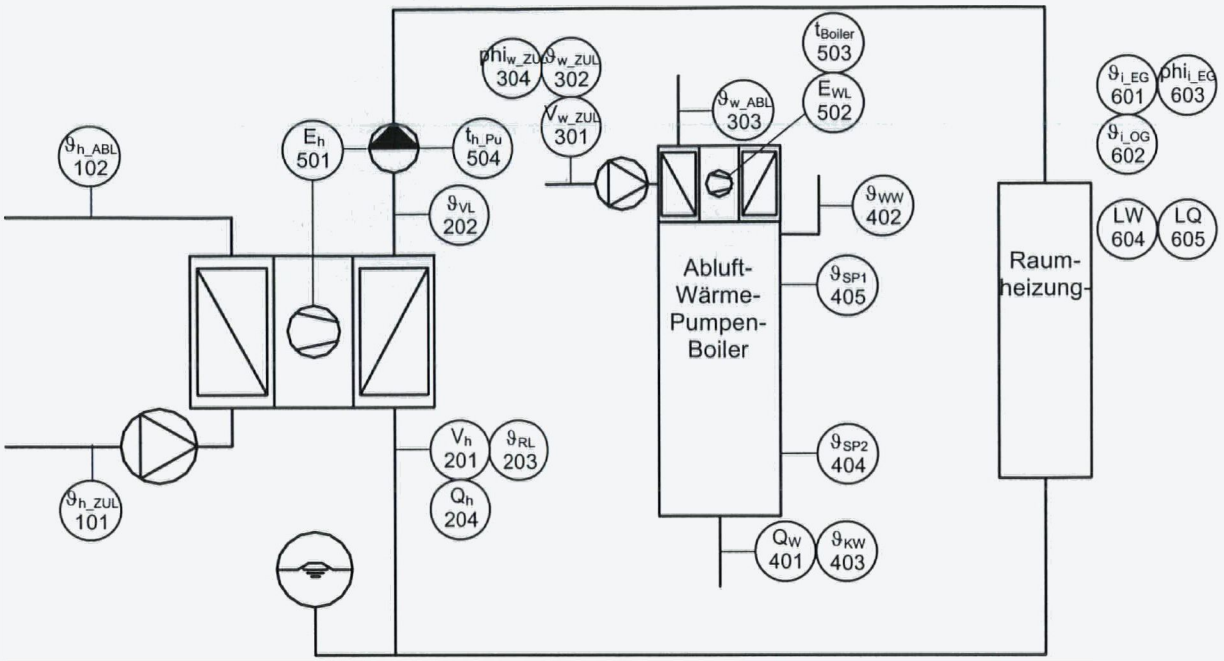


Abb. 11: Messschema

Pos.	Symbol	Einheit	Messgrösse	Messprinzip	Genauigkeit
101	ϑ_{h_ZUL}	°C	Zulufttemperatur Luft/Wasser-Wärmepumpe (Aussenlufttemperatur)	PT100	± 0.5 K
102	ϑ_{h_ABL}	°C	Ablufttemperatur Luft/Wasser-Wärmepumpe	PT100	± 0.5 K
201	V_h	m^3/s	Durchfluss Raumheizung	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
202	ϑ_{VL}	°C	Vorlauftemperatur Raumheizung	PT100	± 0.5 K
203	ϑ_{RL}	°C	Rücklauftemperatur Raumheizung	PT100	± 0.5 K
204	Q_h	kWh	Heizwärmebezug	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
301	V_{w_ZUL}	m^3/s	Abluftvolumenstrom	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
302	ϑ_{w_ZUL}	°C	Zulufttemperatur Wärmepumpen-Boiler	PT100	± 0.5 K
303	ϑ_{w_ABL}	°C	Ablufttemperatur Wärmepumpen-Boiler	PT100	± 0.5 K
304	phi_{w_ZUL}	%r.F	Abluftfeuchtigkeit des Gebäudes (Eintritt Abluft-WP-Boiler)	Kapazit. Sensor	± 2.5%r.F
401	Q_W	kWh	Wärmebezug für Warmwasser	Wärmezähler	± 1.5%v.MW**
402	ϑ_{WW}	°C	Temperatur Brauchwarmwasser	PT100	± 0.5 K
403	ϑ_{KW}	°C	Temperatur Boilerzuleitung	PT100	± 0.5 K
404	ϑ_{SP2}	°C	Oberflächentemperatur Speicher unten	PT100	± 0.5 K
405	ϑ_{SP1}	°C	Oberflächentemperatur Speicher oben	PT100	± 0.5 K
501	E_h	kWh	Energiebezug Heizung	Energiemesser	Klasse 2 (IEC 1036)
502	E_{WL}	kWh	Energiebezug Abluft-WP-Boiler mit Abluftventilator	Energiemesser	Klasse 2 (IEC 1036)
503	t_{Boiler}	h	Boiler-Ladezeit	Relais*	± 2%v.MW**
504	t_{h_Pu}	h	Laufzeit Heizungspumpe	Relais*	± 2% v.MW**
601	ϑ_{i_EG}	°C	Raumlufttemperatur Erdgeschoss	PT100	± 0.5 K
602	ϑ_{i_OG}	°C	Raumlufttemperatur Obergeschoss	PT100	± 0.5 K
603	phi_{i_EG}	%r.F	Relative Feuchtigkeit Erdgeschoss	Kapazit. Sensor	± 2.5%r.F
604	LW	h^{-1}	Luftwechsel (Passiv-Tracergas-Messung)		
605	LQ	ppm	CO_2-Konzentration (Luftqualität)	CO_2 Fühler	± 2% v.MW**

* Während der Betriebszeit wird über ein Relais ein Spannungssignal von 5 Volt auf den Datenlogger gegeben.
** vom Messwert

Tab. 4: Messstellenplan

2.2.3 Messdatenerfassung

Mit Ausnahme der Luftwechselmessung erfolgte die Messdatenerfassung mit einem im Keller stationierten Datenlogger. Die analogen Messwerte wurden jede Minute erfasst und als Mittelwert alle 15 Minuten abgespeichert. Die Impulssignale wurden aufsummiert und der Zählerstand alle 15 Minuten abgespeichert.

2.3 Pilotanlage 3: Fully

PILOTANLAGE 3 IN FULLY

Im Frühjahr 1998, als es beschlossen wurde, eine Luft/Luft Wärmepumpe im Messprojekt einzubeziehen, war das Haus in Fully schon seit einem Jahr bewohnt und die technischen Aggregate (HTM200 und GLH3000 der MinerTec AG in Interlaken) waren seit Mitte 1997 im Betrieb. Es handelte sich dabei um Prototypen der 1. Generation, die nach der Messperiode vom Winter 1998-99 aufgrund der beobachteten Schwächen modifiziert wurden :

- Das Prototyp-Modell des HTM200 ist im Juli 1999 durch ein neueres Gerät ersetzt worden (WW-Aufbereitung alternierend mit der Luftheizung (nicht gleichzeitig, wie beim 1. Typ); stärkere Ventilatoren mit unterschiedlichen Leistungen für den Luftwechsel- und den Heizbetrieb.
- Das direktkondensierende Grundlastmodul GLH3000 kondensierte im Boden ungenügend und konnte die produzierte Wärme nicht abgeben. Im Januar 2000 wurde ein zusätzlicher, direkt kondensierender Wandradiator eingebaut. Dies hat aber das Problem mit der Wärmeabgabe des GLH3000 nicht einwandfrei gelöst. Folglich hat das GLH-Modul im Winter 1999-2000 fast nicht funktioniert (wurde also nicht gemessen!), sodass die Heizung der Wohnung alleine durch die Luftheizung des HTM200 gesichert wurde. (Es ist zu erwähnen, dass das Wohnstudio (40 m^2) im Kellergeschoss nicht beheizt wurde: Nur die Wohnung (224 m^2) ist vom HTM200 beheizt worden).

Anlagenkonzept	Haustechnikmodul mit Wärmepumpe, WRG und Lufterdregister zur Luftheizung und Wassererwärmung. Separate direkt kondensierende Wärmepumpe als Zusatzheizung
Bauweise	Massivbau
Standort	1926 Fully (VS)
Höhe über Meer	500 m
Heizgradtage HGT 20/12	3237
Energiebezugsfläche	264 m^2
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1, Auslegung 20/-7°C, Luftwechselrate 0.4 1/h (real)	144 (132) MJ/(m^2a)
Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2, Auslegung 20/-7°C (real)	4.5 (3.5) kW
Luft/Luft-WP (HTM200):	
Heizleistung A7/W45	3.1 kW / COP 3.5
Heizleistung A-7/W45	1.9 kW / COP 2.4
Leistung der Zuluft / Abluftventilatoren (2 Stufen)	ca.100 - 150 W / ca.100 - 150 W
Zuluft / Ablufttemperatur bei 20/-7°C	45 / 20 °C

Tab. 5: Technische Angaben der Pilotanlage 3 in Fully.



Abb. 12: Das Haus in Fully (Südwest Ansicht)

2.3.1 Haustechnik Fully

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

- Das HTM200 (Haustechnik Modul mit integriertem 200 Liter-WW-Boiler)
  Das HTM200 ist eine Luft-Luft Wärmepumpe, die durch einen elektrischen Verdichter (800 W_{el}) angetrieben wird (Abb. 13). Es ist für die kontrollierte Lufterneuerung, die Warmwasseraufbereitung und die Wohnraumheizung vorgesehen.

FUNKTIONSWEISE DES HTM200 (siehe Abb. 14)

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 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.

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 den Verdampfer der Wärmepumpe und wird weiter abgekühlt. Beim sog. "Ferienbetrieb" wird die Hälfte der Luft, die normalerweise den Wärmetauscher umgeht, als Umluft dem Gebäude wieder zugeführt.

Warmwasserproduktion. Mit der aus der Fortluft entzogenen Wärme wird das Warmwasser produziert. Diese Warmwasserproduktion geschieht durch einen externen Platten-Wärmetauscher alternierend mit der Wohnraumheizung, aber hauptsächlich während der Nachtstunden. Die Aufladezeit beträgt ungefähr 4 Stunden. Für den Notfall gibt es noch die Möglichkeit, einen elektrischen Heizstab (1.2 kW_{el}) zuzuschalten.

- Das GLH-Modul (GLH bedeutet Grundlastmodul, ist aber eher eine Zusatzheizung für die Spitzenabdeckung)

  Eine kleine Luft-Wärmepumpe mit zum Teil im Boden verlegten und zum Teil in Wandradiatoren eingebauten direkt kondensierenden Rohren deckt den Rest des Wärmebedarfs. Nur das Badezimmer und der Wohnraum werden mit dieser Fussbodenheizung versehen; zusätzlich befindet sich ein Wandradiator in der Galerie im Obergeschoss.

  Infolge technischer Probleme verschiedener Arten hat das GLH-Modul im Laufe des Winters 1999-2000 fast nicht funktionieren können (es hat weniger als 5% des Gesamtwärmebedarfs produziert). Deswegen wird es in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.



Abb. 13: Luft/Luft-WP (HTM200-links) und Zusatzmodul (GLH3000-rechts)

	HTM200	**GLH3000**
Rollkolbenkompressor	ca. 900 W / 400 V - 50 Hz	ca. 900 W / 230 V - 50 Hz
Kältemittel	R 134a, ca. 2.2 kg	R 134a, ca. 2.6 kg
Ventilator	Zuluft : 2 Stufen ca. 100 und 150 W Fortluft : 2 St. ca. 100 und 150 W	Zuluft/Fortluft : ca. 100 W
Heizleistung	Wärmepumpe : ca. 2.4 KW Zusatzelektrolufterhitzer : zweimal ca. 450 W	Mit Direktkondensation : ca. 1.8 kW Mit Plattentauscher : ca. 2.1 kW
Warmwasser-Aufbereitung	200 l Inhalt, Aufladezeit : ca. 5 h. Elektrozusatzheizstab : ca. 1.2 kW	
Aufnahmeleistung	ca. 2.2 kW	ca. 1.0 kW

Tab. 6: Herstellerangaben für die Luft/Luft-WP (HTM200) und das Zusatzmodul (GLH3000).

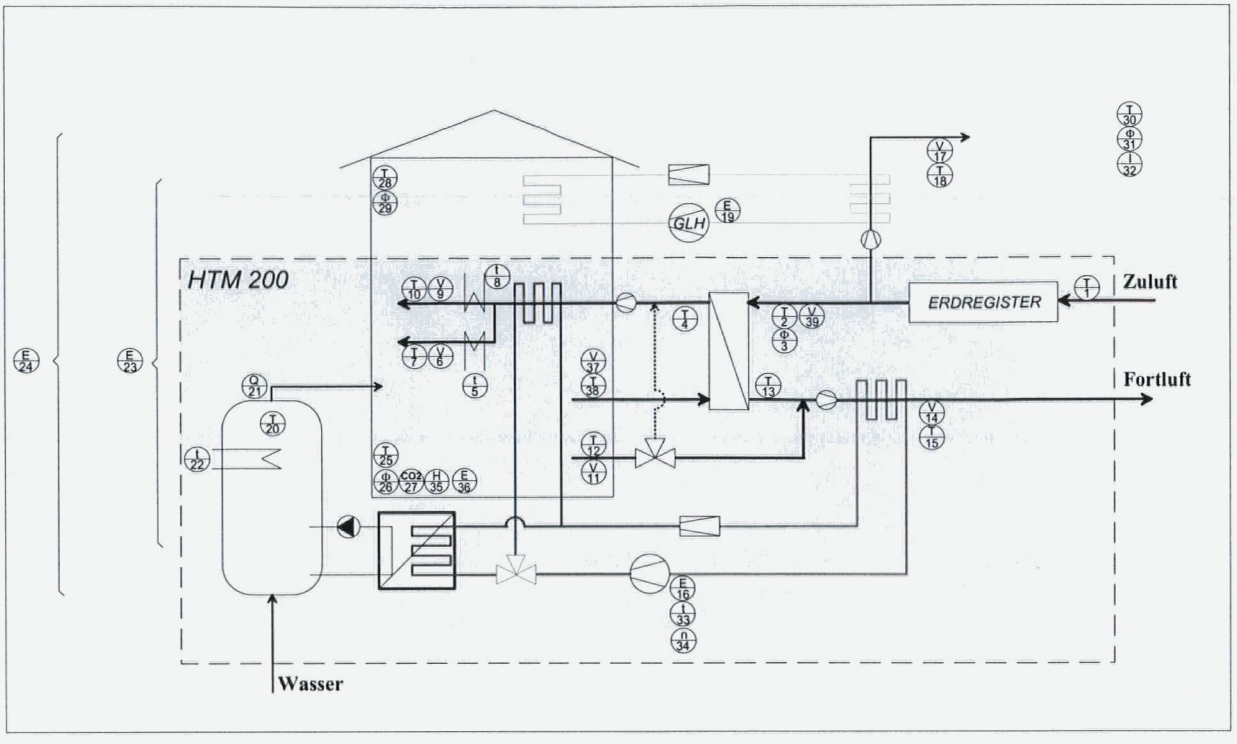


Abb. 14: Funktionsweise und Messschema für die Anlage in Fully

2.3.2 Messkonzept Fully

Um das HTM200 zu untersuchen und insbesondere dessen Jahresarbeitszahl und Nutzungsgrad zu ermitteln wurde das folgende Messsystem vorgesehen (Tab. 7) :

- Im Eingangskanal der Zuluft sowie im Ausgangskanal der Fortluft: Verschiedene Temperatur-, relative Feuchte- und Strömungsgeschwindigkeitsmesser;
- Am Boiler: Ein Wärmezähler;
- Zeitmesser, um die Betriebszeiten der verschiedenen Heizwiderstände und die Laufzeit des Verdichters zu registrieren;
- Am Verdichter: Ein Energiezähler.

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

Dazu werden noch Komfortgrößen (Temperaturen, relative Feuchten und der CO_2-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.

Die Messanlage funktionierte ohne Unterbruch vom 1. November 1999 bis 30. April 2000, mit Ausnahme einer Panne von drei Tagen vom 15. bis 17. Februar (Woche 8): Die durchschnittlichen Werte der von der Panne betroffenen Woche wurden auf der Basis der 4 Tage, während denen die Messanlage in dieser Woche funktionierte, berechnet. Zwei andere kleinere Zwischenfälle betrafen die Messanlage:

- Während der Woche 45 (1. November) war die beim Eingang des Erdregisters platzierte Temperatursonde defekt; als Ersatzwert diente die an der Nordfassade gemessene Aussentemperatur;

- Ab dem 7. Februar war der Warmwasserzähler defekt: als Ersatzwerte wurden die Messwerte der Wochen des ersten Halbwinters eingesetzt (siehe Tab. 22, Q_W).

2.3.3 Messstellenplan Fully

Messgrösse	Symbol	Einheit	Verfahren	Genauigkeit
Lufttemperatur	T	°C	PT100	± 0.5 K
Relative Feuchte	ϕ	%	Feuchte-Meter	2 % (10–90 % RF)
CO_2-Gehalt	CO_2	ppm	CO_2-Messgerät	± 20 ppm
Strömungsgeschwindigkeit	V	m/s	Strömungs-Messumformer	5 %
Heizwärme (Luft)	Q	J	Rechnung	< 15 %
Heizwärme (Warmwasser)	Q	J	Wärmezähler	7.5 %
Warmwassertemperatur	T	°C	PT100	± 0.5 K
Elektrische Energie	E	J	Elektrozähler	2 %
Wochenarbeitszahl	WAZ	-	Rechnung	< 10 %
Wochennutzungsgrad	WoNG	-	Rechnung	< 10 %
Sonneneinstrahlung, horiz.	$I_{g\text{-}hor}$	W/m^2	Solarimeter	3.5 %
Laufzeit, Betriebszeit	t	s	Uhr	-
Laufzyklen	n	-	Impulszähler	-

Tab. 7: Messsstellenplan Fully.

3 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

3.1 Messungen und Berechnungsmethoden

3.1.1 Systemgrenzen und Definition der Kennzahlen

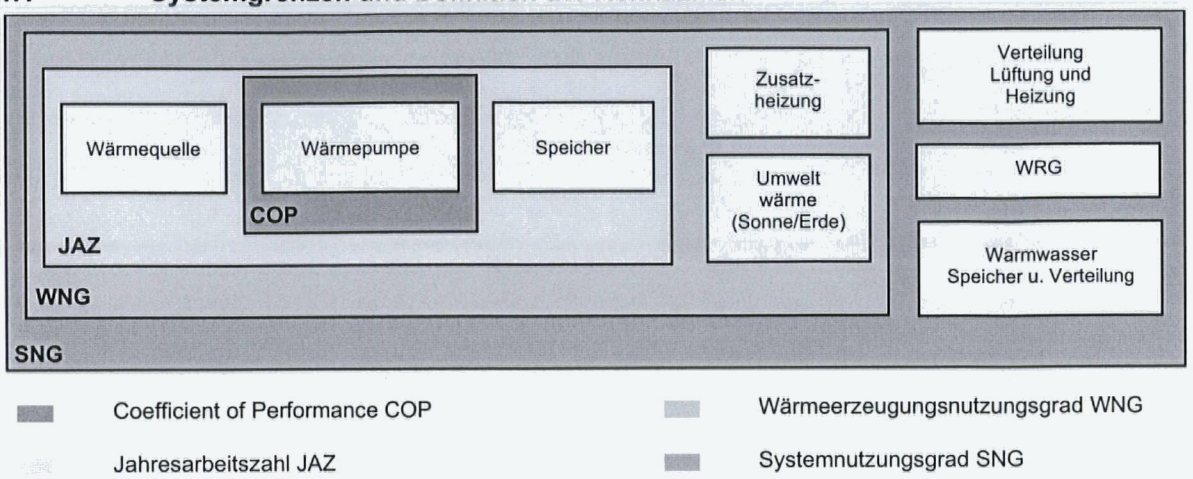


Abb. 15: Systemgrenzen für COP, JAZ (aus [RAVEL 96]), WNG, SNG (ergänzt)

Kennzahlen werden verwendet, um die Effizienz verschiedener Heizungssysteme mit Wärmepumpe und Wärmerückgewinnung zu beurteilen. Im folgenden werden die wichtigsten vorgestellt. Zur Beurteilung des Gesamtsystems wird die neue Kennzahl Systemnutzungsgrad eingeführt.

Coefficient of Performance (COP)

Der *COP* dient dem Beurteilen der Effizienz einer Wärmepumpe an einem Betriebspunkt.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{WP,hw}}{P_{WP} + P_{WP,aux}},$$

Gl. 1

mit der erzeugten Heizleistung $\dot{Q}_{WP,hw}$, der Verdichterleistungsaufnahme P_{WP} und einem Leistungsanteil $P_{WP,aux}$ für Verdampfer- und Verflüssigerdruckabfall, Abtauen sowie Steuerung / Regelung der Wärmepumpe.

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad (WNG)

Der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad *WNG* dient dem Beurteilen der Effizienz der Wärmeerzeugung über eine Jahresperiode. Er bildet die korrespondierende Vergleichsgrösse zum Jahresnutzungsgrad von fossilen Heizkesseln. Demzufolge sind keine Umwälzpumpen für die Wärmeverteilung und keine Bereitschaftsverluste des Warmwasserspeichers enthalten.

$$WNG_{hw} = \frac{Q_{WP,hw} - Q_{SP}}{E_{WP} + E_{aux}} \quad \text{(für monovalente Wärmepumpenanlagen)}$$

Gl. 2

mit der abgegebenen Heizwärme während eines Jahres $Q_{WP,hw}$, dem Wärmeverlust der Heizspeicheranlage Q_{SP}, dem Jahresenergieverbrauch des Verdichters E_{WP} und dem Energieverbrauch der für die Wärmeerzeugung erforderlichen Hilfsaggregate E_{aux} (Verdampferpumpe, Ventilator, Verflüssigerpumpe, Abtaueinrichtung, Carterheizung, Steuerung und Regelung).

Systemnutzungsgrad (SNG)

Der Systemnutzungsgrad ermöglicht die energetische Beurteilung des Gesamtsystems. Er enthält alle für Heizung, Lüftung und Warmwasseraufbereitung erforderlichen Energien. Speicher- und Verteilverluste werden von der Nutzenergie abgezogen, wenn sich diese im unbeheizten Raum befinden. Der *SNG* sagt aus, wie effizient die Nutzenergie (Heizwärme ab Bodenheizung, Warmwasser ab Zapfhahn, usw.) erzeugt wird.

$$SNG_{hw} = \frac{Q_{WP,hw} + Q_{z,h} + Q_{z,w}}{E_{WP} + E_{WP,aux} + E_{z,h} + E_{z,w} + E_v}$$

Gl. 3

Der Systemnutzungsgrad SNG_{hw} wird in der Regel für Heizung und Warmwasser kombiniert berechnet. Bei vollständig getrennten Kreisläufen kann er für Heizung und Warmwasser separat bestimmt werden (SNG_h, SNG_w).

3.1.2 Luftwechsel-Messungen Grafstal und Schötz

Zur Bestimmung des Aussenluftwechsels wurde die Methode der Passiv-Tracergas-Messung angewendet. Diese Methode erlaubt die Messung der Luftvolumenströme zwischen verschiedenen Gebäudebereichen (Zonen) und der einströmenden Aussenluft. Die Messungen werden jeweils über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Als Resultat erhält man Mittelwerte über die Messdauer, d.h. es können keine Momentanwerte bestimmt werden.

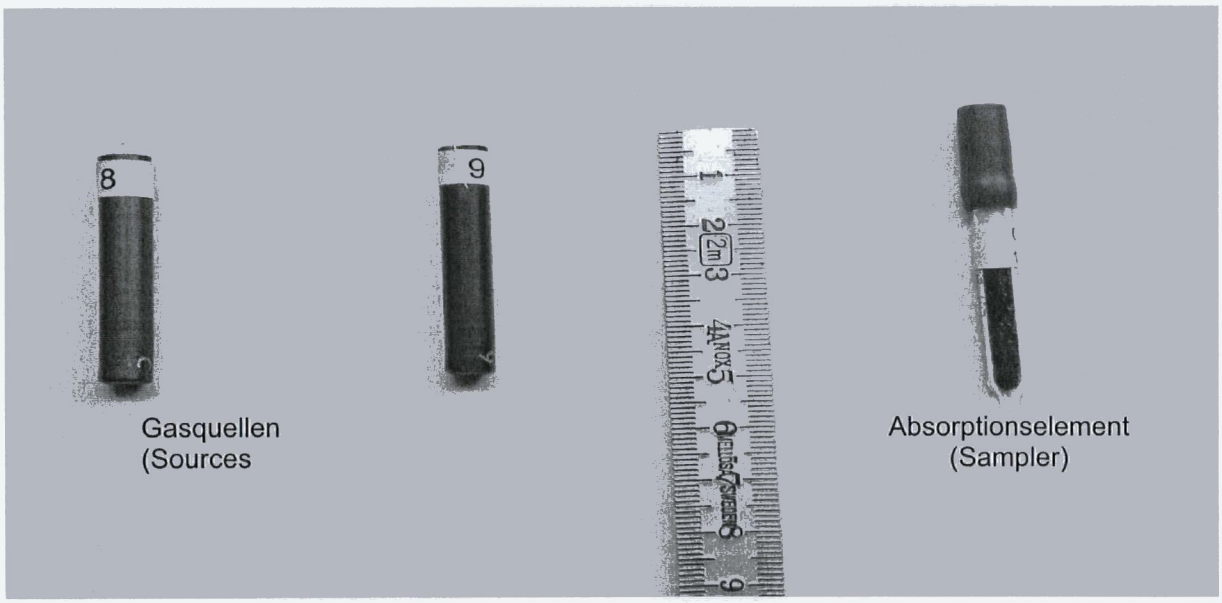


Abb. 16: Prinzip der Passiv-Tracergasmessung

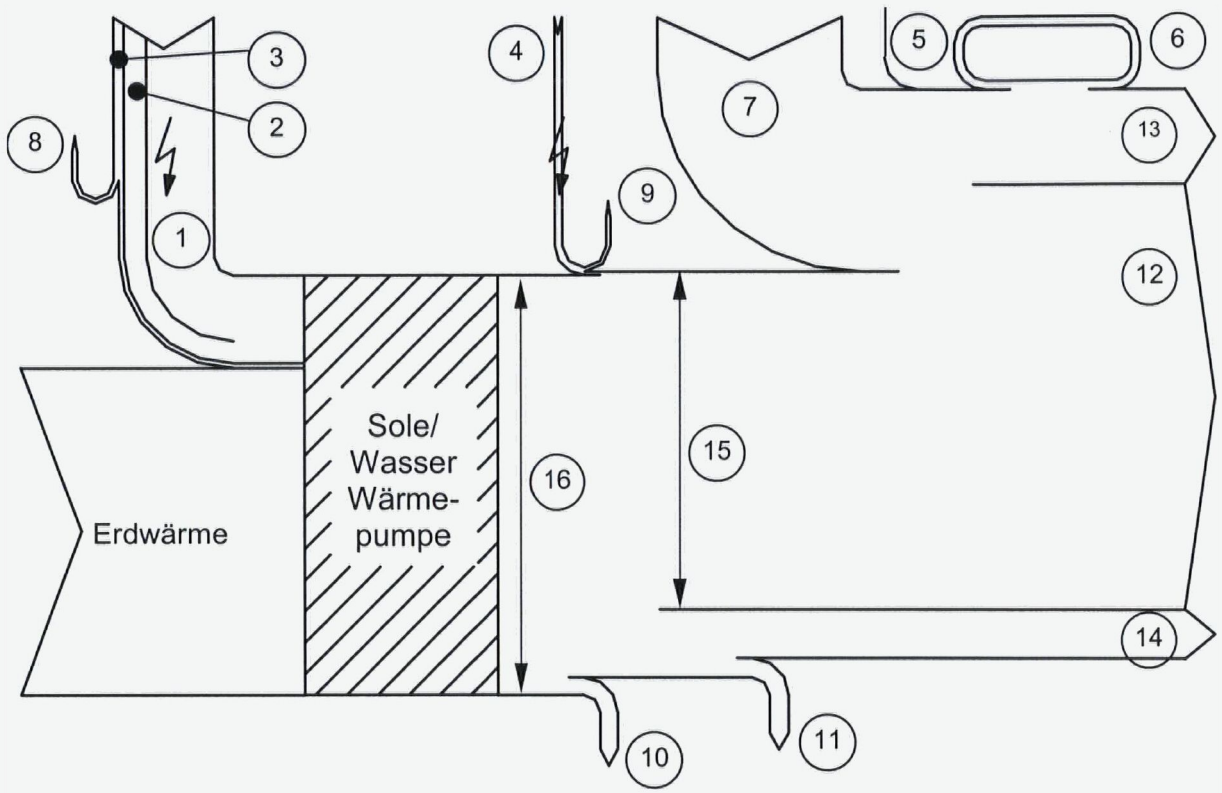
Gasquellen (Sources), welche über einen längeren Zeitraum eine konstante Menge an Spurengas abgeben, werden in den zu untersuchenden Zonen so verteilt, dass ein möglichst homogenes Luft-Gasgemisch im Raum entsteht. Neben den Quellen werden an geeigneten Stellen auch Absorptionselemente verteilt. Mit diesen wird das an den jeweiligen Messstellen anfallende Spurengas über die Messdauer absorbiert. Die Gaskonzentration im Raum hängt davon ab, wie gut der Raum durchlüftet ist. Durch Vergleich der emittierten und der absorbierten Gasmengen kann das im Beobachtungszeitraum eingeströmte „fremde" Luftvolumen bestimmt werden. Falls dieses mit Sicherheit von aussen kommt, genügt der Einsatz eines Spurengases zur Bestimmung des Aussenluftwechsels. Je nach Situation kann die „fremde" Luft aber auch aus anderen Gebäudeteilen stammen (was meistens der Fall ist) und es müssen mehrere Spurengase eingesetzt werden, um deren Herkunft bestimmen zu können.

Diese Methode wird europaweit von zwei bis drei Instituten als Dienstleistung angeboten. In diesem Projekt wurde mit der Firma PENTIAQ AB in Galve (Schweden) zusammengearbeitet [PentIAQ 99].

Von PENTIAQ AB wurden folgende Aufgaben übernommen:

- Erarbeiten der Messkonzepte aufgrund der Pläne und der zu erwartenden Ergebnisse
- Angabe der Positionierung der Gasquellen und Absorptionselemente
- Lieferung der Gasquellen und Absorptionselemente
- Analyse und Auswertung mit Bestimmung der Luftströme und des Aussenluftwechsels

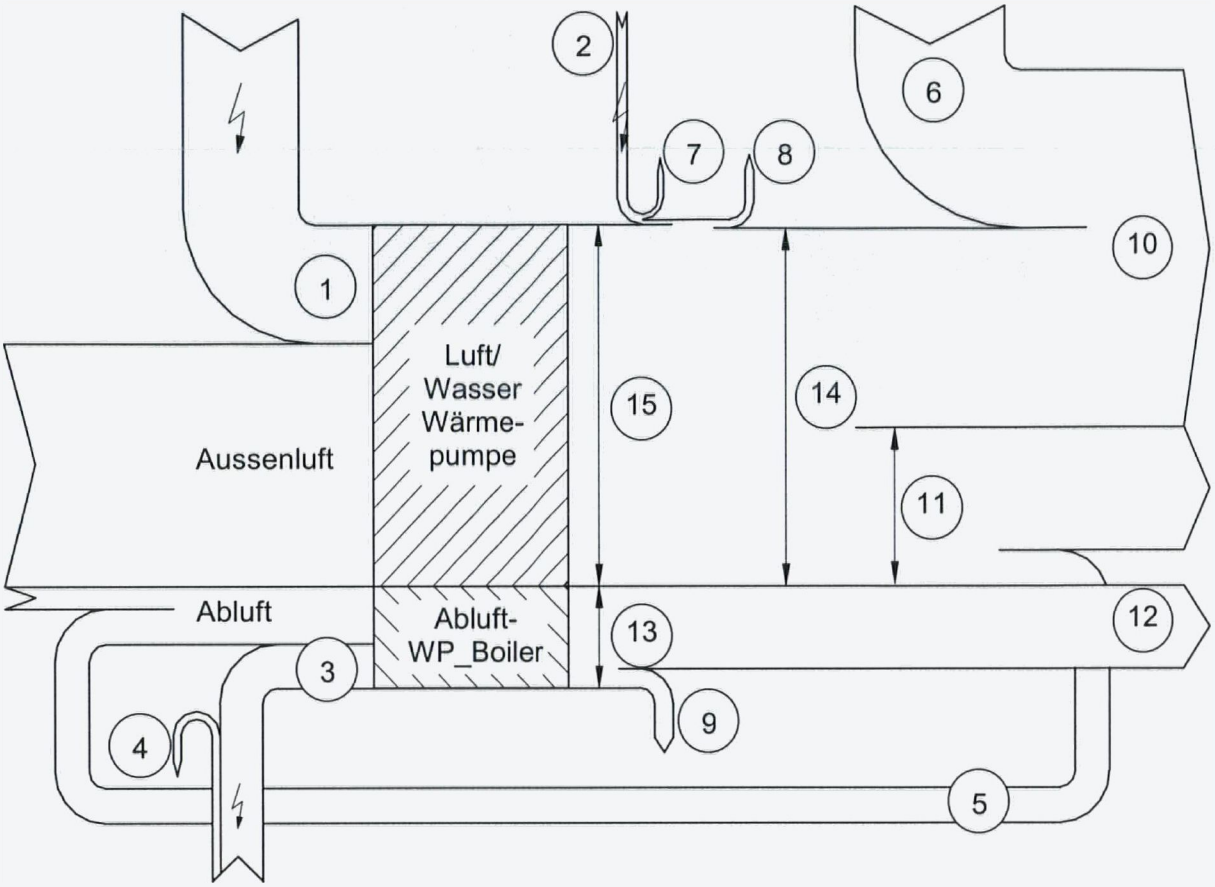
3.1.3 Energieflüsse Pilotanlage Grafstal



1) Energiebezug für Heizbetrieb
2) Energiebezug für Warmwasserbetrieb
3) Energiebezug Solepumpe
4) Energiebezug Heizungspumpe
5) Energiebezug Einzelraumlüftungsgerät
6) Wärmerückgewinnung Einzelraum-lüftungsgerät
7) Wärmegewinn Sonne, Personen und Elektrizität
8) nicht nutzbare Wärmeverluste Solepumpe
9) nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe
10) Verluste Heizwasserverteilung
11) Bereitschaftsverluste Boiler
12) Transmissionswärmeverluste
13) Lüftungswärmeverluste
14) Wärmebezug Warmwasser
15) Heizwärmebezug
16) Heizwärme Wärmepumpe

Abb. 17: Energieflussdiagramm „Grafstal"

3.1.4 Energieflüsse Pilotanlage Schötz



1) Energiebezug Luft/Wasser- WP
2) Energiebezug Heizungspumpe
3) Energiebezug Abluft-WP-Boiler mit Abluftventilator während der Ladezeit
4) Energiebezug Abluftventilator ausserhalb der Ladezeit
5) Abwärmenutzung
6) Wärmegewinn Sonne, Personen und Elektrizität
7) nicht nutzbare Verluste Heizungspumpe
8) Verluste Heizwasserverteilung
9) Bereitschaftsverluste
10) Transmissionswärmeverlust
11) Lüftungswärmeverlust
12) Wärmebezug für Warmwasser
13) Heizwärme Abluft-WP-Boiler
14) Heizwärmebezug
15) Heizwärme Luft/Wasser-WP

Abb. 18: Energieflussdiagramm „Schötz“

4 GEWONNENE ERKENNTNISSE

4.1 Ergebnisse Grafstal

4.1.1 Energiebilanzierung Grafstal

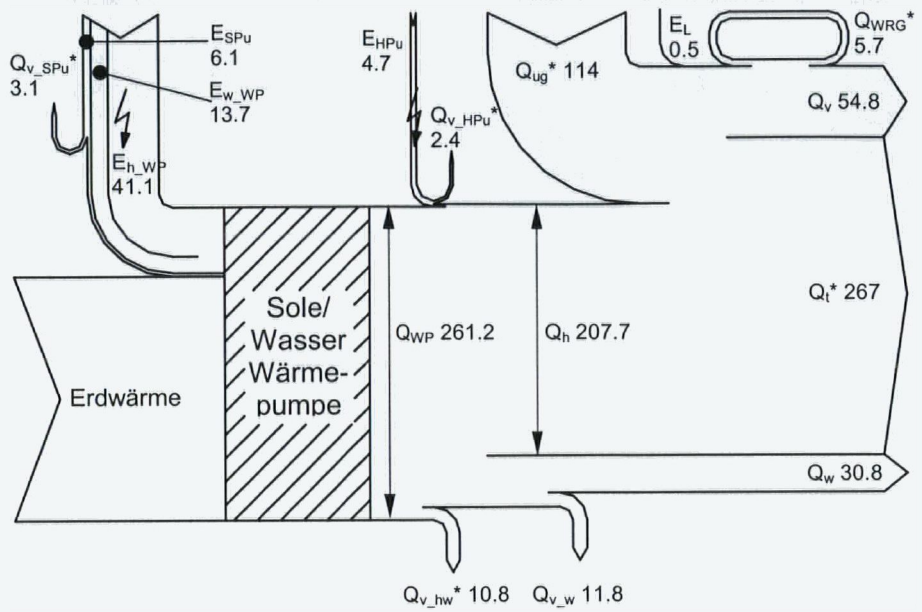


*Abb. 19: Energieflussdiagramm „Grafstal" für die Monate Mai 1999 bis April 2000, Werte in MJ/m²a, mittlere Raumtemperatur = 22.2°C, EBF = 174 m², * berechnete Werte*

		Mai 1999 kWh	Juni 1999 kWh	Juli 1999 kWh	Aug. 1999 kWh	Sep. 1999 kWh	Okt. 1999 kWh	Nov. 1999 kWh	Dez. 1999 kWh	Jan. 2000 kWh	Feb. 2000 kWh	März 2000 kWh	April 2000 kWh	Total kWh	Total MJ/(m²a)
E_{hw}	Heizung und Warmwasser	148	97	65	54	82	288	478	549	544	422	361	230	3171	65.6
E_h	Heizbetrieb	93	47	5	4	37	224	416	473	468	350	287	169	2424	50.1
E_{h_WP}	WP Heizbetrieb	59	24	2	2	21	171	326	395	406	298	236	132	1984	41.1
E_{h_HPu}	Heizungspumpe Heizbetrieb	22	18	3	2	12	17	21	31	33	31	34	28	207	4.3
E_{h_SPu}	Solepumpe Heizbetrieb	12	4	0	0	4	36	69	48	29	21	17	9	233	4.8
E_w	Warmwasserbetrieb	55	50	60	51	45	64	63	76	76	72	75	61	748	15.5
E_{w_WP}	WP Warmwasserbetrieb	47	43	53	45	40	55	54	67	70	66	68	56	664	13.7
E_{w_HPu}	Heizungspumpe Warmwasser-betrieb	1	1	1	1	1	1	1	2	3	2	3	2	21	0.4
E_{w_SPu}	Solepumpe Warmwasserbetrieb	7	6	6	5	5	8	8	6	4	4	4	3	63	1.3
E_L	Einzelraumlüftungsgerät	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	23	0.5
Q_{WP}	Wärmepumpe	470	259	155	124	227	1109	1829	2222	2223	1712	1433	861	12624	261.2
Q_{hv}	Heizwärmebezug und Verluste ab Wärmezähler Heizung	277	106	16	15	106	933	1643	1968	1962	1469	1195	678	10368	214.5
Q_{v_h}	Verteilverluste ab Wärmezähler Heizung	0	0	0	0	15	34	48	56	56	47	43	30	329	6.8
Q_h	Heizwärmebezug	277	106	16	15	91	899	1595	1912	1906	1422	1152	648	10039	207.7
Q_{v_w}	Bereitschaftsverluste Boiler	48	40	46	37	44	50	51	52	54	48	50	48	571	11.8
Q_w	Warmwasser	145	113	93	72	77	118	113	165	149	154	163	128	1490	30.8
Q_{v_HPu}	nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe	12	10	2	1	6	9	11	17	18	17	18	15	114	2.4
Q_{v_SPu}	nicht nutzbare Wärmeverluste Solepumpe	9	5	3	2	4	22	38	27	16	12	10	6	148	3.1
Q_{vhw}	Verteilverluste	0	0	0	0	15	41	70	93	115	87	68	37	524	11
Q_v	Lüftungswärmeverluste	0	0	0	0	123	256	389	421	645	400	269	148	2651	54.8
Q_{WRG}	Wärmerückgewinnung Einzel-raumlüftungsgerät	0	0	0	0	0	0	0	0	90	70	66	49	275	5.7

Tab. 8: Energieverbräuche Grafstal, mittlere Raumtemperatur = 22.2°C, EBF = 174 m², Genauigkeit Wärmemengen ± 1.5%, Genauigkeit Energien ± 2%

4.1.2 Kennzahlen Grafstal

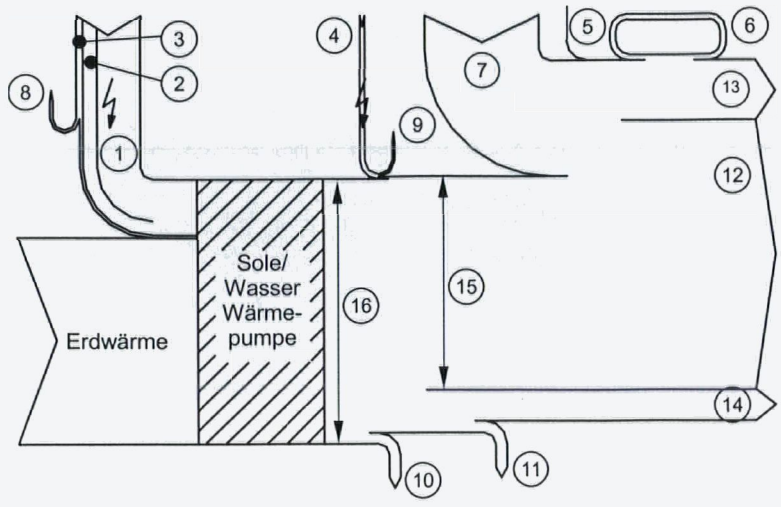


Abb. 20: Energieflussdiagramm „Grafstal"

Die Zahlen bei den Berechnungsformeln der Kennzahlen beziehen sich auf die Nummern im Energieflussdiagramm (Abb. 20). Die angegebenen Unsicherheiten wurden gemäss der Fehlerfortpflanzung nach Gauss (mittlerer Fehler) berechnet.

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad gesamter Wärmebezug WNG_{hw}

$$WNG_{hw} = \frac{16}{1+2+3} = \frac{Q_{WP}}{E_{h,WP} + E_{w,WP} + E_{S-Pu}} = \underline{\underline{4.29 \pm 0.08}}$$

Gl. 4

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad Heizung WNG_h

$$WNG_h = \frac{15+10}{1+3_a} = \frac{Q_h + Q_{v,hw}}{E_{h,WP} + E_{h,S-Pu}} = \underline{\underline{4.77 \pm 0.11}}$$

wobei 3_a der Energiebezug der Solepumpe während reinem Heizbetrieb ist.

Gl. 5

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad Warmwasser WNG_w

$$WNG_w = \frac{14+11}{2+3_b} = \frac{Q_w + Q_{v,w}}{E_{w,WP} + E_{w,S-Pu}} = \underline{\underline{2.83 \pm 0.06}}$$

wobei 3_b der Energiebezug der Solepumpe während reinem Warmwasserbetrieb ist.

Gl. 6

Systemnutzungsgrade

Systemnutzungsgrad gesamter Wärmebezug SNG_{hw}

$$SNG_{hw} = \frac{14+15}{1+2+3+4+5} = \frac{Q_h + Q_w}{E_{h,WP} + E_{w,WP} + E_{S-Pu} + E_{H-Pu} + E_L} = \underline{\underline{3.64 \pm 0.09}}$$

Gl. 7

Systemnutzungsgrad Heizung SNG_h

$$SNG_h = \frac{15}{1 + 3_a + 4_a} = \frac{Q_h}{E_{h,WP} + E_{h,S-Pu} + E_{h,H-Pu}} = \underline{\underline{4.14 \pm 0.10}}$$

wobei 3_a bzw. 4_a der Energiebezug der Hilfsaggregate während reinem Heizbetrieb ist.

Gl. 8

Systemnutzungsgrad Warmwasser SNG_w

$$SNG_w = \frac{14}{2 + 3_b + 4_b} = \frac{Q_w}{E_{w,WP} + E_{w,S-Pu} + E_{w,H-Pu}} = \underline{\underline{1.99 \pm 0.05}}$$

wobei 3_b bzw. 4_b der Energiebezug der Hilfsaggregate während reinem Warmwasserbetrieb ist.

Gl. 9

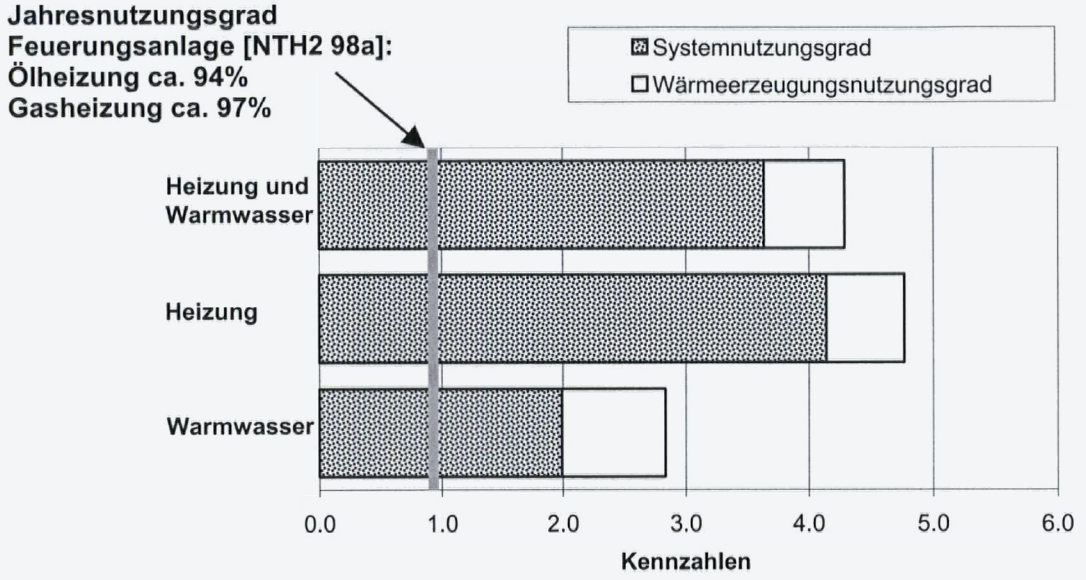


Abb. 21: Nutzungsgrade Grafstal

4.1.3 Komfort mit/ohne Einzelraumlüftung Grafstal

In den „NOAH-Häusern" wird in der Regel keine mechanische Raumlüftung eingebaut. So wurde auch bei der Pilotanlage auf eine kontrollierte Wohnungslüftung verzichtet. Die Auswertungen der CO_2- und der Luftwechsel-Messung nach der Heizperiode 98/99 zeigten jedoch deutlich, dass aufgrund der dichten Bauweise der Niedrigenergiehäuser die natürliche Lüftung durch Fugen nicht ausreicht um eine anhaltende, gute Luftqualität sicherzustellen. Nach Beratung durch die Projektleitung und Fachpersonen entschlossen sich die Eigentümer, nachträglich eine kontrollierte Wohnungslüftungen einzubauen.

Die Massnahmen zur Verbesserung des Lüftungskonzepts nach der ersten Heizperiode sehen folgendermassen aus:

- Einbau eines Einzelraumlüftungsgerätes mit WRG (Siegenia Aerolife) im Wohnzimmer (EG)
- Austausch des bestehenden Abluftventilators im Badezimmer im 1.OG durch einen stärkeren. Mit dem Abluftventilator wird die Abluft aus dem 1.OG und dem DG abgesogen.
- Sicherstellen einer kontrollierten Frischluftzufuhr durch Einbau von je einem Mauerventil pro Raum im 1.OG und im DG

Mitte Dezember 2000 wurden die Einbauarbeiten durchgeführt. Die Kosten dieser Massnahmen lagen etwas über CHF 3'000.-.

Den Einfluss des Einzelraumlüftungsgerätes auf die CO_2-Konzentration im Wohnzimmer kann anhand der Messdaten vor und nach dem Einbau des Gerätes gut dargestellt werden. Um von einer guten

Luftqualität bezüglich CO_2 zu sprechen, sollte die Konzentration unter der Komfortgrenze von 1500 ppm liegen, für besonders hohe Ansprüche unter 1000 ppm.

Abb. 22 zeigt den CO_2-Gehalt im Wohnzimmer über eine Woche vor und nach dem Einbau des Einzelraumlüftungsgerätes. Die CO_2-Konzentration lag vor dem Einbau des Einzelraumlüftungsgerät im Mittel bei etwas über 1200 ppm. Die Komfortgrenze wurde mit wenigen Ausnahmen täglich überschritten. Die Spitzenwerte erreichten nicht selten mehr als 2000 ppm (wie hoch die Konzentration effektiv anstieg konnte nicht bestimmt werden, da mit dem verwendeten Messfühler bei 2000 ppm die Messgrenze erreicht ist). Bei 2000 ppm können erste physiologische Symptome wie Müdigkeit, Konzentrationsstörungen usw. auftreten. Aus den Messungen konnte geschlossen werden, dass die Luftqualität beeinträchtigt war und der Raum über die Gebäudeundichtheiten nicht mit genügend Frischluft versorgt wurde.

Mit dem Einbau des Einzelraumlüftungsgerätes konnte die Luftqualität massiv verbessert werden. Der mittlere CO_2-Gehalt reduzierte sich um ca. 27% auf das erheblich niedrigere Niveau von ca. 900 ppm. Ebenso konnten die starken Schwankungen und die hohen Spitzenwerte gebrochen werden (vgl. Abb. 22 bis Abb. 24). Die Komfortgrenze wird nur noch an Tagen mit hoher Personenbelegung überschritten. Gesamthaft gesehen kann von einem Komfortgewinn gesprochen werden. Die CO_2-Konzentrationen bewegen sich nun in einem akzeptablen Bereich, in welchem keine Beeinträchtigungen des Wohlbefindens zu erwarten sind.

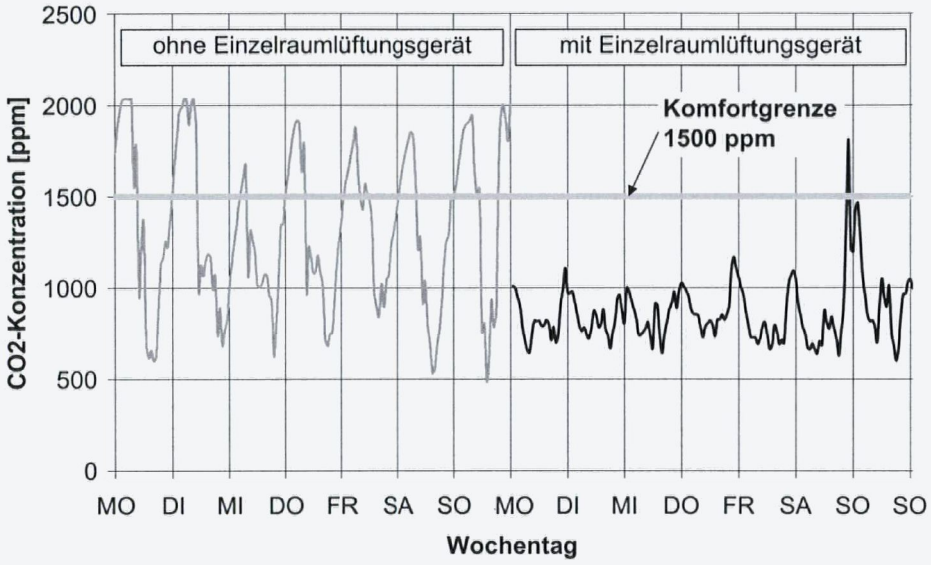


Abb. 22: Typischer Verlauf der CO_2-Konzentration im Wohnzimmer EG ohne Einzelraumlüftungsgerät (Wo 45 / 1999) und mit Einzelraumlüftungsgerät (Wo 2 / 2000)

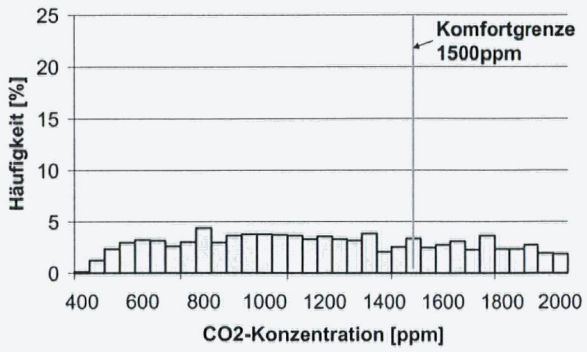


Abb. 23: CO_2-Verteilung im Wohnzimmer Oktober und November 1999 (ohne Einzelraumlüftung)

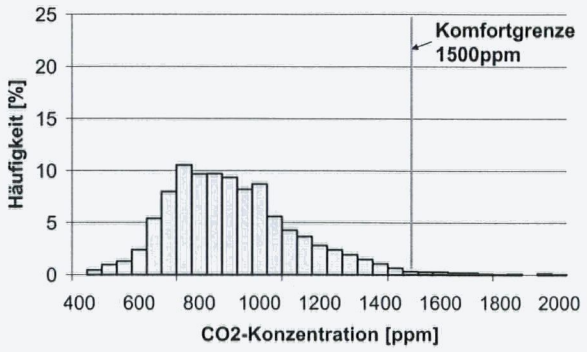


Abb. 24: CO_2-Verteilung im Wohnzimmer Januar bis April 2000 (mit Einzelraumlüftung und stärkerem Abluftventilator)

Im 1.Obergeschoss und im Dachgeschoss konnte die Frischluftversorgung kaum verbessert werden. Gemäss Herstellerangaben fördert der Abluftventilator ca. 90 m^3/h. Dies ergibt bei einem Dauerbetrieb einen Aussenluftwechsel von über 0.3 h^{-1}. Die Benutzer machten jedoch von der Möglichkeit Gebrauch, über eine Zeitschaltuhr die Laufzeiten zu beschränken. Ausserdem kann der Abluftventilator bei Bedarf manuell ein- und ausgeschaltet werden. Der durchschnittliche Luftwechsel von 0.15 h^{-1} vor dem Einbau der Abluftanlage erhöhte sich auf ca. 0.17 h^{-1} (siehe auch Kapitel „4.1.5 Tracergasmessung").

4.1.4 Luftqualität und Tracergasmessungen Grafstal

Zur Beurteilung der Behaglichkeit wurden die Raumluftemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und als Indikator für Luftverunreinigungen das Kohlendioxid (CO_2) kontinuierlich gemessen. Der Aussenluftwechsel wurde mit der Passiv-Tracergas-Methode ermittelt.

Aussenlufttemperatur

Die klimatischen Verhältnisse während der Heizperiode können als eher warm bezeichnet werden. Die gemessenen Heizgradtage $HGT_{20/12}$ (3232 [K*h]) liegen 10% unter dem langjährigen Mittelwert für Zürich (3616 [K*h]) [SIA381/3 82].

Monat	Mittelwert °C	Maximum °C	Minimum °C
September 1999	16.1	7.9	26.7
Oktober 1999	8.9	1.4	19.0
November 1999	2.2	-7.4	16.3
Dezember 1999	1.2	-10.3	11.0
Januar 2000	-0.1	-14.3	11.3
Februar 2000	3.6	-6.7	13.9
März 2000	5.7	-5.8	17.3
April 2000	9.3	-2.6	25.5

Tab. 9: Aussenlufttemperaturen Grafstal während der Heizperiode 1999/2000

Raumlufttemperatur

Die Raumlufttemperaturen betrugen während der Heizperiode 1999/2000 im Erdgeschoss im Mittel 23.5°C, im Obergeschoss 20.8°C und im Dachgeschoss 22.2°C. Die relativ hohen Temperaturen im Erd- und Dachgeschoss wurden von den Bewohnern gewünscht und über die Strangregulierventile der einzelnen Heizkreise entsprechend eingestellt. Im Obergeschoss sank die Temperatur zum Teil unter 20°C (siehe Abb. 25). Dies wurde von den Bewohnern jedoch nicht bemängelt. Mit der Heizungsanlage hätte die Raumtemperatur, wie im Erd- und Dachgeschoss, problemlos während der ganzen Heizperiode deutlich über 20°C gehalten werden können.

Monat	T_{i_EG} °C	T_{i_OG} °C	T_{i_DG} °C
Mai 1999	23.6	22.3	22.7
Juni 1999	22.9	22.0	22.3
Juli 1999	23.8	23.3	23.7
August 1999	22.7	22.0	22.4
September 1999	23.0	21.9	22.3
Oktober 1999	23.1	20.9	22.0
November 1999	23.7	20.5	22.3
Dezember 1999	24.1	21.5	22.8
Januar 2000	23.8	20.6	22.5
Februar 2000	23.6	21.0	22.3
März 2000	23.2	20.5	21.9
April 2000	22.9	20.8	21.8

Tab. 10: Mittlere Raumlufttemperaturen während der Messperiode

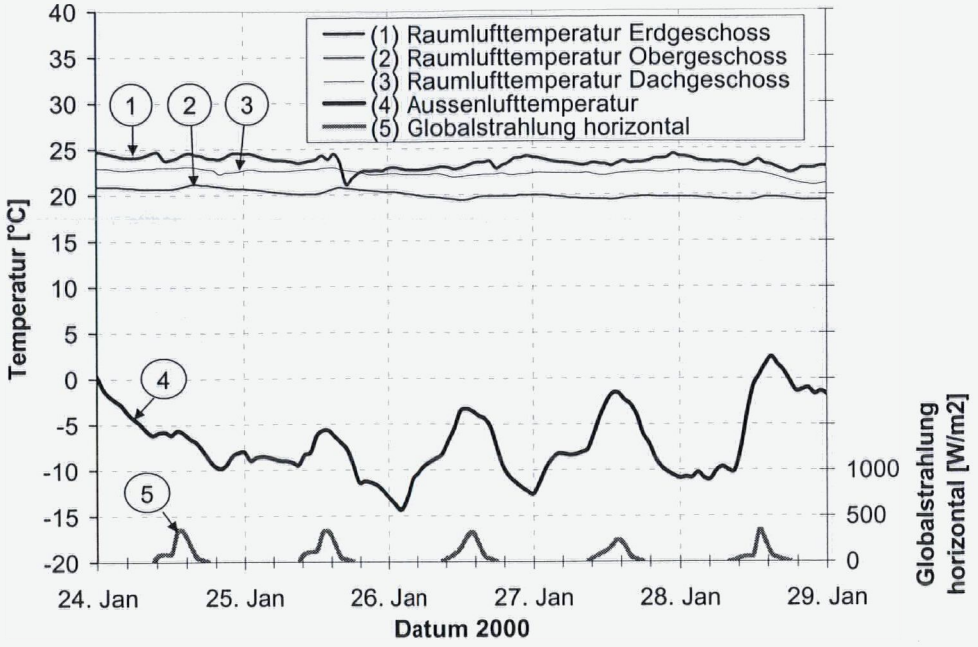


Abb. 25: Aussen- und Raumtemperaturverlauf sowie horizontale Globalstrahlung während der kältesten Periode

Auf allen Geschossen schwankten die Temperaturen in engen Grenzen (siehe Abb. 26 bis Abb. 28). Der Einfluss der Aussenlufttemperatur und, dank einer Beschattungseinrichtung, auch der Sonneneinstrahlung ist gering.

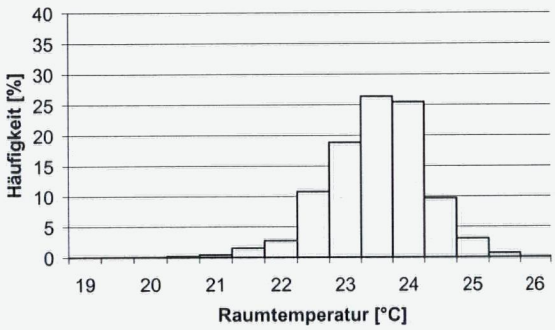


Abb. 26: Temperaturverteilung EG Oktober 1999 bis April 2000

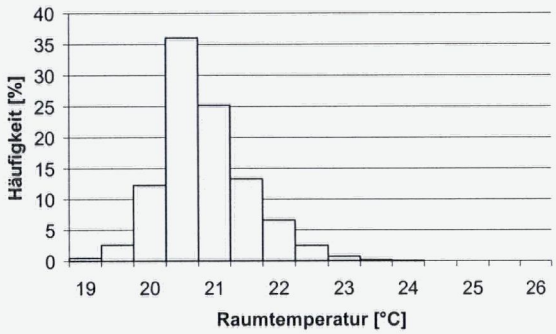


Abb. 27: Temperaturverteilung OG Oktober 1999 bis April 2000

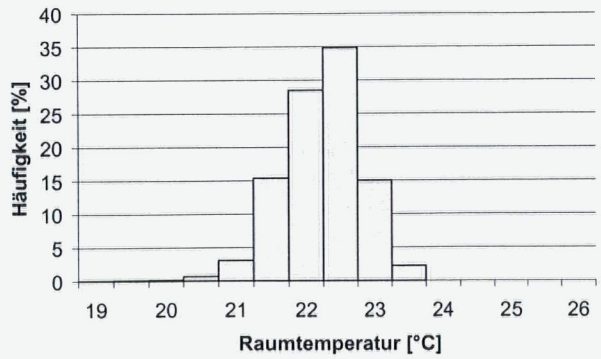


Abb. 28: Temperaturverteilung DG Oktober 1999 bis April 2000

Monat	phi_{i_EG} [%r.F.]
Mai 1999	51.2
Juni 1999	53.9
Juli 1999	58.6
August 1999	61.5
September 1999	59.6
Oktober 1999	50.5
November 1999	41.8
Dezember 1999	34.3
Januar 2000	31.2
Februar 2000	34.4
März 2000	35.2
April 2000	38.8

Tab. 11: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Wohnzimmer EG während der Messperiode

Relative Luftfeuchtigkeit

Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit während der Heizperiode 1999/2000 betrug 38%r.F. Die Behaglichkeitsgrenze von 30%r.F. [SIA380/1 88] wurde an 15 Stunden unterschritten (siehe Abb. 29 und Tab. 11.

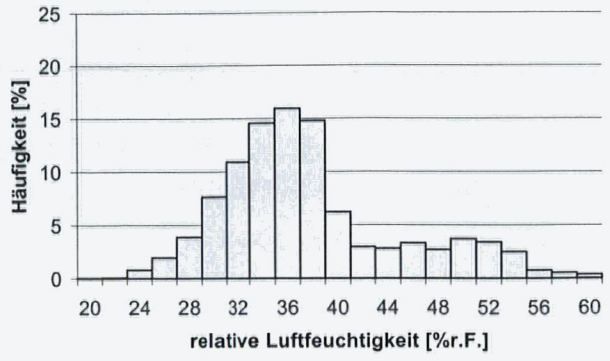


Abb. 29: Feuchteverteilung im Wohnzimmer Oktober 1999 bis April 2000

Kohlendioxid

Als Luftqualitätsindikator wurde das Kohlendioxid (CO_2) der Raumluft im Wohnzimmer gemessen. Der CO_2-Mittelwert während den Wintermonaten betrug vor dem Einbau eines Einzelraumlüftungsgerätes im Dezember 1999 rund 1240 ppm. Nach dem Einbau eines Einzelraumlüftungsgerätes sank die mittlere Konzentration deutlich um 27% auf durchschnittlich 910 ppm. Aus den vorliegenden Messungen kann geschlossen werden, dass die Luftqualität ohne mechanische Lüftung nicht dem Standard entsprach, der heute im Wohnungsbau gewünscht wird (siehe auch Kapitel: „4.1.3 Komfort mit/ohne Einzelraumlüftung Grafstal").

Monat	$CO2_{EG}$ [ppm]
Mai 1999	1192
Juni 1999	1028
Juli 1999	781
August 1999	679
September 1999	869
Oktober 1999	1232
November 1999	1255
Dezember 1999	958
Januar 2000	907
Februar 2000	974
März 2000	865
April 2000	881

Tab. 12: Mittlerer CO_2-Gehalt im Wohnzimmer EG während der Messperiode

4.1.5 Tracergasmessung

Zur Bestimmung des Aussenluftwechsels wurde die Methode der Passiv-Tracergas-Messung angewendet. Mit dieser Methode wurden die Luftvolumenströme zwischen dem Erdgeschoss (Zone B), den Obergeschossen (Zone A) und der einströmenden Aussenluft gemessen. Die Auswertungen wurden von der Firma PENTIAQ AB durchgeführt [PentIAQ 00]. In Tab. 13 ist eine Zusammenfassung der Resultate aufgeführt, die detaillierten Messwerte können im Bericht [PentIAQ 00] nachgelesen werden.

Messbeginn	Messdauer [Tage]	Zone	Luftwechsel [h-1]
1999-12-23	40	A	0.22
		B	0.37
2000-02-01	43	A	0.18
		B	0.29
2000-03-15	31	A	0.10
		B	0.16

Tab. 13: Mittlere Luftwechsel in Grafstal; 1.OG und DG (Zone A) und EG (Zone B)

Die höchsten Luftwechsel wurden kurz nach dem Einbau der kontrollierten Wohnungslüftung gemessen. Der Grund dafür ist, dass das Einzelraumlüftungsgerät im Erdgeschoss (Zone B) zu Beginn auf der 2. Stufe lief (ca. 60 m^3/h). Aufgrund der Lärmbelastung schalteten die Bewohnern nach längerer Zeit dann auf Stufe 1 (ca. 30 m^3/h) zurück. Die Abnahme des Luftwechsels in den Obergeschossen (Zone A) ist die Folge eines nachträglichen, unsachgemässen Einbaus einer Schalldämmung in die Mauerventile, bei der die Öffnung mit einem Schaumgummiseinsatz teilweise verstopft worden ist. Dadurch erhöhte sich der Druckverlust so stark, dass trotz voll geöffneter Klappe fast keine Frischluft mehr durch die Mauerventile ins Gebäude gelangen konnte. In der Zwischenzeit wurde der Schallschutz korrekt, d.h. nur an der Rohrinnenwand anliegend, installiert.

4.1.6 Mauerventile

Mauerventile sorgen für einen kontrollierten Luftaustausch. Auf eine effiziente Schallisolation ist unbedingt zu achten. Die Druckdifferenz innen/aussen ist sehr klein. Winddruck und Auftriebseffekte im Gebäude können die Strömungsrichtung umkehren, wie Abb. 30 zeigt.

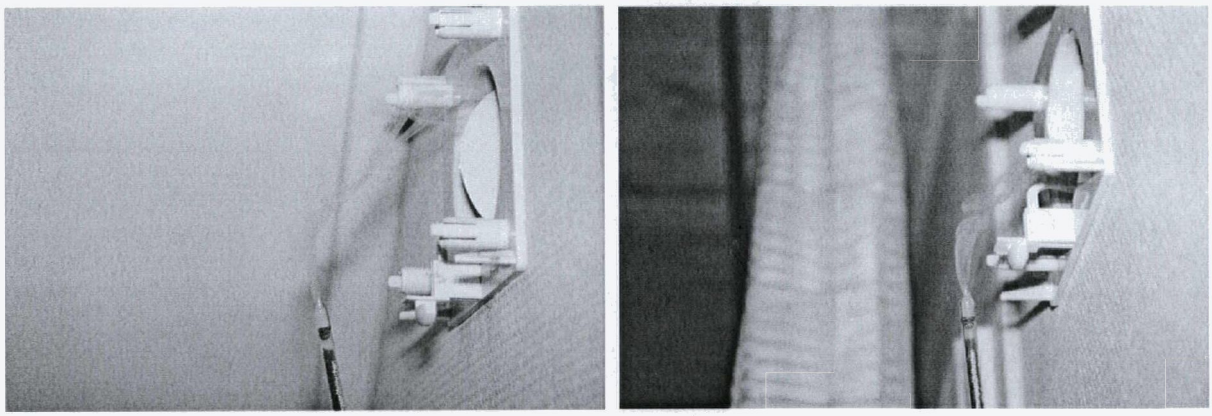


Abb. 30: Visualisierung des Luftvolumenstroms in Grafstal an einem Mauerventil (Abluftventilator läuft; Kellertüre und Hauseingangstüre geschlossen)

4.1.7 Regelung Heizanlage Grafstal

Die gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen bei reinem Heizbetrieb betragen 34 / 29°C (30 / 25°C wären es ohne EW-Sperrzeiten). Zur Aufbereitung des Warmwassers wird die Vorlauftemperatur um 2^{00} Uhr auf knapp 55 °C angehoben. Die Wärmepumpe wird über eine aussentemperaturgeführte Rücklaufregulierung ein- und ausgeschaltet. Die Schaltdifferenz (Hysterese) liegt bei 2 K. An sehr kalten Tagen werden Laufzeiten von mehreren Stunden mit höchstens drei Einschaltungen erreicht (siehe Abb. 31). In der Übergangszeit mit wärmeren Aussenlufttemperaturen (siehe Abb. 32) wird die Wärmepumpe bis zu sechs mal pro Tag eingeschaltet. Die minimalen Laufzeiten betragen immer noch ca. 1.5 Stunden.

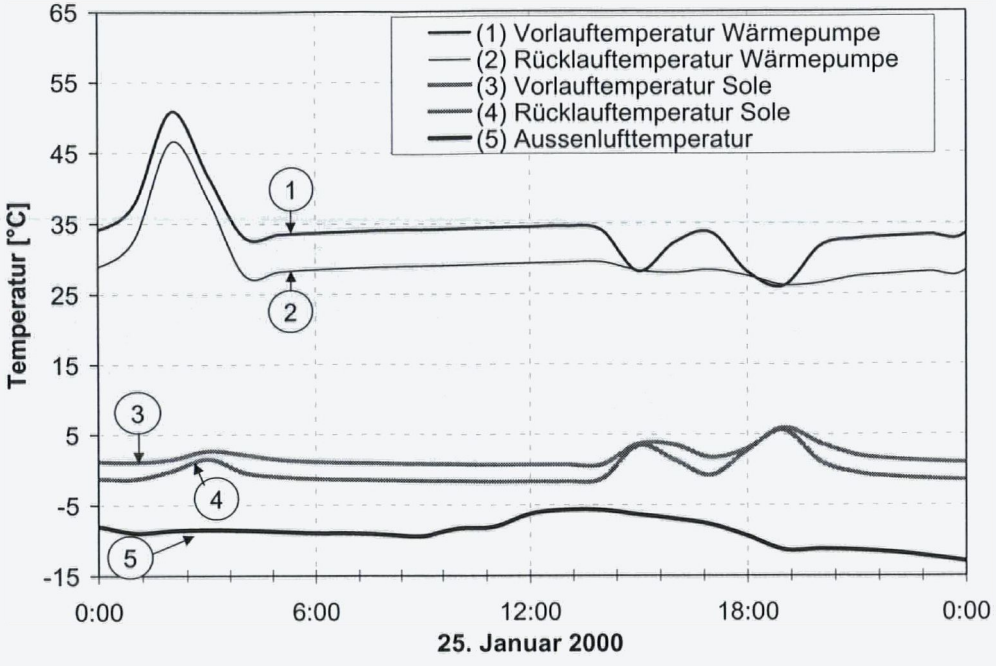


Abb. 31: Temperaturverläufe Aussenluft, Vor-/ Rücklauf Heizwasser und Sole an einem kalten Tag

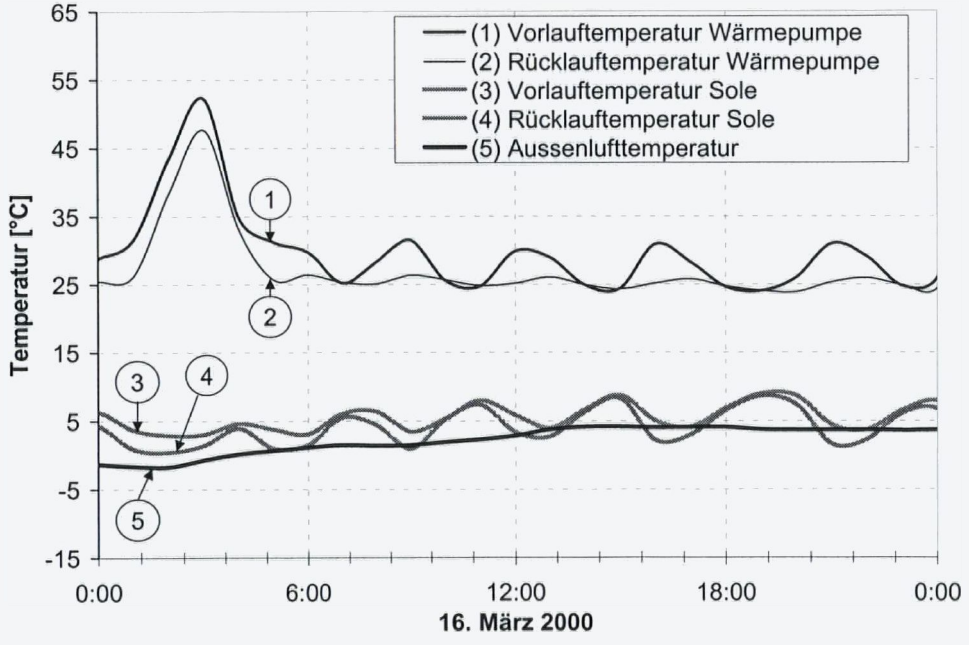


Abb. 32: Temperaturverläufe Aussenluft, Vor-, Rücklauf Heizwasser und Sole an einem warmen Tag

4.1.8 Warmwasser Grafstal

Die vierköpfige Familie verbrauchte vom Mai 1999 bis April 2000 nur gerade 30.9 MJ/m^{2}a Warmwasser (Nutzenergie am Boileraustritt). Dies ergibt einen Jahresverbrauch von 1340 MJ/Person und liegt deutlich, um 55%, unter dem Nutzenergiebedarf für Warmwasser nach SIA 380/1 von 3000 MJ/P a. Die Warmwassertemperatur (Boiler oben) beträgt im Mittel 47 °C.

Der prozentuale Anteil der Bereitschaftsverluste am Nutzenergiebedarf für Warmwasser liegt aufgrund des geringen Warmwasserverbrauchs dementsprechend hoch bei 38%. Umgerechnet auf einen Normverbrauch von 3000 MJ/ P a betragen die Bereitschaftsverluste nur noch 17%.

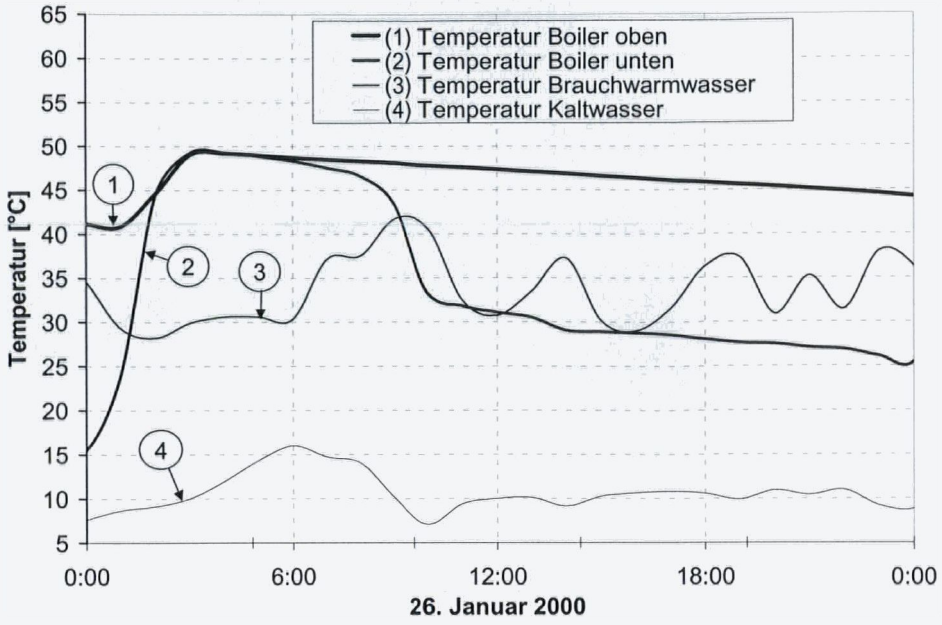


Abb. 33: Typischer Tagesverlauf der Boiler-, Warmwasser- und Kaltwassertemperatur (Anm.: Die Boilertemperaturen wurden mit Anlegefühlern an der Aussenwand gemessen)

4.2 Ergebnisse Schötz

4.2.1 Energiebilanzierung Schötz

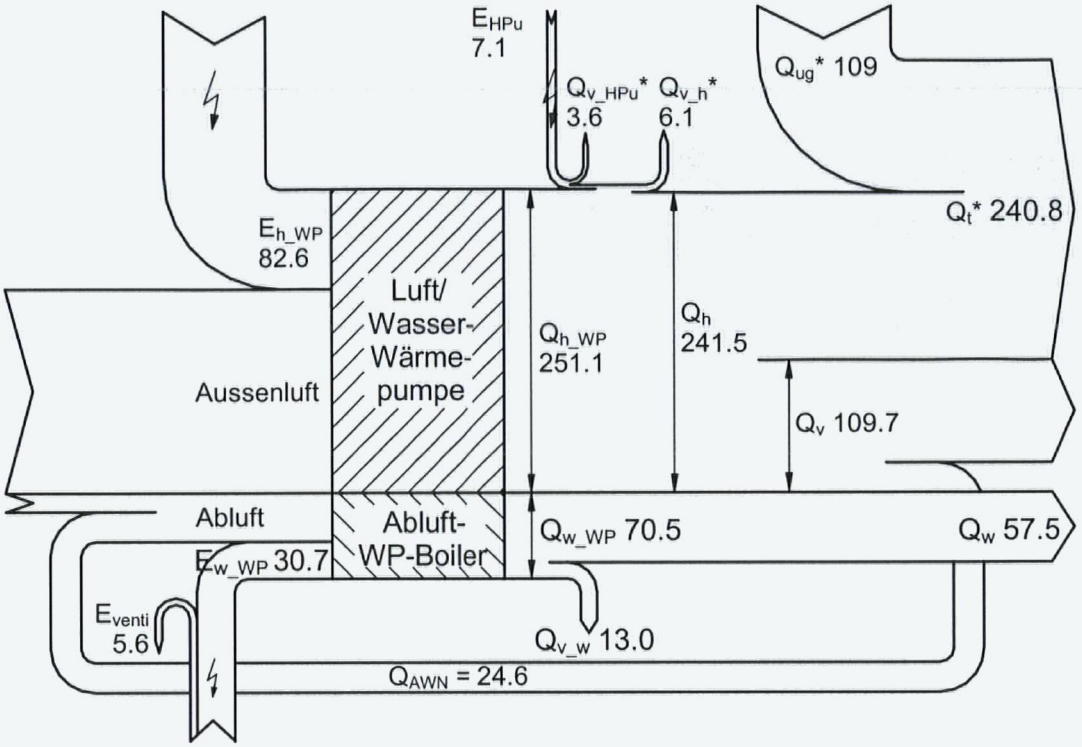


*Abb. 34: Energieflussdiagramm „Schötz" für die Monate Mai 1999 bis April 2000, Werte in MJ/(m²a), mittlere Raumtemperatur = 23°C, EBF = 155 m², * berechnete Werte.*

		Mai 1999 kWh	Juni 1999 kWh	Juli 1999 kWh	Aug. 1999 kWh	Sep. 1999 kWh	Okt. 1999 kWh	Nov. 1999 kWh	Dez. 1999 kWh	Jan. 2000 kWh	Feb. 2000 kWh	März 2000 kWh	April 2000 kWh	Total kWh	Total MJ/(m²a)
E_h	Raumheizung	0	0	0	0	28	298	641	745	825	553	479	281	3848	89.7
E_{WL}	Abluft-WP-Boiler mit Abluftventilator	133	119	116	121	112	122	137	138	145	131	144	139	1559	36.3
E_{h_WP}	Luft/ Wasser-Wärmepumpe	0	0	0	0	27	272	597	697	776	508	434	232	3543	82.6
E_{h_Pu}	Heizungspumpe	0	0	0	0	1	25	44	48	49	45	45	49	306	7.1
E_{w_WP}	Abluft-WP-Boiler während der Boilerladezeit	108	94	87	93	86	99	124	128	131	117	127	122	1316	30.7
E_{Venti}	Abluftventilator ausserhalb der Boilerladezeit	25	25	29	28	26	24	13	10	14	14	17	17	242	5.6
Q_h	Heizwärmebezug	0	0	0	0	85	945	1603	2012	2203	1529	1355	630	10363	241.5
Q_{v_h}	Verluste Heizwasserverteilung	0	0	0	0	2	20	40	46	49	41	37	27	261	6.1
Q_{v_hPu}	nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe	0	0	0	0	1	13	22	24	24	22	23	24	153	3.6
Q_{h_WP}	Luft/ Wasser-Wärmepumpe	0	0	0	0	87	978	1665	2082	2276	1592	1414	681	10776	251.1
Q_w	Warmwasser	204	171	170	182	152	187	227	230	242	224	244	236	2469	57.5
Q_{v_w}	Bereitschaftsverluste Boiler	49	48	50	50	48	46	44	46	46	42	44	43	556	13.0
Q_{w_WP}	Abluft-WP-Boiler	253	219	220	232	200	233	271	276	288	266	288	279	3025	70.5
Q_{AWN}	Abwärmenutzung	0	0	0	0	0	136	146	148	157	149	162	157	1055	24.6
Q_v	Lüftungsverluste	0	0	0	0	0	481	763	785	852	723	628	477	4709	109.7

Tab. 14: Energieverbräuche „Schötz", mittlere Raumtemperatur = 23°C, EBF = 155 m², Genauigkeit Wärmemengen ± 1.5%, Genauigkeit Energien ± 2%

Beurteilung

Gemäss Minergie-Nachweis sollte der Endenergiebedarf für Heizung 51.5 MJ/m²a, Warmwasser 24.5 MJ/m²a und Lüftung 0.4 MJ/m²a betragen (total = 76.4 MJ/m²a). Der gemessene Verbrauch beläuft sich für die Heizung auf 82.6 MJ/m²a, für das Warmwasser auf 30.7 MJ/m²a und für die Lüftung auf 5.6 MJ/m²a. Dies ergibt gegenüber den berechneten Werten einen gemessenen Mehrverbrauch von ca. 56%. Hauptverantwortlich für die grosse Differenz zwischen Planung und Realität ist das Benutzerverhalten:

- Zur Deckung des Heizenergiebedarfes musste 34% mehr Wärme als geplant aufgewendet werden. Ein wesentlicher Teil ist auf die gegenüber der Auslegung um 3 K höhere mittlere Raumtemperatur von 23 °C zurückzuführen.
- Der mittlere Luftwechsel beträgt 0.4 h^{-1} statt der bei der Berechnung eingesetzte Wert von 0.3 h^{-1}.
- Der Energiebezug für das Warmwasser (inklusive Bereitschaftsverluste) liegt mit 70.9 MJ/m²a 18% über dem eingesetzten Wert im Minergie-Nachweis von 60 MJ/m²a (oder 3000 MJ/P a).

Vergleich mit Minergie-Standard

Der Verbrauch nicht erneuerbarer Energie für Heizung, Lüftung und Warmwasser, ohne Umwälzpumpe (beim Vergleich wird der Verbrauch der Umwälzpumpe nicht berücksichtigt), liegt bei 118.9 MJ/m²a. Dieser Wert bezieht sich auf die effektive mittlere Raumlufttemperatur von 23°C. Für den Vergleich muss der Heizenergieverbrauch auf die Auslegetemperatur von 20°C umgerechnet werden.

- Die effektiven Lüftungsverluste (Q_v) und Transmissionsverluste (Q_t) werden mit dem Verhältnis der Heizgradtage bezogen auf die effektive Raumtemperatur und bezogen auf 20°C (Q_{v_20} bzw. Q_{t_20}) korrigiert:

$$Q_{v_20} = Q_v \cdot \frac{HGT_{12/20}}{HGT_{12/\vartheta_i}} = 109.7\left[MJ/m^2a\right] \cdot \frac{3308[K\ Tage]}{3848[K\ \mathrm{Tage}]} = \underline{94.3\left[MJ/m^2a\right]}$$

$$Q_{t_20} = Q_t \cdot \frac{HGT_{12/20}}{HGT_{12/\vartheta_i}} = 240.8\left[MJ/m^2a\right] \cdot \frac{3308[K\ Tage]}{3848[K\ Tage]} = \underline{207.0\left[MJ/m^2a\right]}$$

Gl. 10

Beim Minergie-Nachweis wurde ein Luftwechsel von n = 0.3 h^{-1} eingesetzt. Der gemessene Luftwechsel beträgt jedoch 0.4 h^{-1}. Die Lüftungsverluste müssen für den Vergleich daher nochmals korrigiert werden:

$$Q_{v_20_n_0.3} = Q_{v_20} \cdot \frac{n_{0.3}}{n_{0.4}} = 94.3\left[MJ/m^2a\right] \cdot \frac{0.3\left[h^{-1}\right]}{0.4\left[h^{-1}\right]} = \underline{70.7\left[MJ/m^2a\right]}$$

Gl. 11

Den Heizenergiebezug bei einer Raumtemperatur von 20 °C erhält man aus der Summe der Lüftungs- und Transmissionsverluste bei 20 °C abzüglich der Wärmegewinne Q_{ug}:

$$Q_{h_20} = Q_{v_20_n_0.3} + Q_{t_20} - Q_{ug} = 70.7\left[MJ/m^2a\right] + 207.0\left[MJ/m^2a\right] - 109\left[MJ/m^2a\right] = \underline{\underline{168.7\left[MJ/m^2a\right]}}$$

Gl. 12

Um eine Raumtemperatur von 20°C zu erhalten, muss die effektive Vorlauftemperatur von 35°C um 5 K auf 30°C reduziert werden. Diese Reduktion der Vorlauftemperatur hat einen Einfluss auf den Nutzungsgrad der Luft/Wasser-Wärmepumpe. Gemäss der Handrechenmethode im Schlussbericht des BFE-Projektes NTH2 [NTH2 98a & NTH2 98b] kann die Jahresarbeitszahl folgendermassen berechnet werden:

$$JAZ_h = \frac{1}{\frac{w_{-7}}{f_{T,-7}COP_{h,-7}} + \frac{w_2}{f_{T,2}COP_{h,2}} + \frac{w_7}{f_{T,7}COP_{h,7}}}$$

Gl. 13

COP: Leistungszahlen gemäss Herstellerangaben bei den Normpunkten A-7W35, A2W35 und A7W35 [WPZ 97].

f: Temperaturumrechnungsfaktoren für von den Normpunkten abweichende Vorlauftemperaturen, z.B. ϑ_{VL} = 30°C [NTH2 98b, A-10 ff]

w: Gewichtungsfaktor für Temperaturintervall

Zur Berechnung der Gewichtungsfaktoren müssen die Heizgradstunden bei den Aussenlufttemperaturen –2.5°C, 4.5°C und 12°C bestimmt werden. Diese lassen sich über das Summenhäufigkeitsdiagramm der Aussenlufttemperatur ermitteln.

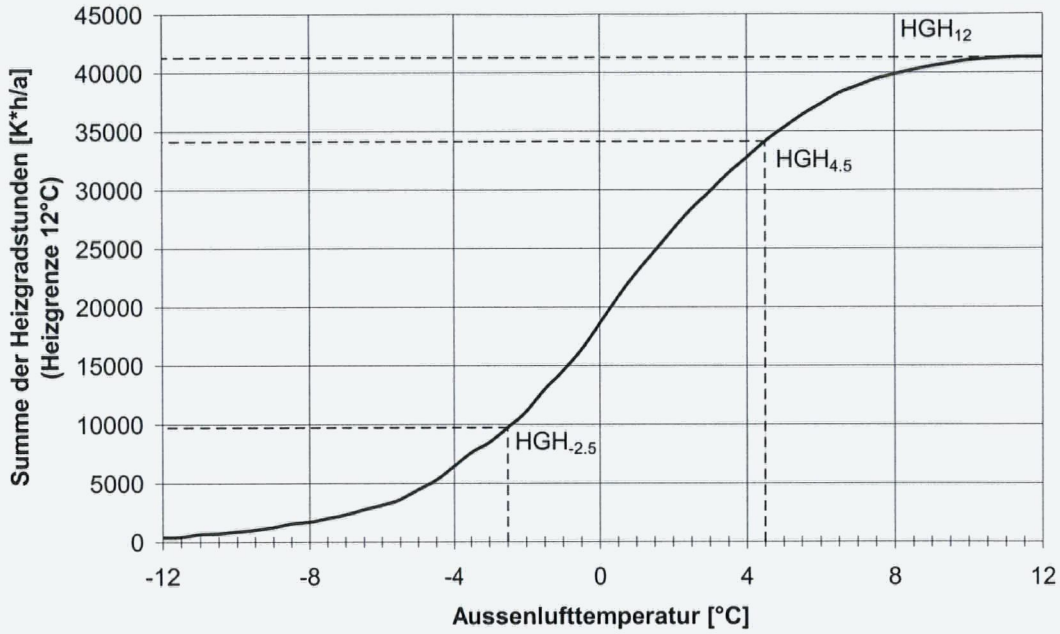


Abb. 35: Summen der Heizgradstunden für Schötz, Mai 1999 bis April 2000, bei einer Innentemperatur von 20 °C

$HGH_{-2.5/20}$ = 9'718 [K*h]
$HGH_{4.5/20}$ = 34'134 [K*h]
$HGH_{12/20}$ = 41'293 [K*h]

Die lassen sich nun wie folgt berechnen:

$$w_{-7} = \frac{HGH_{-2.5/20}}{HGH_{12/20}}$$

$$w_2 = \frac{HGH_{4.5/20} - HGH_{-2.5/20}}{HGH_{12/20}}$$

$$w_7 = \frac{HGH_{12/20} - HGH_{4.5/20}}{HGH_{12/20}}$$

Gl. 14

Die zur Berechnung der Jahresarbeitszahl benötigten Faktoren sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

COP Normtemperatur	COP	Gewichtungsfaktor w	Umrechnungsfaktor f
-7°C	2.49	0.24	1.12
2°C	3.04	0.59	1.16
7°C	3.97	0.17	1.2

Tab. 15: Faktoren zur Berechnung der Jahresarbeitzahl

Die ***berechnete Jahresarbeitszahl*** bei einer Vorlauftemperatur von ***30°C*** beträgt:

$$JAZ_h = \frac{1}{\frac{0.24}{1.12 \cdot 2.49} + \frac{0.59}{1.16 \cdot 3.04} + \frac{0.17}{1.2 \cdot 3.97}} = \underline{\underline{3.46}}$$

Gl. 15

Die berechnete Jahresarbeitszahl für eine Vorlauftemperatur von 35°C kann auch bestimmt werden (Da Norm- und Betriebspunkte gleich sind, ist der Umrechnungsfaktor f = 1). Die gemessene Jahresarbeitszahl stimmt mit der berechneten sehr gut überein, die Differenz ist kleiner als 1%.

JAZ_h theoretisch = 3.00

JAZ_h gemessen = 3.03

Für eine Raumtemperatur von 20°C kann nun der Heizenergiebedarf berechnet werden:

$$E_h = \frac{Q_{h_20}}{JAZ_h} = \frac{168.7 \left[MJ/m^2a\right]}{3.46} = \underline{\underline{48.8 \left[MJ/m^2a\right]}}$$

Gl. 16

Die Erhöhung der Raumtemperatur um 3 K hat auf der Erzeugerseite einen Mehrverbrauch an Elektrizität von 41% zur Folge.

Der beim Minergie-Nachweis eingesetzte Heizenergiebedarf von 51.5 MJ/m²a wird mit dem modifizierten gemessenen Heizenergiebezug von 48.8 MJ/m²a um 5% unterschritten, d.h die Werte stimmen auch hier gut überein.

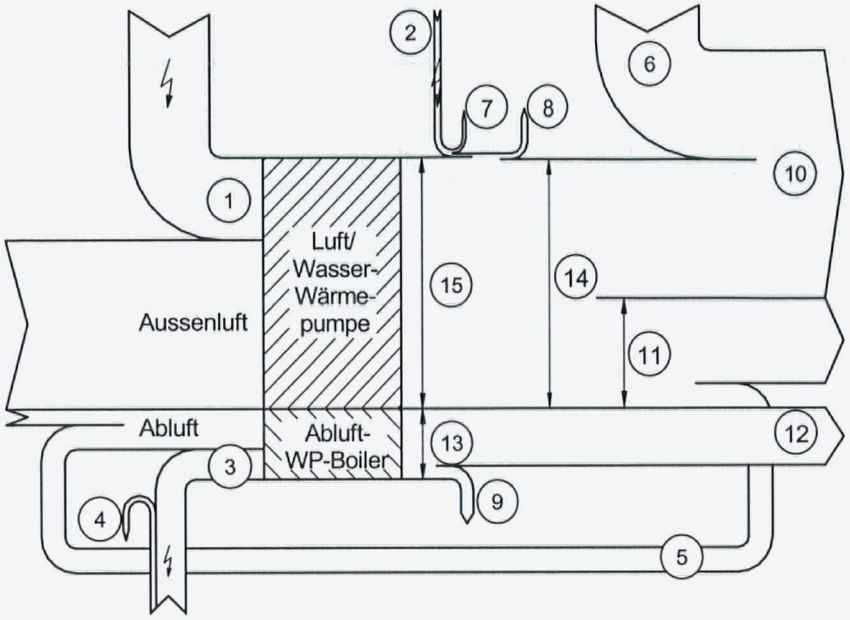
Beim Minergie-Nachweis wird für das Warmwasser der Standard-Wert nach SIA 380/1 von 3000 MJ/Person eingesetzt. Dies ergibt für den 3-Personen Haushalt in Schötz eine Jahresverbrauch von 60 MJ/m²a. Die auftretenden Verluste (z.B. Bereitschaftsverluste beim Speicher) sind dabei je nach Heizsystem im Wirkungsgrad des Erzeugers berücksichtigt oder werden, wie im Falle einer Wärmepumpe, vernachlässigt. Bei einer gemessene Jahresarbeitszahl des Wärmepumpen-Boilers von 2.3 beträgt der Energieverbrauch zur Aufbereitung des Warmwassers 26 MJ/m²a, welcher noch mit dem Faktor 2 gewichtet werden muss. Der gemessene Energieverbrauch des Wärmepumpen-Boilers von 30.7 MJ/m²a beinhaltet die Bereitschaftsverluste, welche nicht zur Nutzwärme hinzugerechnet werden dürfen, wenn der WP-Boiler im unbeheizten Keller steht.

Zusammengefasst gestaltet sich der Vergleich Messung / Minergie-Nachweis folgendermassen:

	Messung	Minergie-Nachweis	
Verbrauch nicht erneuerbarer Energie für Heizung	82.6	48.8	MJ/(m²a)
Verbrauch nicht erneuerbarer Energie für Warmwasser	30.7	26	MJ/(m²a)
Verbrauch nicht erneuerbarer Energie für Lüftung	5.6	5.6	MJ/(m²a)
Total Verbrauch nicht erneuerbarer Energie	118.9	80.4	MJ/(m²a)

Beim Minergiestandard muss der Stromverbrauch mit dem Faktor 2 multipliziert werden. Man erhält somit einen Wert von 160.8 MJ/m²a. Der geforderte Wert von 160 MJ/m²a wird nur unwesentlich überschritten.

4.2.2 Kennzahlen Schötz



1) Energiebezug Luft/Wasser-WP
2) Energiebezug Heizungspumpe
3) Energiebezug Abluf-WP-Boiler mit Ventilator während der Ladezeit
4) Energiebezug Abluftventilator ausserhalb der Ladezeit
5) Abwärmenutzung
6) Wärmegewinn Sonne, Personen und Elektrizität
7) nicht nutzbare Verluste Heizungspumpe
8) Verluste Heizwasserverteilung
9) Bereitschaftsverluste Boiler
10) Transmissionswärmeverluste
11) Lüftungswärmeverluste
12) Wärmebezug Warmwasser
13) Heizwärme Abluft-WP-Boiler
14) Heizwärmebezug
15) Heizwärme Luft/Wasser-WP

Abb. 36: Energieflussdiagramm „Schötz"

Die Zahlen bei den Berechnungsformeln der Kennzahlen beziehen sich auf die Nummern im Energieflussdiagramm (Abb. 36). Die angegebenen Unsicherheiten wurden gemäss der Fehlerfortpflanzung nach Gauss (mittlerer Fehler) berechnet.

Wärmeerzeugungsnutzungsgrade

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad Heizung WNG_h

$$WNG_h = \frac{15}{1} = \frac{Q_{h,WP}}{E_{h,WP}} = \underline{\underline{3.04 \pm 0.08}}$$

Gl. 17

Wärmeerzeugungsgrad Warmwasser WNG_w

$$WNG_w = \frac{13}{3} = \frac{Q_{w,WP}}{E_{w,WP}} = \underline{\underline{2.30 \pm 0.06}}$$

Gl. 18

Systemnutzungsgrade

Systemnutzungsgrade Heizung und Warmwasser SNG_{hw}

$$SNG_{hw} = \frac{14+13}{1+2+3} = \frac{Q_h + Q_w}{E_{h,WP} + E_{h,Pu} + E_{w,WP}} = \underline{\underline{2.48 \pm 0.05}}$$

Gl. 19

Systemnutzungsgrade Heizung SNG_h

$$SNG_h = \frac{14}{1+2} = \frac{Q_h}{E_{h,WP} + E_{h,Pu}} = \underline{\underline{2.69 \pm 0.06}}$$

Gl. 20

Systemnutzungsgrade Warmwasser SNG_w

$$SNG_w = \frac{12}{3} = \frac{Q_w}{E_{w,WP}} = \underline{\underline{1.88 \pm 0.05}}$$

Gl. 21

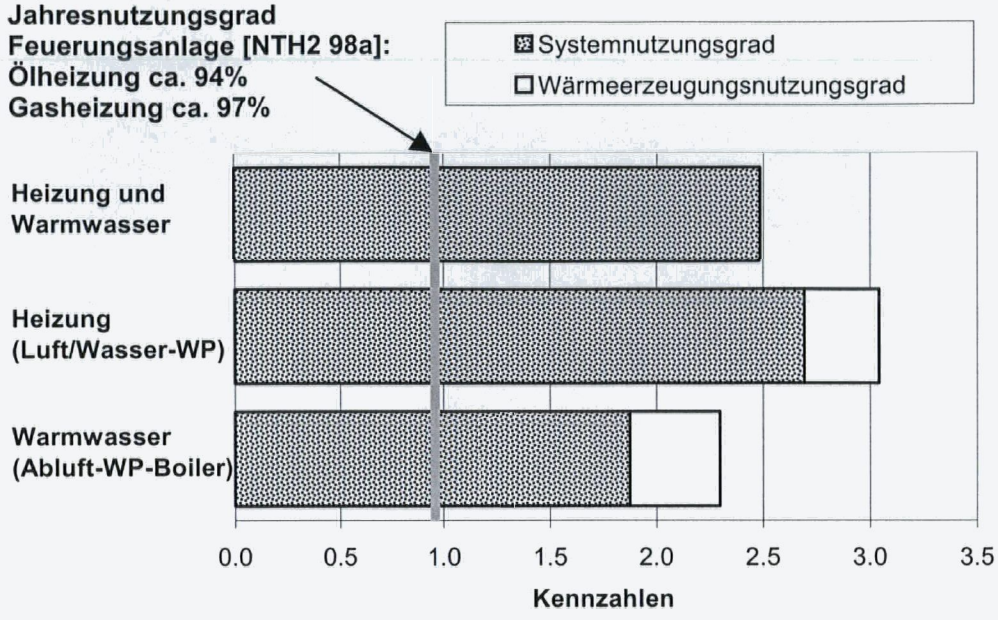


Abb. 37: Nutzungsgrade Schötz

4.2.3 Luftqualität und Tracergasmessungen Schötz

Als wichtigste Komfortgrössen wurden die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit und als Indikator für Luftverunreinigungen das Kohlendioxid (CO_2) kontinuierlich gemessen. Die Wirksamkeit der Lüftung wurde mit der Passiv-Tracergas-Methode ermittelt.

Aussenlufttemperatur

Die klimatischen Verhältnisse während der Heizperiode können als eher warm bezeichnet werden. Die gemessenen Heizgradtage $HGT_{20/12}$ (3308 K*h) liegen 7.5% unter dem langjährigen Mittelwert für Luzern (3575 K*h) [SIA381/3 82].

	Mittelwert °C	Maximum °C	Minimum °C
September 1999	16.5	10.6	21.8
Oktober 1999	9.5	0.9	17.4
November 1999	1.3	-7.3	14.8
Dezember 1999	1.0	-10.9	10.5
Januar 2000	-0.6	-16.3	11.2
Februar 2000	3.2	-5.1	15.0
März 2000	5.6	-4.2	17.5
April 2000	9.0	-3.3	24.6

Tab. 16: Aussenlufttemperaturen Schötz während der Heizperiode 1999 / 2000

Raumlufttemperatur

Von den Hausbewohnern wurde ein Sollwert von 23°C vorgegeben. Die Lufttemperatur betrug während der Heizperiode 1999/2000 im Erdgeschoss durchschnittlich 23.1°C, im Obergeschoss war der Mittelwert ca. 0.8 K tiefer. Das Heizungssystem ist so dimensioniert, dass die Raumtemperaturen, abgesehen von zwei Ausnahmen, immer über 20°C gehalten werden konnten. Während der Kälteperiode vom 27. bis 28. Januar sank mit Aussentemperaturen um –13°C die Temperatur im Erdgeschoss kurzzeitig auf das Minimum von 19.7°C (siehe Abb. 38).

Monat	T_{i_EG} °C	T_{i_OG} °C
Mai 1999	24.1	22.9
Juni 1999	23.9	22.6
Juli 1999	24.7	23.5
August 1999	24.0	23.0
September 1999	23.5	22.2
Oktober 1999	23.3	22.0
November 1999	22.7	21.8
Dezember 1999	22.8	22.2
Januar 2000	23.0	22.7
Februar 2000	23.4	22.6
März 2000	23.2	22.5
April 2000	22.8	22.3

Tab. 17: Mittlere Raumlufttemperaturen während der Messperiode

Da eine Beschattungseinrichtung fehlt, wird die Raumtemperatur im Erdgeschoss von der Sonneneinstrahlung stark beeinflusst. Am Nachmittag des 24. Januar erreichte die horizontale Sonneneinstrahlung einen Wert von ca. 580 W/m². Die Temperatur im Wohnzimmer stieg darauf hin um 3 K an. Aufgrund der wesentlich kleineren Fensterflächen im Obergeschoss konnte die Temperatur dort auf dem Sollwert gehalten werden (siehe Abb. 38).

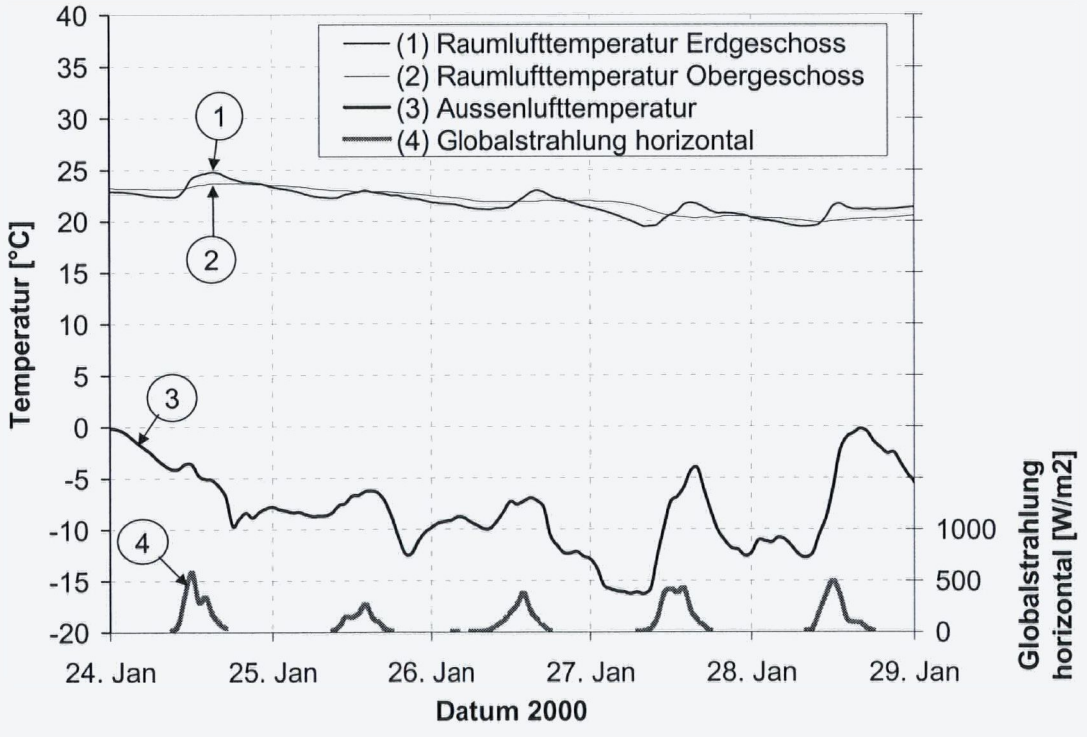


Abb. 38: Aussen- und Raumtemperaturverlauf sowie Globalstrahlung horizontal während der kältesten Periode

Im Obergeschoss schwankte die Temperatur deutlich weniger als im Erdgeschoss (siehe Abb. 39 und Abb. 40). Dies ist ebenfalls auf den Einfluss der Sonneneinstrahlung zurückzuführen: An sonnigen Tagen wurden im Erdgeschoss Temperaturen bis 28°C gemessen, im Obergeschoss lagen die Spitzenwerte ca. 2 K tiefer.

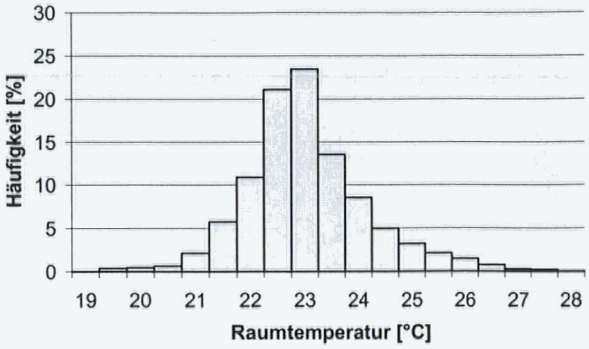


Abb. 39: Temperaturverteilung EG Oktober 1999 bis April 2000

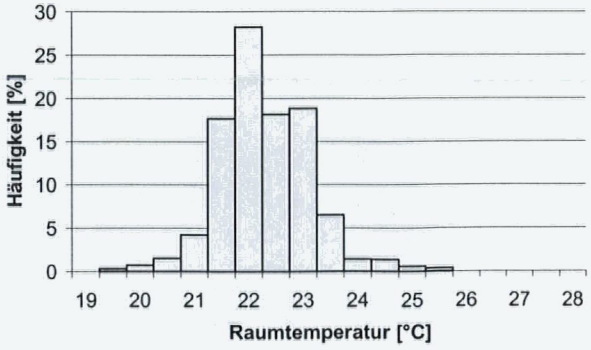


Abb. 40: Temperaturverteilung OG Oktober 1999 bis April 2000

Relative Luftfeuchtigkeit

Über die gesamte Heizperiode unterschritt die Luftfeuchtigkeit den behaglichen Bereich von 30%r.F. während ca. 7 Stunden (siehe Abb. 41). Die mittlere Luftfeuchtigkeit betrug ca. 37%r.F.

Monat	phi_{i_EG} [%r.F.]
Mai 1999	51.0
Juni 1999	52.1
Juli 1999	55.0
August 1999	59.9
September 1999	58.5
Oktober 1999	47.6
November 1999	40.0
Dezember 1999	34.4
Januar 2000	32.3
Februar 2000	32.5
März 2000	34.0
April 2000	37.7

Tab. 18: Mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Wohn- und Esszimmer während der Messperiode

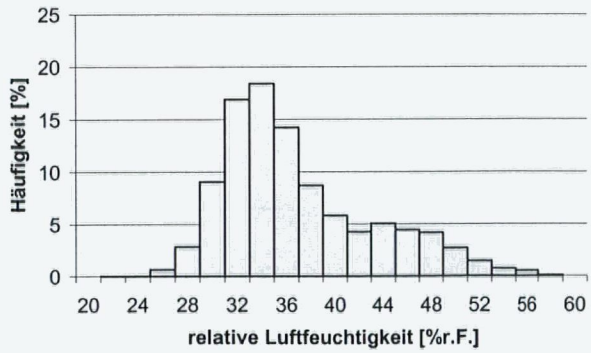


Abb. 41: Feuchteverteilung Wohn- und Esszimmer Oktober 1999 bis April 2000

Kohlendioxid

Als Luftqualitätsindikator wurde das Kohlendioxid (CO_2) der Raumluft im Wohn- und Esszimmer gemessen. Der CO_2-Mittelwert während den Wintermonaten Oktober 1999 bis April 2000 (740 ppm) war um ca. 14% höher als während den Sommermonaten Mai 1999 bis September 1999 (647 ppm). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass im Sommer die Fenster öfters geöffnet werden und die Raumbelegung geringer ist.

Monat	$CO2_{EG}$ [ppm]
Mai 1999	663
Juni 1999	647
Juli 1999	575
August 1999	686
September 1999	663
Oktober 1999	727
November 1999	775
Dezember 1999	768
Januar 2000	770
Februar 2000	719
März 2000	708
April 2000	716

Tab. 19: Mittlerer CO_2-Gehalt im Wohn- und Esszimmer während der Messperiode

Abgesehen vereinzelter Spitzenwerte schwankt der CO_2-Wert im Bereich zwischen 500 ppm und 900 ppm (Abb. 42). Bei diesen tiefen CO_2-Konzentrationen sind keine Beeinträchtigungen des Wohlbefindens zu erwarten.

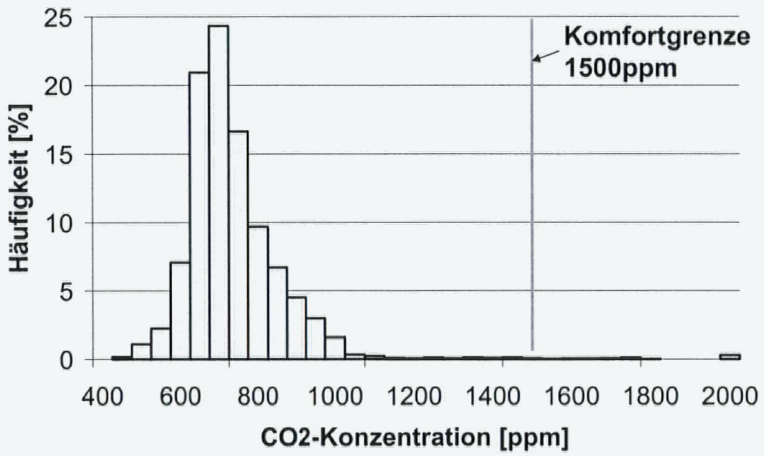


Abb. 42: CO_2-Verteilung im Wohn- und Esszimmer Oktober 1999 bis April 2000

Die Spitzenwerte übersteigen selten die Komfortgrenze von 1500 ppm und erreichen nur in Ausnahmefällen höhere Werte, welche kurzfristig bei intensiver Raumbelegung auftreten (siehe Abb. 43). Die Konzentration sinkt bei Verringerung der Personenzahl rasch wieder auf den Normalwert. Dies deutet auf eine effiziente Durchlüftung des Raumes mit der Abluftanlage hin.

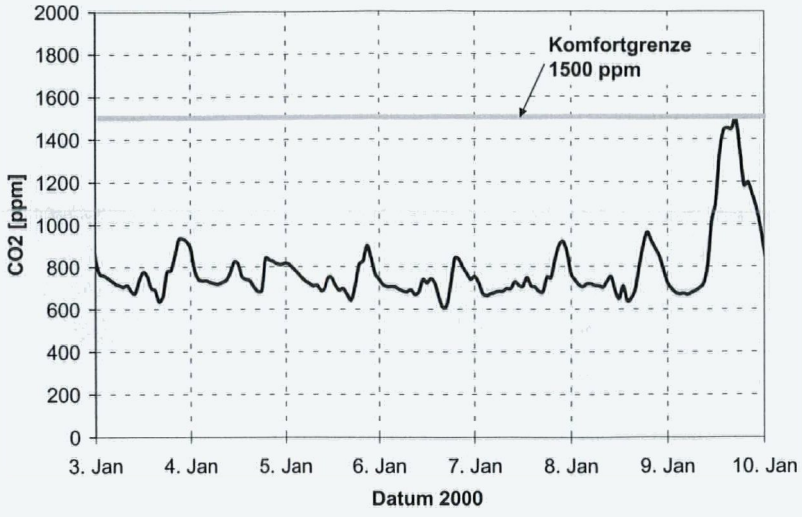


Abb. 43: Typischer Verlauf der CO_2-Konzentration über eine Woche im Wohnzimmer EG

Tracergasmessung

Mit der Passiv-Tracergas-Messung wurden die Luftvolumenströme zwischen dem Erdgeschoss (Zone B), dem Obergeschoss (Zone A) und der einströmenden Aussenluft ermittelt. Die Auswertungen wurden von der Firma PENTIAQ AB durchgeführt. In Tab. 20 ist eine Zusammenfassung der Resultate aufgeführt, die detaillierten Messwerte können im Bericht [PentIAQ 00] nachgelesen werden.

Während der Heizperiode betrug der mittlere Luftwechsel im Gebäude 0.40 h^{-1} (EG = 0.43 h^{-1}, OG = 0.36 h^{-1}).

Messbeginn	Messdauer [Tage]	Zone	Luftwechsel [h-1]
1999-06-21	10.2	A (OG)	0.49
		B (EG)	0.75
1999-07-01	31.8	A (OG)	0.57
		B (EG)	0.74
1999-11-10	53.9	A (OG)	0.11
		B (EG)	0.12
2000-01-03	30.8	A (OG)	0.39
		B (EG)	0.43
2000-02-03	23.7	A (OG)	0.3
		B (EG)	0.33
2000-02-27	38.4	A (OG)	0.4
		B (EG)	0.54

Tab. 20: mittlere Luftwechsel im OG (Zone A) und EG (Zone B)

4.2.4 Warmwasser Schötz

Die dreiköpfige Familie verbrauchte vom Mai 1999 bis April 2000 57.5 MJ/m^2a Warmwasser. Dies ergibt einen Jahresverbrauch von 2971 MJ/Person und entspricht damit dem Nutzenergiebedarf für Warmwasser nach SIA 380/1 von 3000 MJ/P a. Die Warmwassertemperatur (Boiler oben) beträgt im Mittel 50 °C.

Die Bereitschaftsverluste liegen mit ca. 23% des Nutzenergiebedarfes Warmwasser im üblichen Rahmen. Eine Untersuchung des Abluft-WP-Boilers nach der Heizperiode 98/99 zeigte, dass die Isolation mangelhaft war. Der Boiler ist mit einer 5 cm dicken Dämmmatte isoliert, wobei der Speicherboden und ein Schlitz von 6 cm Breite in der unteren Hälfte nicht gedämmt waren. Zu Beginn der Heiz-

periode 1999/2000 wurden die blanken Teile nachisoliert. Die Bereitschaftsverluste konnten mit dieser Massnahme von 2.2 W/K auf 1.8 W/K reduziert werden.

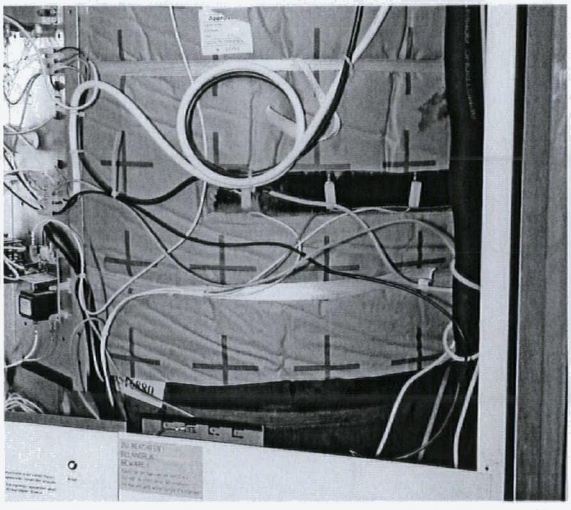


Abb. 44: Boiler ab Werk: Boden und ein Schlitz von ca. 6 cm Breite sind nicht isoliert

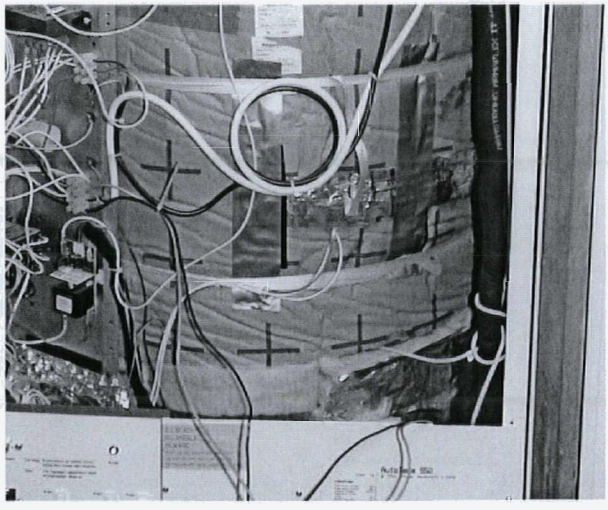


Abb. 45: Der Boden und der Schlitz wurden nachträglich isoliert

Die Energieaufwendung zur Aufbereitung des Warmwassers beträgt ca. 25% des gesamten Energieverbrauches für Heizung, Lüftung und Warmwasser (bei einer Raumtemperatur von 20°C statt der effektiven 23°C wäre der Anteil bei ca. 33%).

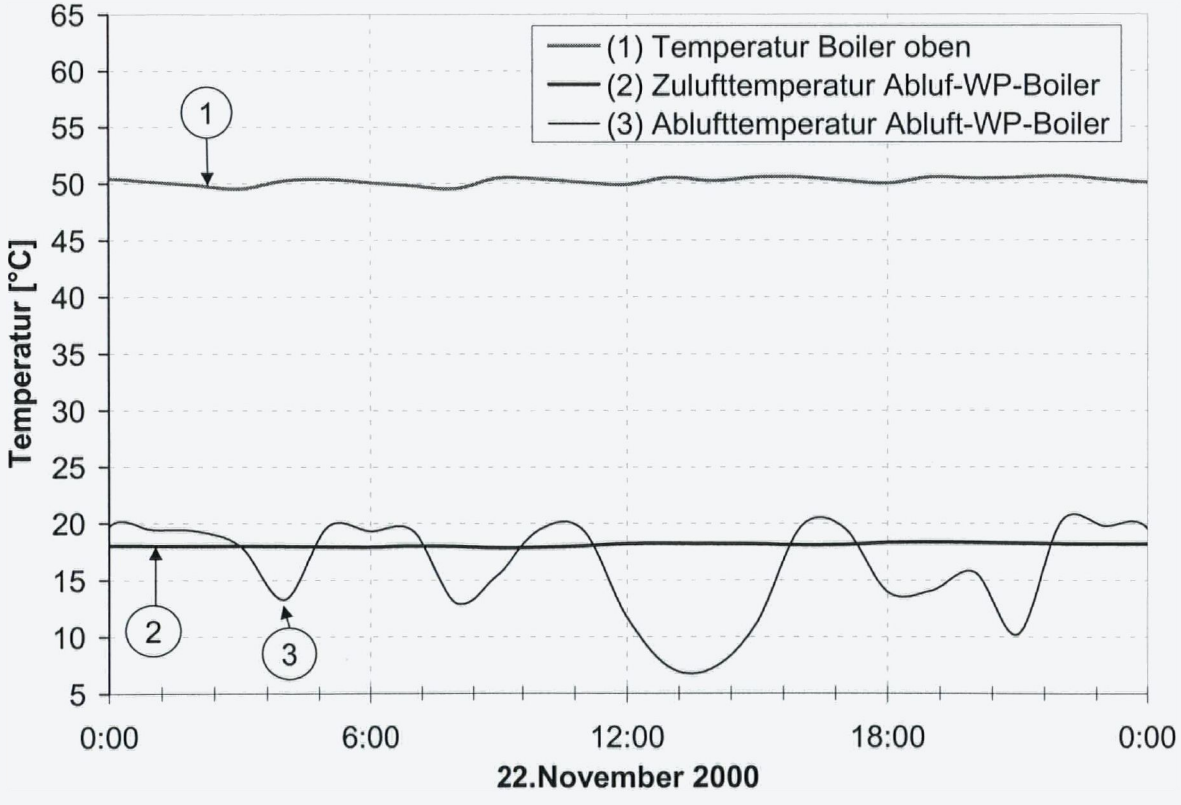


Abb. 46: Typischer Tagesverlauf der Speicher- und der Zu und Ablufttemperatur

4.3 Ergebnisse Fully

4.3.1 Energieflussdiagramm Fully

Für die Messperiode von Woche 48/1999 - 17/2000 (1. Nov. 99 - 30. April 00) sind die gemessenen oder aus den Messwerten ermittelten Energieflüsse vom HTM200 in Form eines Energieflussdiagramms in Abb. 47 dargestellt. Dazu hat das GLH-Modul noch eine Wärmemenge vom 7.8 MJ/m² produziert. Da es aber während der Messperiode infolge technischer Probleme praktisch nicht funktioniert hat, wurde darauf verzichtet, es im Energieflussdiagramm aufzunehmen bzw. ein ähnliches Energieflussdiagramm darzustellen. (Falls nichts anderes explizit erwähnt wird, bezeichnen wir hier als Wärmeerzeugungsanlage (WE) das HTM200 alleine).

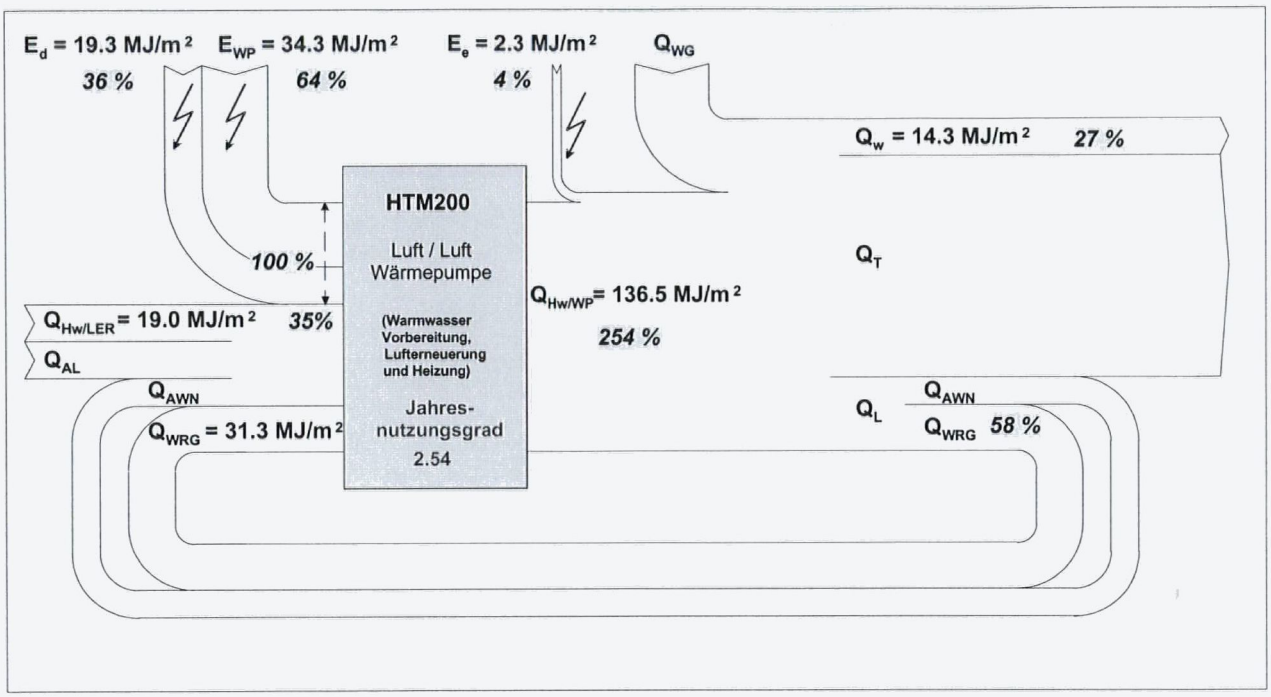


Abb. 47: "Fully" : Energieflussdiagramm des HTM200 für die Wochen 48/1999 - 17/2000 (1. Nov. 99 - 30. April 00)
($Q_{hw/WP}$ = Heizwärme WP, Q_w = Wärmebedarf für Warmwasser, Q_T = Transmissionsverluste, Q_{WG} = Wärmegewinne (Sonne, Personen, Elektrizität), Q_L = Lüftungswärmebedarf, Q_{WRG} = Wärmerückgewinnung, Q_{AWN} = Abwärmenutzung, $Q_{hw/LER}$ = Wärme aus dem Erdregister, Q_{AL} = Wärme aus der Aussenluft, E_{WP} = Strombedarf WP (Verdichter), E_d = Strombedarf Ventilatoren und Regelung, E_e = Strombedarf Heizstäbe).

4.3.2 Überblick der gemessenen Größen

Mit den unter 2.3.2 erwähnten Schwierigkeiten wurde das HTM200 im ganzen Winter 1999 - 2000 gemessen. Eine zusammenfassende Darstellung der wöchentlichen Hauptresultate und –Messungen findet man in Tab. 21 und Tab. 22.

Unter der Wochenarbeitszahl der Wärmepumpe **$WAZ_{WP/hw}$** versteht man hier den Quotienten aus der wöchentlich durch die Wärmepumpe alleine produzierten Wärme (Heizung und Warmwasser) durch den elektrischen Verbrauch des Verdichters.

Unter dem Wochennutzungsgrad der Wärmeerzeugung **$WNG_{WE/hw}$** versteht man den Quotienten aus der durch das HTM200 wöchentlich produzierten Wärme (inklusive Wärmegewinne durch Erdregister

und Wärmetauscher) und dem elektrischen Verbrauch für den Verdichter, die Ventilatoren und die Regelung. Die Speicherverluste des Warmwasser-Boilers sind im $WNG_{WE/hw}$ mitberücksichtigt worden. Die Energie für die elektrische Heizstäbe ist darin nicht enthalten.

Unter dem Wochennutzungsgrad **WNG_{hw}** versteht man den Quotienten aus der wöchentlich gesamten produzierten Wärme (Verdichter, Erdregister, Wärmetauscher und Heizstäbe) und der gesamten verbrauchten elektrischen Energie. Für das ganze Jahr wäre die Bezeichnung Systemnutzungsgrad **SNG_{hw}**.

Messgenauigkeit : Mit den in der Tab. 7 angegebenen Genauigkeiten für die einzelne Messgeräte, erwartet man, dass diese 3 Kennzahlen auf 10% genau bestimmt worden sind.

Woche (Winter 99-00)	Anfang	Ende	T_aussen	RF_aussen	G	$WAZ_{WP/hw}$	$Q_{WP/hw}$	$WNG_{WP/hw}$	$Q_{WE/hw}$	$WNG_{WE/hw}$
			oC	%	W/m2	-	MJ/Wo	-	MJ/Wo	-
45	1-nov	7-nov	10.9	76.7	83	2.57	857	2.33	857	2.33
46	8-nov	14-nov	6.0	72.4	75	2.66	1866	2.76	1866	2.76
47	15-nov	21-nov	1.8	77.5	42	2.75	2144	2.76	2147	2.76
48	22-nov	28-nov	0.4	73.3	140	2.54	1965	2.93	1969	2.92
49	29-nov	5-déc	3.0	70.0	143	2.55	1759	2.77	1763	2.76
50	6-déc	12-déc	2.9	72.1	71	2.45	1748	2.73	1796	2.61
51	13-déc	19-déc	1.3	76.2	57	2.49	1771	2.92	1773	2.91
52	20-déc	26-déc	1.3	65.9	104	2.57	1779	2.56	1865	2.39
53	27-déc	2-janv	0.6	77.9	68	2.51	1543	2.39	1562	2.35
1	3-janv	9-janv	1.0	76.0	125	2.50	1743	2.88	1842	2.62
2	10-janv	16-janv	0.3	71.4	151	2.21	1572	2.61	1692	2.34
3	17-janv	23-janv	0.3	73.7	103	2.50	1752	2.93	1831	2.70
4	24-janv	30-janv	-1.1	72.1	135	2.13	1534	2.63	1576	2.52
5	31-janv	6-févr	5.5	74.3	166	2.20	1233	2.21	1244	2.19
6	7-févr	13-févr	5.6	76.5	70	2.78	1629	2.57	1635	2.55
7	*14-févr*	*17-févr*	4.6	83.2	65	2.54	1671	2.64	1676	2.63
8	21-févr	27-févr	4.3	65.3	179	2.46	1587	2.51	1618	2.44
9	28-févr	5-mars	6.1	65.3	155	2.60	1454	2.54	1469	2.50
10	6-mars	12-mars	9.5	62.1	196	2.70	1221	2.24	1224	2.24
11	13-mars	19-mars	9.5	60.8	176	2.92	1013	2.30	1017	2.29
12	20-mars	26-mars	9.9	60.1	166	2.32	935	1.93	941	1.92
13	27-mars	2-avr	7.9	59.4	185	2.64	1309	2.30	1314	2.29
14	3-avr	9-avr	11.3	53.3	162	3.12	555	1.86	561	1.84
15	10-avr	16-avr	11.8	57.2	124	2.44	572	2.06	574	2.05
16	17-avr	23-avr	14.2	56.3	153	2.96	545	2.04	548	2.03
17	24-avr	30-avr	15.2	63.1	134	2.89	265	1.67	266	1.66
	1-nov	**30-avr**	**5.5**	**68.9**	**124**		**36023**	**2.54**	**36625**	**2.48**

Tab. 21: Winter 1999-2000. Überblick der Klimadaten (Temperatur (T_aussen), relative Feuchte (RF_aussen) der Aussenluft und mittlere Sonneneinstrahlung auf die Südfassade (G)) und der Wochenarbeitszahlen (WAZ), und Wochennutzungsgrade (WNG) des HTM200. Bedeutung der Indizes : WP: Wärmepumpe (Verdichter), WE: Wärmeerzeugungsanlage (HTM200), hw: Heizung und Warmwasser.

Woche (Winter 99-00)	Anfang	Ende	$Q_{hw/LER}$	Q_{WRG}	Q_{AWN}	Q_{WE-EG}	$Q_{WE-EG/el}$	Q_{WE-OG}	$Q_{WE-OG/el}$	Q_{W}	$Q_{W/el}$	$Q_{WE/WP}$	Q_{WE}	$E_{WE/WP}$	$t_{WE/WP}$	$n_{WE/WP}$	$E_{WE/GLH}$	$E_{WE/HTM+GLH}$	E
			MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	h/Wo	1/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo	MJ/Wo
45	1-nov	7-nov	*116*	250	192	126	0	138	0	209	0	473	857	184	64	55	0	368	855
46	8-nov	14-nov	401	280	374	479	0	473	0	238	0	1190	1866	447	156	9	0	677	1225
47	15-nov	21-nov	526	342	452	530	0	607	0	163	4	1296	2147	471	165	24	7	787	1368
48	22-nov	28-nov	538	354	448	482	0	474	0	230	3	1182	1969	466	163	40	143	831	1439
49	29-nov	5-déc	299	319	425	492	1	500	1	136	2	1124	1763	441	154	79	4	643	998
50	6-déc	12-déc	295	351	420	505	0	490	46	133	2	1079	1796	440	154	127	0	688	996
51	13-déc	19-déc	362	364	428	438	0	464	0	144	1	1044	1773	420	146	159	0	609	966
52	20-déc	26-déc	312	374	448	477	85	586	0	120	0	1098	1865	428	149	181	0	780	1231
53	27-déc	2-janv	274	336	321	386	4	407	0	154	15	928	1562	350	122	125	6	671	1240
1	3-janv	9-janv	306	380	408	549	0	494	89	111	10	1054	1842	422	147	194	0	704	994
2	10-janv	16-janv	311	360	411	506	58	421	57	116	6	921	1692	417	146	210	0	723	1019
3	17-janv	23-janv	371	423	386	469	45	517	24	128	10	1035	1831	414	145	212	181	876	1174
4	24-janv	30-janv	458	382	358	447	37	370	0	97	5	872	1576	409	143	223	399	1064	1328
5	31-janv	6-févr	122	327	320	398	0	294	0	133	11	814	1244	370	129	130	195	783	1042
6	7-févr	13-févr	108	356	413	472	0	458	0	*230*	6	1154	1635	415	145	129	0	640	924
7	14-févr	17-févr	174	391	448	475	0	505	0	*136*	5	1110	1676	438	153	127	100	748	1012
8	21-févr	27-févr	127	376	418	468	13	503	8	*133*	10	1073	1618	437	152	146	4	667	1013
9	28-févr	5-mars	80	384	343	418	0	441	0	*144*	15	989	1469	380	133	100	176	780	1002
10	6-mars	12-mars	-62	334	314	392	0	421	0	*120*	2	931	1224	345	120	82	31	581	795
11	13-mars	19-mars	-18	310	210	275	0	301	0	*145*	4	726	1017	249	87	57	36	484	722
12	20-mars	26-mars	-29	283	241	311	0	243	0	*111*	6	658	941	284	99	49	84	582	854
13	27-mars	2-avr	28	328	326	405	0	420	0	*116*	4	937	1314	355	124	60	9	583	838
14	3-avr	9-avr	-41	255	91	109	0	127	0	*128*	6	359	561	115	40	32	5	311	545
15	10-avr	16-avr	39	148	140	145	0	152	0	*97*	2	392	574	161	56	29	12	293	546
16	17-avr	23-avr	-22	157	121	139	0	147	0	*133*	3	416	548	141	49	25	10	281	520
17	24-avr	30-avr	-51	111	59	15	0	23	0	*163*	1	200	266	69	24	42	6	167	462
	1-nov	30-avr	**5025**	**8274**	**8514**	**9906**	**243**	**9974**	**224**	**3764**	**134**	**23054**	**36625**	**9068**	**3166**	**2646**	**1409**	**16320**	**25109**

Tab. 22: Winter 1999-2000. Überblick der Wärmemengen (Q), der Elektrizitätsverbräuche (E), der Betriebszeit des Verdichters (t) und der Anzahl Einschaltvorgänge des Verdichters (n). E bedeutet den gesamten Elektrizitätsverbrauch (Heizung und Haushalt). Bedeutung der Indizes : LER: Luft-Erdregister, WRG: Wärmerückgewinnung, AWN: Abwärmenutzung, WE-EG (WE-OG): Wärmeerzeugungsanlage-Erdgeschoss (-Obergeschoss), /el: Heizstab, WE/WP: Verdichter der Wärmeerzeugungsanlage, WE: Wärmeerzeugungsanlage.

4.3.3 Kennzahlen Fully

- Die wöchentlichen Arbeitszahlen **$WAZ_{WP/hw}$** des HTM200 liegen für die betrachtete Heizperiode um den Wert 2.6 herum;
- Die wöchentlichen Nutzungsgrade **$WNG_{WE/hw}$** können, dank dem Erdregister und dem Wärmetauscher, den maximalen Wert von 2.9 erreichen. Der Nutzungsgrad **$SNG_{WE/hw}$** für das Winterhalbjahr beträgt 2.54.
- Die wöchentlichen Nutzungrade **WNG_{hw}** inklusive elektrischer Zusatzheizung unterscheiden sich kaum von den Nutzungsgraden **$WNG_{WE/hw}$** Dies zeigt, dass die Heizstäbe kaum in Betrieb waren.
- Wird zur Berechnung des Wärmeerzeugungsnutzungsgrads der Beitrag der Wärmerückgewinnung wie bei den Anlagen in Grafstal und Schötz abgezogen, ergibt sich für das Winterhalbjahr ein **WNG_{hw}** von **2.9** und ein Systemnutzungsgrad **SNG_{hw}** von **2.5**.

4.3.4 Regelung Heizanlage Fully

Da das HTM200 für das Haus in Fully eher unterdimensioniert ist, um den Gesamtwärmebedarf zu decken, ist zu erwarten, dass die Wärmepumpe praktisch ununterbrochen läuft. In der untersuchten Messperiode (November bis April) ist sie während ca. 72 % der Gesamtzeit in Betrieb gewesen (Im Monat Dezember alleine war sie sogar 90 % in Betrieb). Dies bedeutet aber nicht, dass die Zahl der Ein-/Ausschaltvorgänge sehr klein ist:

- Am Anfang des Winters ist die Aussentemperatur zwar tief, die Temperatur am Ausgang des Erdregisters liegt aber wesentlich höher. Somit bleibt die Temperatur der durch den Verdampfer gekühlten Fortluft grösser als 0 ^{0}C. Eine Enteisung ist nicht notwendig;
- Dagegen wird gegen Mitte Januar bis zu 30 Mal im Tag enteist. Der Grund liegt darin, dass, infolge der kühleren Luft am Ausgang des Erdregisters, mehr Wärme durch die Wärmepumpe produziert und damit auch über den Verdampfer mehr Wärme zugeführt werden muss. Die Temperatur der Fortluft sinkt deutlich unter 0 ^{0}C.

Die *Abb. 48* und *Abb. 49* zeigen die wöchentlichen Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge des Verdichters sowie dessen Betriebsstunden als Funktion der mittleren Aussenluft-Temperatur.

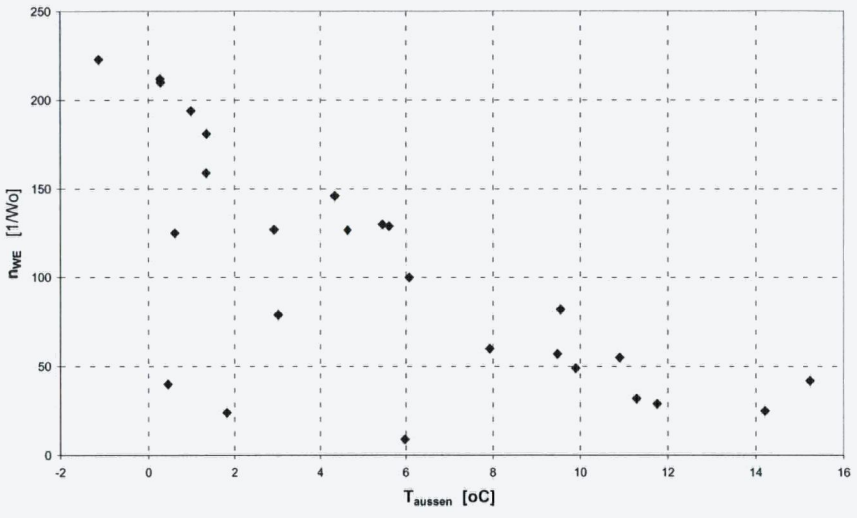


Abb. 48: Verdichter des HTM200 : Anzahl der Aus- und Einschaltvorgänge als Funktion der wöchentlichen mittleren Aussenluft-Temperatur.

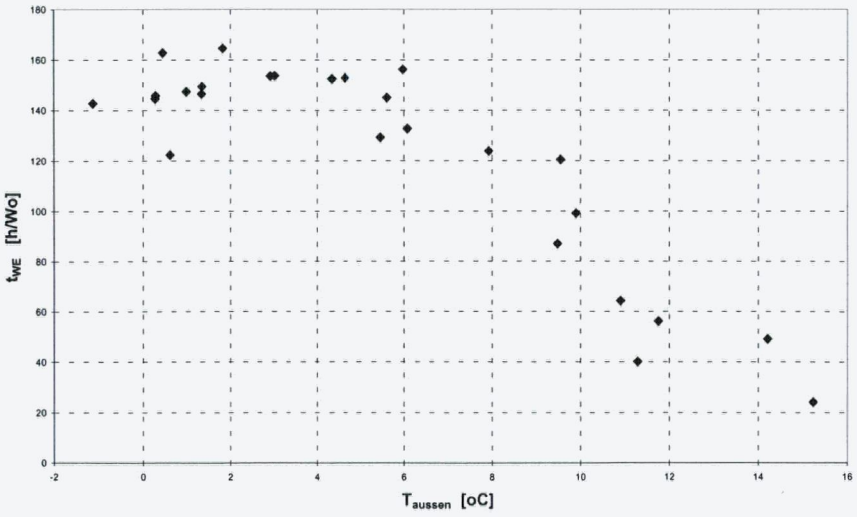


Abb. 49: Anzahl der Wochen-Betriebsstunden des Verdichters des HTM200 als Funktion der mittleren Aussenluft-Temperatur.

4.3.5 Warmwasser Fully

Die Erwärmung des Warmwassers wird zum größten Teil mit der Wärmepumpe des HTM200 produziert (für das ganze Winterhalbjahr sind es mehr als 96 % der gesamten Wärmemenge; der Rest wird durch den elektrischen Heizstab produziert). Für die drei Einwohner des Hauses wird das Warmwasser auf eine Temperatur von ca. 55 °C erwärmt, was einer Nutzwärmemenge von ca. 150 MJ/Woche entspricht, Die Aufladung des Boilers findet in der Nacht statt und dauert zwischen 3 und 4 Stunden. Während dieser Zeit beheizt die Wärmepumpe die Zuluft nicht : Es wird also kühle Luft (abhängig von der Aussenluft-Temperatur, aber nie kühler als 17 ^{0}C) in die Wohnung eingeblasen, sodass eine Kühlung (!) des Hauses während dieser Aufladezeit stattfindet.

4.3.6 Luftqualität Fully

Mit den beiden Größen relative Feuchte und CO_2-Gehalt kann die Luftqualität zu charakterisiert werden. Die Erfahrungen aus den Messungen 99/00 werden im folgenden beschrieben:

- Relative Feuchte: Die Innenluft, die durch den Betrieb des HTM200 entsteht, kann als trocken bezeichnet werden. Für Winterwoche Nummer 4 (24. Januar), während der die Aussenluft -1.1 °C kalt war (Wochenmittelwert) und 72 % relative Feuchte aufwies, betrugen für die Innenluft die wöchentlichen Mittelwerte der relativen Feuchte 31.2 % im Wohnraum und 31.8 % im oberen Zimmer (Abb. 50).
- CO_2-Gehalt: Der mittlere gemessene CO_2-Gehalt im Wohnraum liegt bei ca. 700 ppm (Abb. 50). Dieser Wert setzt sich zusammen aus einem Basisgehalt von 600 ppm, der während der meisten Zeit auftritt, und Spitzenwerten am Abend von 800-1000 ppm. Das ist ein klares Indiz dafür, dass der Luftwechsel, den das HTM200 produziert ($n \approx 0.4$ 1/h), gut ausreicht, um die Qualität der Innenluft zu gewährleisten.

4.3.7 Thermischer Komfort

Mit Hilfe des HTM200 alleine können nur die unteren Werte einer normalen Behaglichkeit erreicht werden. 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, obwohl das Wohnstudio (40 m^2) im Kellergeschoss meistens unbewohnt und damit auch ungeheizt war. Das war zu erwarten : ein 900 W_{el} starker Verdichter produziert eine thermische Leistung von ca. 2400 W_{th}. Dazu kommen noch ungefähr je 500 W_{th} vom Erdregister und von der Wärmerückgewinnung. Auf der anderen Seite, rechnet man 250 W_{th} für die Warmwasserproduktion und 1500 W_{th} zur Deckung der Lüftungsverluste, dann bleiben nur 1250 W_{th} für die Raumheizung (und eventuell noch zusätzlich 800 W_{th}, die durch die elektrischen Heizstäbe produziert werden können). Die Abb. 50 zeigt den wöchentlichen Verlauf der Temperaturen im Wohnraum (Mittelwert 20.9 °C) und in einem Schlafzimmer im Obergeschoss (Mittelwert 20.0 °C). In der Abb. 51: werden die Klimadaten für die gleiche Winterwoche dargestellt.

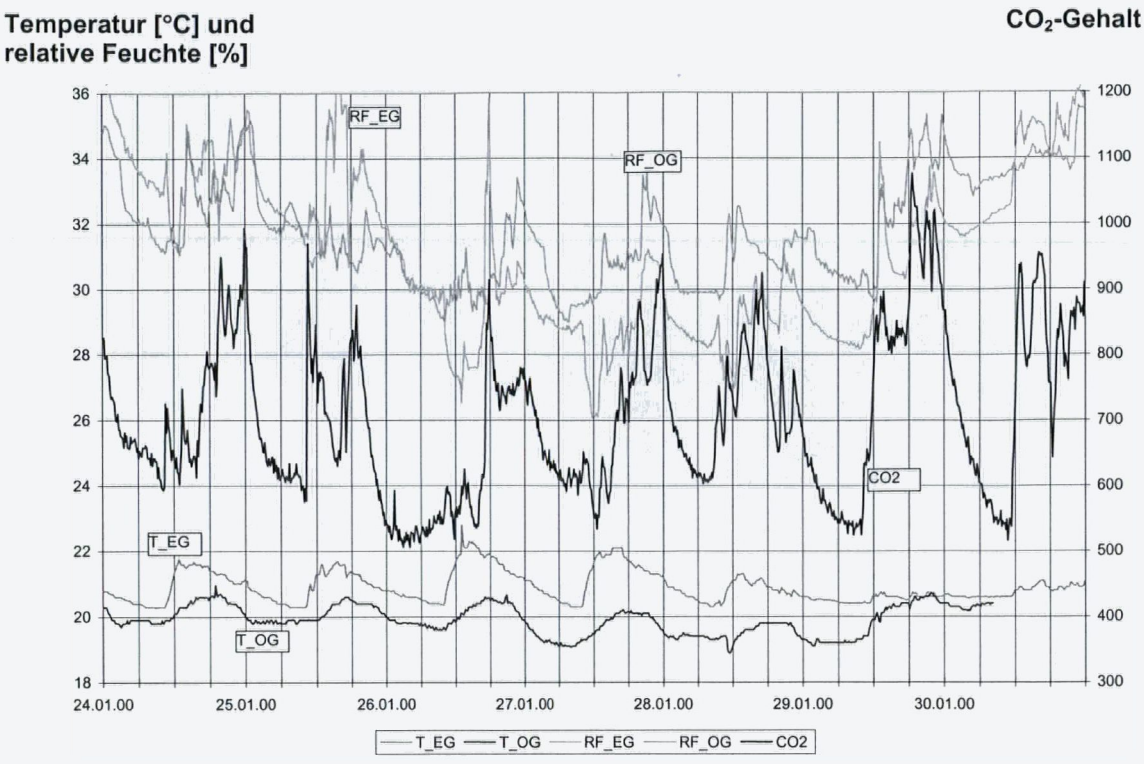


Abb. 50: Die Komfort-Grössen: Temperaturen im Erdgeschoss und im Obergeschoss (T_EG und T_OG), relative Feuchten im Erdgeschoss und im Obergeschoss (RF_EG und RF_OG) und CO_2-Gehalt (CO2).

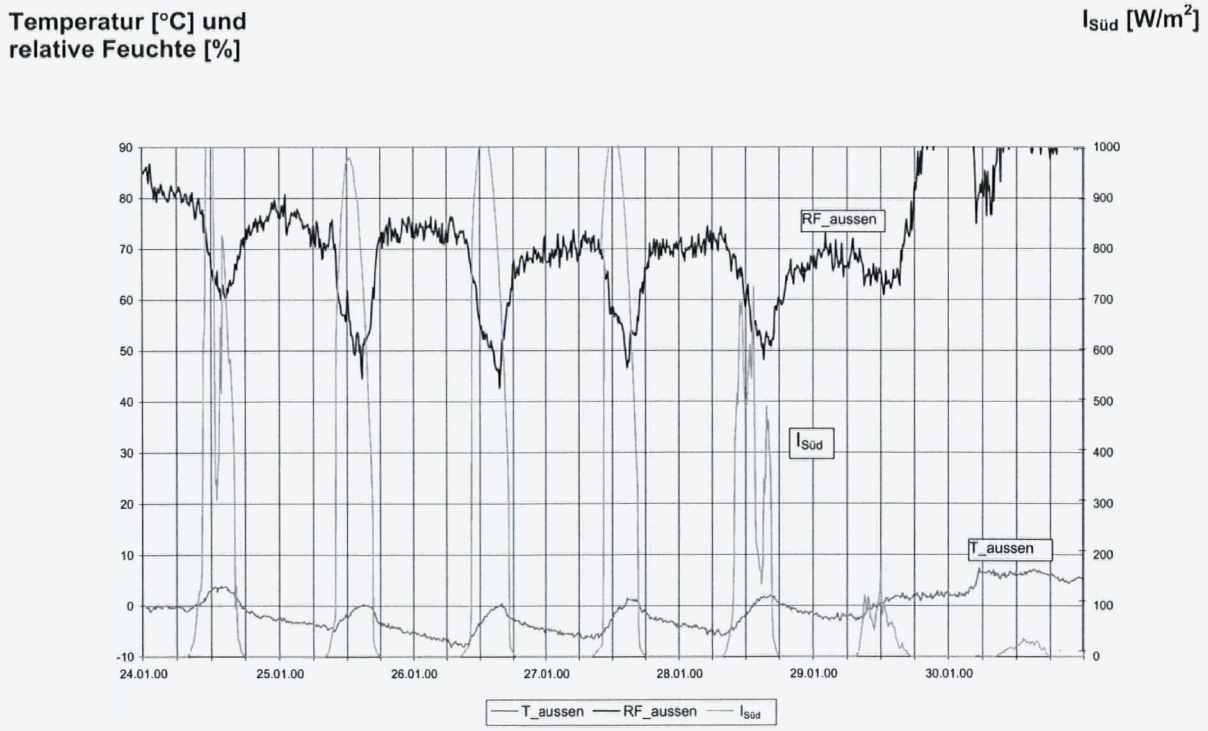


Abb. 51: Klima-Grössen: Temperatur (T_aussen), relative Feuchte (RF_aussen) und globale Sonneneinstrahlung vertikal Süd ($I_{Süd}$).

4.3.8 Erdregister

Der Erwärmungseffekt des Erdregisters auf die Aussenluft ist für eine kalte Winterwoche in der Abb. 53 dargestellt. Was die aus dem Erdregister entzogenen Wärme anbelangt, ist aus der Abb. 52 ersichtlich, dass im Laufe der Messperiode das Erdregister wöchentlich bis zu 540 MJ Wärme geliefert hat, was einer mittleren Leistung von rund 900 W_{th} entspricht. Auf der anderen Seite erkennt man, dass es ab anfangs März praktisch keine Wärme mehr geliefert hat, oder sogar ab anfangs April einen negativen Effekt gehabt hat: Es wäre sicher vorteilhaft, je nach Jahreszeit, das Erdregister z.B. mit einer Klappe umgehen zu können.

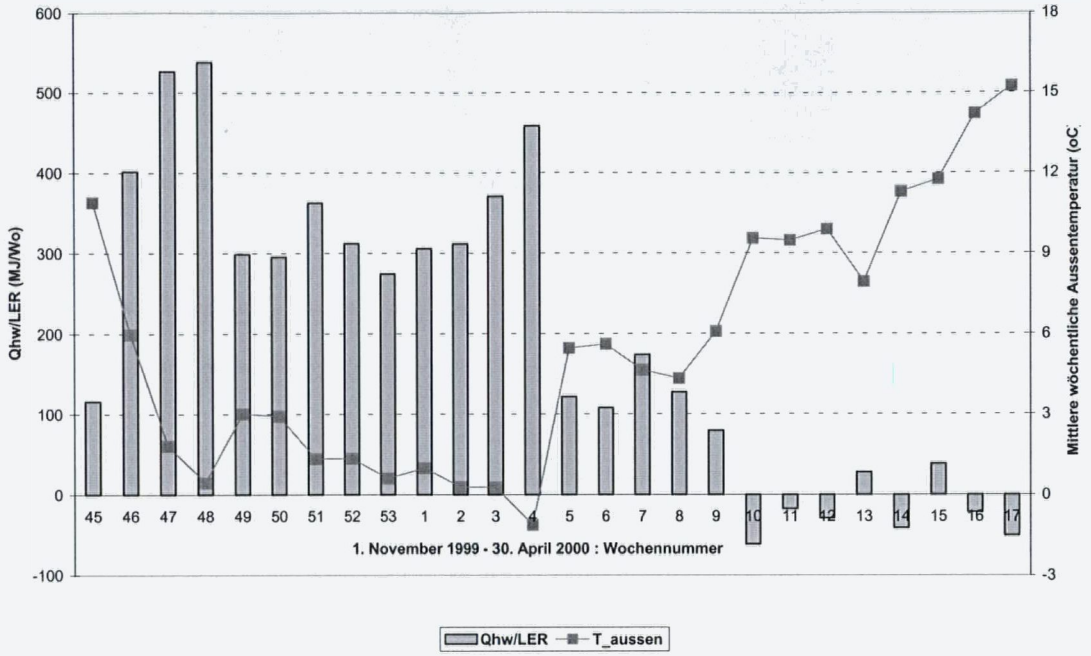


Abb. 52: Wärmemenge, die wöchentlich aus dem Erdregister entzogen wurde (Qhw/LER) und mittlere Aussenluft-Temperatur.

Temperatur [°C]

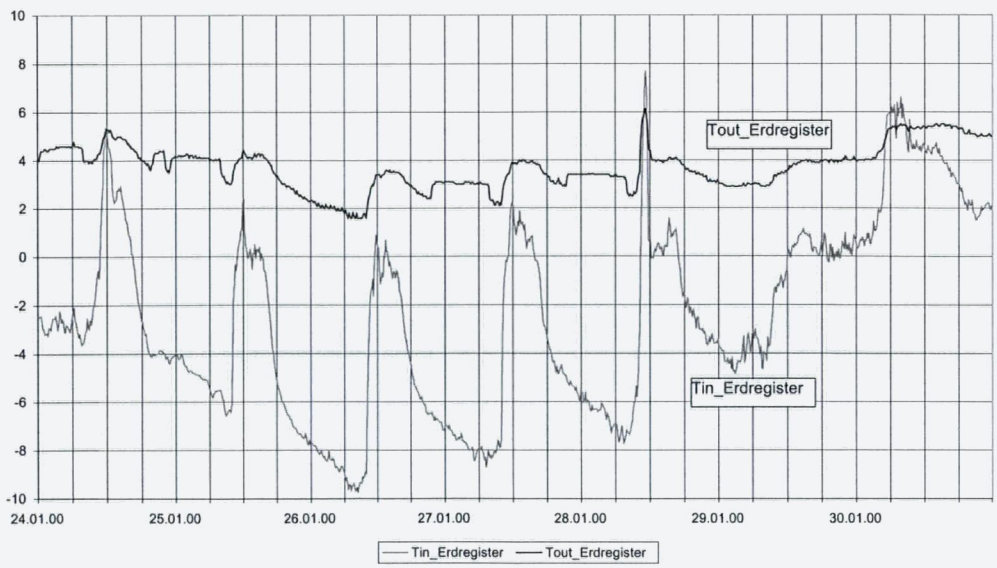


Abb. 53: Luft-Temperaturen vor und nach dem Erdregister (Tin_Erdregister, Tout_Erdregister)

4.4 Erprobung verschiedener Reglertypen

Nachdem in der vorhergehenden Phase 2 des Projekts [NTH2 98a] Vergleiche zwischen dem herkömmlichen Regelungskonzept (Zweipunktregelung) und neuen Konzepten (modellbasierte Regelung) primär mittels Simulationen durchgeführt wurden, soll in dieser Phase 3 des Projekts die Tauglichkeit von neuen Regelkonzepten mittels Feldtests in der Pilotanlage Schötz gezeigt werden.

Insgesamt wurden drei Reglertypen an der Pilotanlage Schötz erprobt. Diese Reglervarianten werden in den Kapiteln 4.4.3 bis 4.4.5 beschrieben. Nur in einem Fall (beobachterbasierter Regler, Kapitel 4.4.3) handelt es sich um eine eigentliche Regelung, da die Rücklauftemperatur als Rückführsignal dem Regler zur Verfügung steht. In den beiden anderen Fällen (energiekennlinienbasierte Steuerung und LQ-optimierte Steuerung mit Prädiktion der Aussentemperatur, Kapiteln 4.4.4 und 4.4.5) liegen nur Steuerungen vor, in denen kein Rückführsignal (weder Raumtemperatur noch Rücklauftemperatur) dem Regler zur Verfügung steht.

Für die Auslegung des beobachterbasierten Reglers (Kapitel 4.4.3) und der LQ-optimierten Steuerung mit Prädiktion der Aussentemperatur (Kapitel 4.4.4) wird ein Modell der Gebäudedynamik verwendet, so dass es sich bei diesen Reglervarianten um modellbasierte Konzepte handelt. Dieses Modell wird als erstes vor der Beschreibung der Reglervarianten im nächsten Kapitel vorgestellt. Die bei der energiekennlinienbasierten Steuerung verwendete Energiekennlinie wird ebenfalls mit Hilfe dieses Modells bestimmt.

Im Gegensatz zu den konventinellen Regelungskonzepten mit einem witterungsgeführten Zweipunktregler, wird das Ein/Aus-Stellsignal des Wärmepumpenkompressors bei den hier neu erprobten Reglertypen durch Pulsbreitenmodulation erzeugt. Der Funktionsprinzip der Pulsbreitenmodulation wird ebenfalls vor der Beschreibung der Reglervarianten im Kapitel 4.4.2 vorgestellt. Der Einbau der Reglerhardware und der Vergleich der erzielten Resultate mit den verschiedenen Reglervarianten sind in den Kapiteln 4.4.6 und 4.4.7 präsentiert.

4.4.1 Modell der Gebäudedynamik

Im Rahmen des Projekts „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen" [Reiner 98] wurde ein Modell dritter Ordnung mit sechs Parametern für die Beschreibung der Gebäudedynamik entwickelt (vgl. auch [Shafai 00a] und [Shafai 99]).

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Parameter des Modells erfolgreich mit Hilfe der Methode der Parameteridentifikation (vgl. [Söderstrom 89] resp. [Ljung 87]) bestimmt werden können. Die Parameterschätzung beruht dabei auf der Messung der folgenden Grössen: Die (Aussen-)Lufttemperatur T_L, eine Referenzraumtemperatur T_R, der Volumenstrom der Fussbodenheizung, die Vorlauf- und Rücklauftemperatur T_{VL} und T_{RL} der Bodenheizung. Wenn im Hydraulikschema keine Thermostatventile vorhanden sind, kann der Volumenstrom als konstante Grösse vorausgesetzt werden. Da er i.a. bekannt ist, muss er in diesem Fall nicht gemessen werden.

In der Abb. 54 ist das „Gebäudemodell" in Form eines Blockschaltbildes in drei Teilsysteme unterteilt: Enthalpiedifferenz (des Heizungsfluids), Wärmeabgabe und Raum.

Im Block „Enthalpiedifferenz" wird die Enthalpiedifferenz des Heizungswassers berechnet.

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

Gl. 22

Das Teilsystem „Wärmeabgabe" ist durch zwei Energiespeicher (das Heizungswasser in den Rohren und der Fussboden) mit den Zustandsgrössen Rücklauftemperatur T_{RL} und Bodentemperatur T_B modelliert. Das Teilsystem „Raum" wird pauschal durch einen einzigen Energiespeicher mit der Referenzraumtemperatur T_R als Zustandsgrösse modelliert.

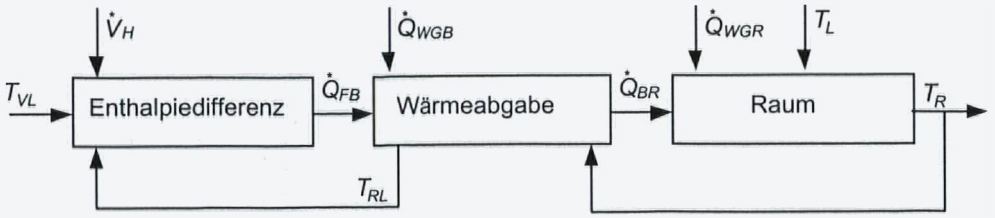


Abb. 54: Blockschaltbild des Gebäudemodells mit den drei Teilsystemen: Enthalpiedifferenz des Heizungsfluids, Wärmeabgabe und Raum

Für diese drei Energiespeicher werden die folgenden drei Energiebilanzgleichungen aufgestellt:

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

Gl. 23

$$m_B c_B \cdot \dot{T}_B(t) = \overset{*}{\dot{Q}}_{WGB}(t) + \overset{*}{\dot{Q}}_{WB}(t) - \overset{*}{\dot{Q}}_{BR}(t),$$

Gl. 24

$$\rho_G c_G V_G \cdot \dot{T}_R(t) = \overset{*}{\dot{Q}}_{WGR}(t) + \overset{*}{\dot{Q}}_{BR}(t) - \overset{*}{\dot{Q}}_{V}(t).$$

Gl. 25

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

$\overset{*}{\dot{Q}}_{WB}$: Wärmestrom vom Wasser in den Boden (innere Grösse des Teilsystems „Wärmeabgabe")

$\overset{*}{\dot{Q}}_{BR}$: Wärmestrom vom Boden in den Raum

$\overset{*}{\dot{Q}}_{V}$: Verlustwärmestrom (innere Grösse des Teilsystems „Raum")

Diese Wärmeströme werden jeweils durch einen linearen Ansatz beschrieben:

$$\overset{*}{\dot{Q}}_{WB}(t) = \kappa_W \cdot \left[T_{RL}(t) - T_B(t)\right],$$

Gl. 26

$$\overset{*}{\dot{Q}}_{BR}(t) = \kappa_B A_B \cdot \left[T_B(t) - T_R(t)\right],$$

Gl. 27

$$\overset{*}{\dot{Q}}_{V}(t) = \kappa_G \cdot \left[T_R(t) - T_L(t)\right].$$

Gl. 28

$\overset{*}{\dot{Q}}_{WGB}(t)$ und $\overset{*}{\dot{Q}}_{WGR}(t)$ bezeichnen die Fremdwärmeströme, welche durch Solarstrahlung und/oder Benutzerverhalten in den Boden und Raum fliessen. Durch Auswertung von Messdaten konnten die in der Tab. 23 angegebenen Parameter identifiziert werden. Der mittels identifizierter Parameter ermittelte Verlustwärmestrom von 3.84 kW bei –9°C stimmt relativ gut mit dem nach SIA 384/2 berechneten Wert von 3.64 kW überein.

Parameter [Einheit]	V_H [m³]	κ_W [W/K]	$m_B \cdot c_B$ [J/K]	$k_B \cdot A_B$ [W/K]	κ_G [W/K]	τ_G [h]
Wert	0.6	2906.4	$1.2 \cdot 10^7$	659.6	132.2	101.4

Tab. 23: Die identifizierten Parameter des Gebäudemodell 3. Ordnung gemäss Gl. 22 bis Gl. 28 .

4.4.2 Funktionsprinzip der Pulsbreitenmodulation

Die Anpassung der Wärmeabgabe an die jeweilige Wettersituation erfolgt bei den Regelkonzepten mit Pulsbreitenmodulation durch das Zuführen der vom Haus benötigten Wärmeenergie in Form von einzelnen Wärmepaketen [PWM 99]. Ein Wärmepaket ist dabei durch die Laufzeit der Wärmepumpe Δt_{LZ} und die Periodendauer Δt_P, d.h. die Zeitdauer zwischen zwei nacheinander zu erfolgenden Einschaltungen, der Wärmepumpe charakterisiert (vgl. Abb. 55).

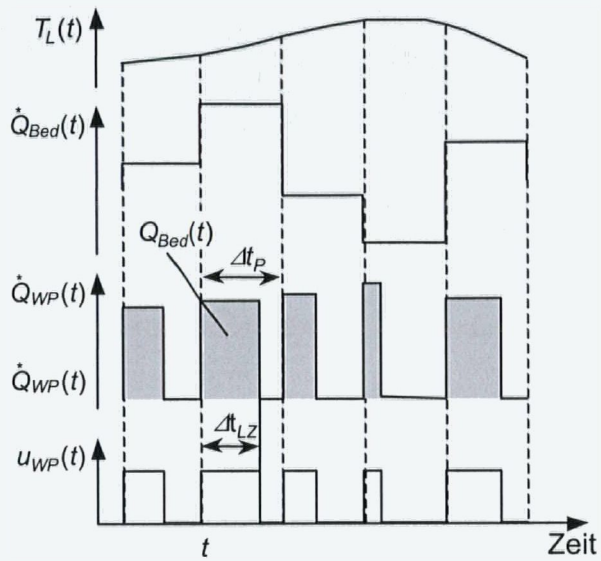


Abb. 55: Funktionsprinzip der Pulsbreitenmodulation

Im Gegensatz zu den konventionellen Regelungskonzepten mit einem Zweipunktregler ist es hier möglich, die Grösse der Wärmepakete energetisch zu optimieren und ihre Verteilung über den Tag durch das Berücksichtigen der Tarifstruktur und der Sperrzeiten kostenoptimal vorzunehmen. Da für die Raumheizung die Stillstandszeiten der Wärmepumpe im Voraus bekannt sind, kann die Wärmepumpe innerhalb dieser „Lücken" für die Warmwasseraufbereitung eingesetzt werden.

Die Pulsbreitenmodulation benötigt den Heizleistungsbedarf des Hauses $\overset{*}{Q}_{Bed}(t)$ im Zeitpunkt t zu Beginn eines jeden zu erzeugenden Wärmepakets. Die Wärmepumpe liefert in Abhängigkeit von der momentanen Aussenluft- und Vorlauftemperatur den Wärmestrom $\overset{*}{Q}_{WP}(T_L(t), T_{VL}(t))$.

Damit die vom Gebäude benötigte Wärmemenge für die Periodendauer Δt_P in Form eines Wärmepakets geliefert wird, muss die Laufzeit der Wärmepumpe Δt_{LZ} für die aktuelle Periode wie folgt berechnet werden:

$$\Delta t_{LZ} = \frac{\overset{*}{Q}_{Bed}(t)}{\overset{*}{Q}_{WP}(T_L(t), T_{VL}(t))} \cdot \Delta t_P$$

Gl. 29

Die Wärmepumpe wird somit zum Zeitpunkt t für die Laufzeit Δt_{LZ} eingeschaltet. Nach Ablauf dieser Zeit wird sie abgeschaltet und bleibt bis zum Erreichen der Periodendauer Δt_P ausgeschaltet. Die Periodendauer kann dabei im Allgemeinen variabel gewählt werden. Sie kann insbesondere energetisch im Sinne einer Maximierung der Arbeitszahl der Wärmepumpe optimiert werden und/oder den anstehenden Sperrzeiten angepasst werden, so dass die Laufzeit nicht in den Bereich der Sperrzeit gerät.

Um die optimale Periodendauer und die optimale Laufzeit zu ermitteln, wurde das Verhalten einer Luft/Wasser-Wärmepumpe und eines Hauses anhand von Simulationen untersucht. Dabei kommt das Modell aus Kapitel 4.4.1 zum Einsatz.

Für die Wärmepumpe wird ein einfaches Modell basierend auf den Herstellerdaten $\dot{Q}^{*}_{WP} = f(T_L, T_{VL})$ für die Heizleistung und $P_{WP} = f(T_L, T_{VL})$ für die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe verwendet. Die Ein- und Ausschalttransiente der Wärmepumpenheizleistung wurde dabei durch ein asymmetrisches Verzögerungselement erster Ordnung mit 60s Ein- und 6s Ausschaltzeitkonstante modelliert.

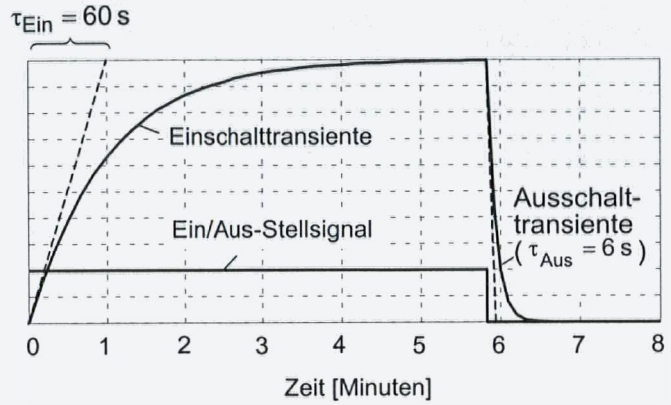


Abb. 56: Modellierung der Ein- und Ausschalttransiente der Wärmepumpenheizleistung durch ein asymetrisches Verzögerungselement erster Ordnung mit 60s Ein- und 6s Ausschaltzeitkonstante

Bei konstanter Aussenlufttemperatur T_L steigt nach dem Einschalten der Wärmepumpe die Vorlauftemperatur T_{VL} an. Dadurch erhöht sich die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Leistung $P_{WP}(t)$, während der abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}^{*}_{WP}(t)$ nach relativ kurzer Zeit (ca. 60 s) den stationären Betrieb erreicht. Die momentane Leistungszahl $\varepsilon(t)$ (vgl. Abb. 57) erreicht schon nach kurzer Zeit ihr Maximum (mit '$*$' markiert).

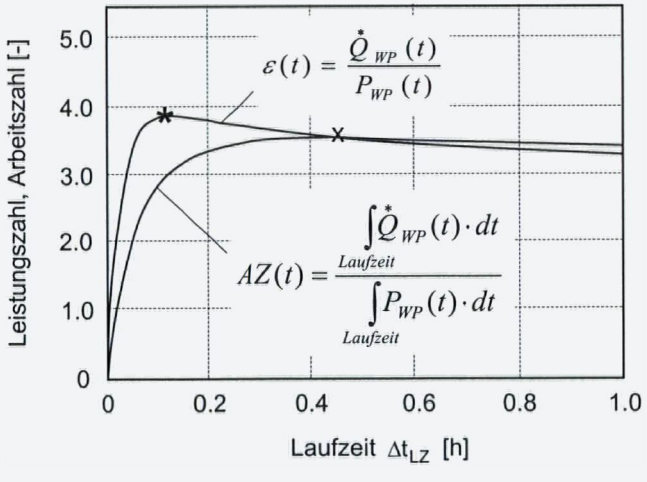


Abb. 57: Bestimmung der energieoptimalen Laufzeit $\Delta t_{LZ,opt}$

Die momentane Arbeitszahl *AZ(t)* (vgl. Abb. 57),welche aus dem Integral über der Laufzeit gebildet wird, ist ein Indikator für die optimale Laufzeit $\Delta t_{LZ,opt}$. Sie erreicht erst nach längerer Zeit den höchsten Wert (mit '$\times$' markiert) und verläuft relativ flach an dieser Stelle.

Die optimale Laufzeit ist von der Aussenlufttemperatur T_L abhängig. Je höher T_L ist, um so kürzer ist $\Delta t_{LZ,opt}$ (vgl. Abb. 58). Da das Optimum relativ flach verläuft, muss die optimale Laufzeit nicht genau eingehalten werden. In Abb. 58 ist grau der Bereich eingezeichnet, in dem 95% der maximal

möglichen Arbeitszahl AZ(t) erreicht werden. Die zu Δt_{LZ} gehörende Periodendauer Δt_P kann durch Umformen von Gl. 29 bestimmt werden.

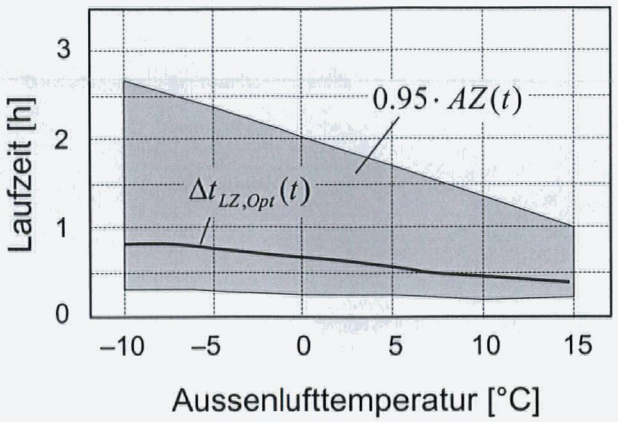


Abb. 58: Energieoptimale Laufzeit $\Delta t_{LZ,opt}$ in Funktion der Aussenlufttemperatur T_L

4.4.3 Beobachterbasierter Regler

Der Entwurf des Reglers wurde aus Phase 2 übernommen. Neu basiert das Gebäudemodell nicht mehr auf Vergleichssimulationen mit TRNSYS, sondern wurde mittels Messdaten identifiziert, wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung des Entwurfes findet sich in [Ginsburg 99] und im Schlussbericht der Phase 2 [NTH2 98a] in Kapitel 2.9.4 ff. In Abb. 59 ist die Struktur dargestellt.

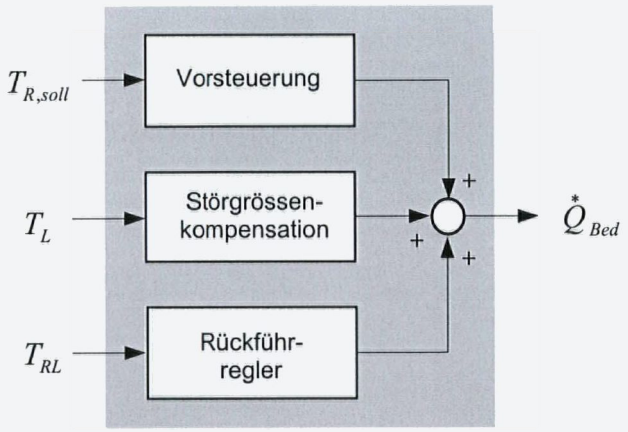


Abb. 59: Struktur des beobachterbasierten Reglers

Einem Sollwert der Referenzraumtemperatur wird mit der Vorsteuerung gefolgt, dem Einfluss der Aussenlufttemperatur wird über die Störgrössenkompensation begegnet und der Einfluss nicht modellierter Störungen und Modellfehler wird mit dem Rückführregler kompensiert. Das Ausgangssignal des Reglers entspricht der momentan notwendigen Heizleistung, die mit der Pulsbreitenmodulation in das Ein- und Ausschaltsignal der Wärmepumpe umgeformt wird.

Durch das breite 95%-Wirkungsgrad-Band (vgl. Abb. 58) kann die Laufzeit den Randbedingungen entsprechend gewählt werden. Besonders der Anpassung an die Sperrzeiten kommt dieser Variationsraum entgegen. So wurde bei der Pulsbreitenmodulation des Stellsignals des beobachterbasierten Reglers die Periodendauer unmittelbar vor der nächsten Sperrzeit im Vergleich zum ungesperrten Fall (a) etwas verlängert, damit das Wiedereinschalten mit dem Ende der Sperrzeit zusammenfällt (b) resp. verkürzt, um noch eine Laufzeit vor den Beginn der Sperrzeit unterzubringen (c) (vgl. Abb. 60).

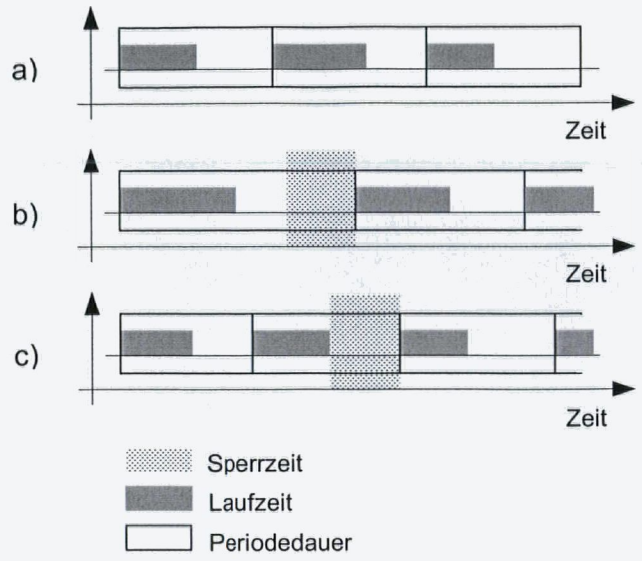


Abb. 60: Anpassung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation an die nächste Sperrzeit für das Stellsignal des beobachterbasierten Reglers

4.4.4 Energiekennlinienbasierte Steuerung

Dieses Konzept, das im Rahmen des BFE-Projektes "Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen" [Gabathuler 99] entwickelt wurde, geht von einer mittleren Aussentemperatur aus und verwendet als Heizkurve direkt die Energiekennlinie des Hauses (vgl. auch [Gabathuler 00]).

Zu einem beliebig festgesetzten Zeitpunkt (in Schötz 19.00 Uhr) wird basierend auf der Aussenluftmitteltemperatur der letzten 24 Stunden $T_{L24}(t)$ die Anzahl Starts (immer eine gerade Anzahl) für die folgenden 24 Stunden festgelegt. Dabei werden die Einschaltzeitpunkte so gelegt, dass 50% am Morgen während des Niedertarifs (aus Kostengründen) und 50% am Abend (aus Komfortgründen) geheizt wird. Diese Wahl der Verteilung ist willkürlich und wurde nach empirischem Ermessen gewählt. Wenn die Niedertarifzeit voll ausgeschöpft ist, muss das Verhältnis zu Ungunsten des Niedertarifs verschoben werden. In Schötz wurden maximal 6 Starts pro Tag vorgesehen, wobei immer zwei Starts zwischen zwei Sperrzeiten gelegt wurden.

Der durch die Energiekennlinie vorgegebene Wärmebedarf Q_{Bed24} proportional zu den Periodendauern t_p, welche zu den ausgewählten Startzeiten gehören, auf die einzelnen Starts verteilt. Durch Messung der Vor- und Rücklauftemperatur T_{VL} und T_{RL} wird die von der Wärmepumpe abgegebene Wärme Q_{WP} bestimmt und die Wärmepumpe abgestellt, sobald die geforderte Wärme ins Haus eingespeist wurde. Der aktuelle 24-Stunden-Mittelwert der Aussentemperatur $T_{L24}(t)$ wird für ein Zeitfenster über die letzten 24 Stunden laufend neu berechnet. Dadurch kann der Energiebedarf des Hauses Q_{Bed24} nachgeführt werden. Aenderungen im Energiebedarf werden auf die verbleibenden Perioden verteilt. Somit wurde am Ende eines Heiztages (19.00 Uhr) dem Gebäude die Wärme zugeführt, die es gemäss der Energiekennlinie benötigt hat.

Neben der Implementation dieses Steuerungskonzeptes in diesem Projekt wurde die energiekennlinienbasierte Steuerung auch im Rahmen des eingangs erwähnten BFE-Projekts "Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen" [Gabathuler 99] eingesetzt. Sie war während eineinhalb Jahren in einer Versuchsanlage in Waltalingen erfolgreich im Einsatz.

4.4.5 LQ-optimierte Steuerung mit Prädiktion der Aussentemperatur

Die in den Kapiteln 4.4.3 und 4.4.4 vorgestellten Regelungs-/Steuerungskonzepte reagieren nur auf die aktuelle Aussentemperatur. Sie lassen keinen Eingriff basierend auf einer Prädiktion dieser Störgrösse zu. In diesem Kapitel wird die Strategie einer modellbasierten prädiktiven Steuerung vorgestellt. Da zur Berechnung der zuzuführenden Wärmemenge nur die Raumsolltemperatur und der prädiktierte Verlauf der Aussentemperatur verwendet werden, handelt es sich wie beim energiekennlinienbasierten Konzept (Kapitel 4.4.4) um eine Steuerung (vgl. [Gabathuler 99], [Wimmer 99] und [Shafai 00b]).

Als Modell des Wärmenutzungssystems wird das im Kapitel 4.4.1 vorgestellte Modell eingesetzt. Das Modell wird hauptsächlich für eine Prädiktion des Systemverhaltens auf einen mutmasslichen zukünftigen Aussentemperaturverlauf verwendet. Der Wärmestrombedarf des Hauses $\dot{Q}_{Bed}(t)$ wird bei dieser Regelungsstrategie durch eine Optimierung des Systemverhaltens für den prädiktierten Aussentemperaturverlauf bestimmt (vgl. Abb. 61). Für die Optimierung wird dabei das folgende quadratische Gütekriterium bei jedem Zeitschritt für den Prädiktionszeithorizont T_{hori} minimiert.

$$J = \int_{t}^{t+T_{hori}} \{R \cdot \dot{Q}^{*2}_{Bed}(t) + Q \cdot [T_R(t) - T_{R,soll}(t)]^2\} dt$$

Gl. 30

Als Prädiktionszeithorizont T_{hori} wird ein Zeitfenster von 24 Stunden ausgewählt. Andere Zeitfenster sind selbstverständlich auch möglich.

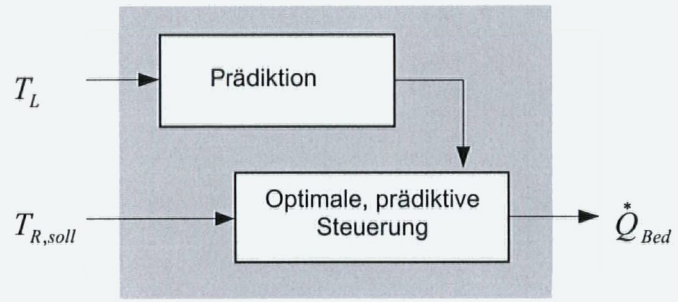


Abb. 61: Struktur der modellbasierten prädiktiven Steuerung

Im Gütekriterium wird mit *R* der Verbrauch an Wärme und mit *Q* die Abweichung der Raumtemperatur von ihrem Sollwert $T_{R,soll}$ bestraft. Durch eine entsprechende Wahl dieser Werte kann zwischen Komfort- und Energieverbrauchsoptimierung abgewogen werden.

Die Prädiktion des Aussenlufttemperaturverlaufs und die anschliessende Optimierung des benötigten Wärmestroms wird jede viertel Stunde neu durchgeführt, so dass man die momentane Veränderung von T_L berücksichtigen kann. Für die Prädiktion der Aussenlufttemperatur wird der Verlauf der letzten 24 Stunden angenommen, wobei die Kurve so parallel verschoben wird, dass der Anfangspunkt der Prädiktion mit der tatsächlichen Temperatur zusammenfällt (vgl. Abb. 62).

Durch eine geeignete Wahl der Randbedingungen und zeitvariable *R* und *Q* können Sperrzeiten (falls im voraus bekannt) und Stromtarifstrukturen berücksichtigt werden. Die Steuerung sollte ausserdem durch eine Prädiktion der Solarstrahlung (Strahlungsprognose der MeteoSchweiz) und eine Verbesserung der Aussenlufttemperaturprädiktion erweitert werden.

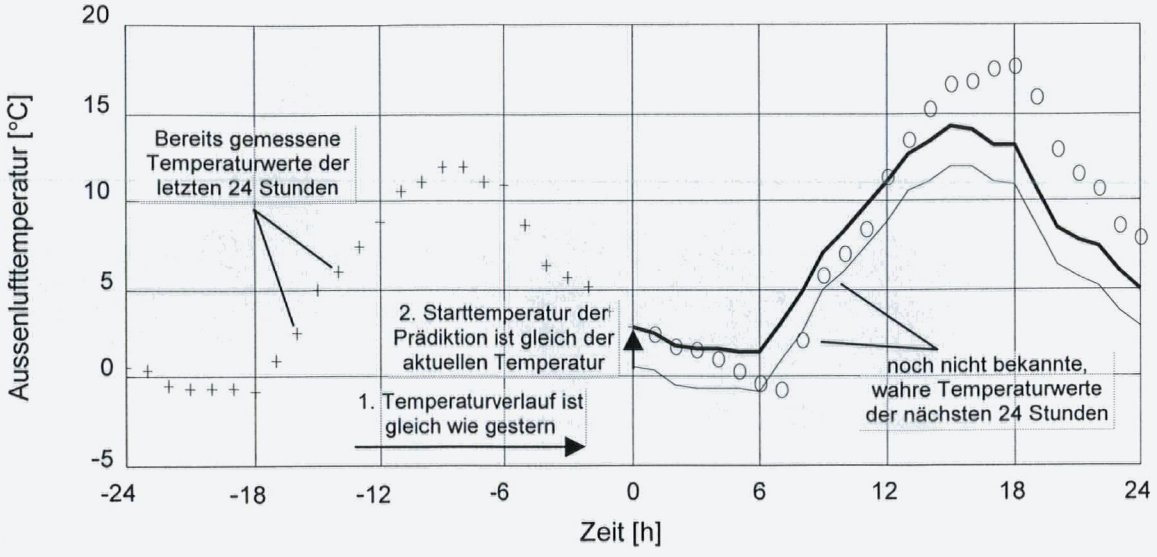


Abb. 62: Einfacher Ansatz für die Prädiktion der Aussenlufttemperatur

Die Pulsbreitenmodulation des mit obiger Methode berechnetem Wärmebedarfs erfolgt so, dass die in Kapitel 4.4.2 berechneten optimalen Laufzeiten $\Delta t_{LZ,opt}(T_L)$ möglichst gut eingehalten werden. Die Anzahl Perioden zwischen zwei Sperrzeiten wird so gewählt, dass die Arbeitszahl der Wärmepumpe *AZ(t)* mindestens 95% des optimalen Wertes beträgt.

4.4.6 Einbau der Reglerhardware

Der in Matlab/Simulink implementierte Algorithmus des jeweils neu zu untersuchenden Reglers wurde mit dem in der MATLAB-Umgebung zur Verfügung stehenden Real-Time Workshop, xPC Target [MathWorks 99] und einem C Compiler in die Maschinensprache übersetzt und als „Target application" auf eine Echtzeitplattform geladen. Diese wurde über I/O-Einschubkarten gemäss Abb. 63 mit der Heizungsanlage verbunden.

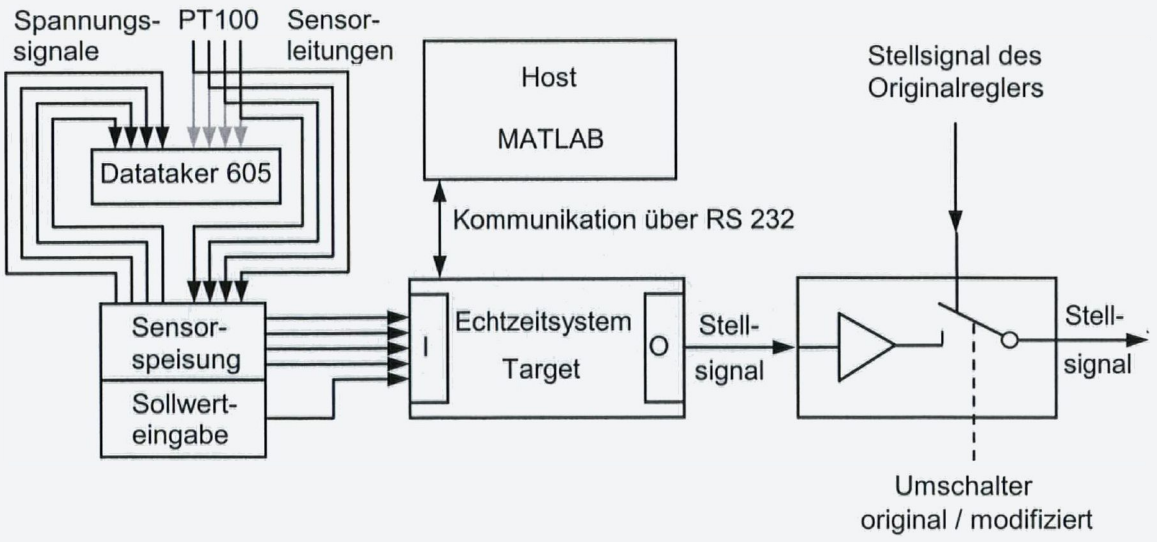


Abb. 63: Signalflussbild der Reglerhardware

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 für Regelungzwecke verwendeten Sensoren vom Typ PT100 eine separate Speisung und Auswertung neu installiert und dem Messsystem die Temperaturwerte als Spannungssignal zugeführt. Zugleich wurde ein Drehpotentiometer installiert, über das der Bewohner einen Temperatursollwert der Regelung eingeben konnte. Das Echtzeitsystem ist in einem konventionellen PC eingebaut ("Target"). Über eine RS 232 Schnittstelle ist dieser mit einem zweiten PC ("Host") verbunden. Auf dem "Host"-Rechner läuft das Programmpaket MATLAB mit allen für die Reglerimplementation notwendigen Zusätzen (insbesondere xPC Target). 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 die aktuellen Messwerte zu Kontrollzwecken graphisch oder als Zahlenwert darstellt. Das Stellsignal wird verstärkt und über einen Wahlschalter auf die Wärmepumpe gegeben. Mit dem Wahlschalter kann der Betreiber zwischen dem wärmepumpeninternen und dem neu zu erprobenden Regler umschalten. Bei einer Störung oder Fehlfunktion dieses Reglers kann über den internen Regler die Wärmepumpe solange weiterbetrieben werden, bis die Störung behoben ist.

4.4.7 Vergleich der Regelungskonzepte

Im folgenden sollen Messungen der Heizperiode 1999/2000 zur Beschreibung des mit den eingesetzten Reglern erzielten Verhaltens verwendet werden. Die Messungen wurden von Woche 46/1999 bis Woche 14/2000 (15. November 1999 bis 9. April 2000) durchgeführt.

Vom 15. November bis zum 8. Dezember 1999 und vom 28. Februar bis zum 9. April 2000 war der in der Wärmepumpe integrierte Zweipunktregler im Einsatz. Die temporäre Reglerhardware wurde am 8. Dezember installiert und wurde bis zum 28. Februar 2000 als Plattform für die Erprobung der neuen Regler verwendet. Im Einsatz waren:

- Der beobachterbasierte Regler vom 8. Dezember 1999 bis zum 25 Januar 2000,
- die LQ-optimierte Steuerung anschliessend bis zum 16. Februar und
- die energiekennlinienbasierte Steuerung bis zum 28. Februar.

In den folgenden Unterkapiteln werden der Übersichtlichkeit halber jeweils Dreitagesperioden für die Beschreibung des mit den einzelnen Reglern erzielten Verhaltens herangezogen. Der eigentliche Vergleich wird im Unterkapitel 4.4.8 an Hand der gesamten Einsatzdauer eines jeden Reglers durchgeführt.

4.4.7.1 *Zweipunktregler Periode 1999*

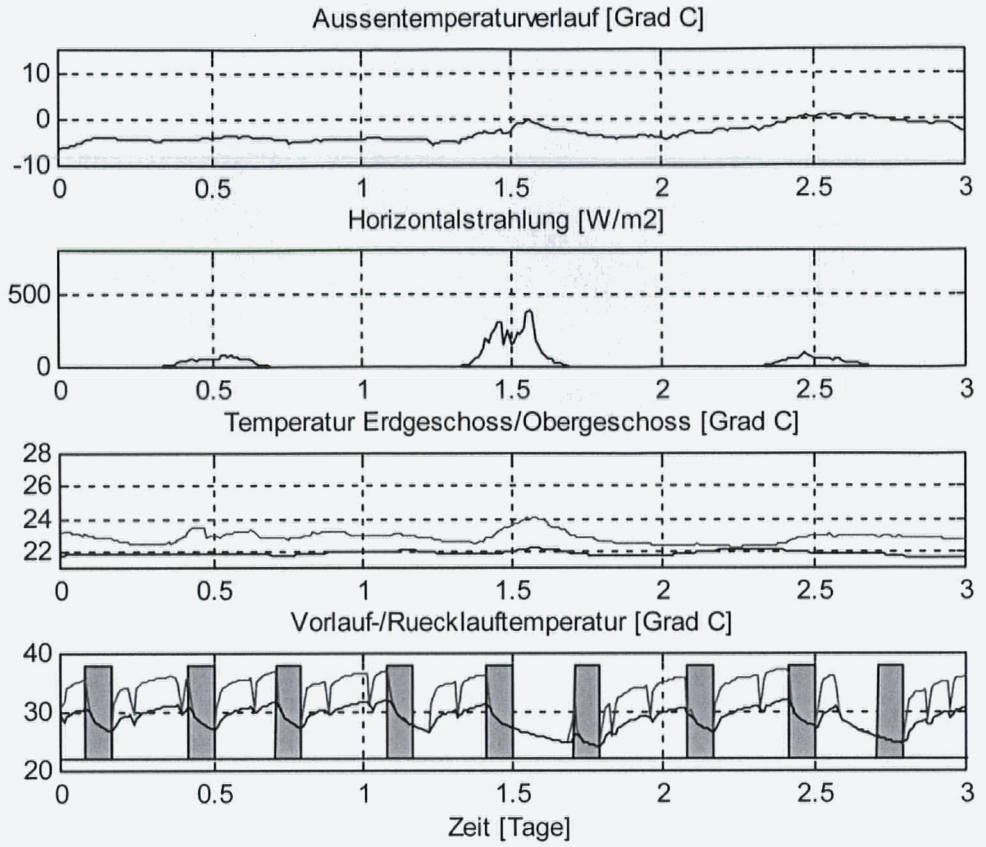


Abb. 64: Verlauf der Aussentemperatur, Solarstrahlung, Raumtemperatur von Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperatur und Sperrzeiten für die Zeit vom 20. bis 23. November 1999.

In der ersten Messperiode mit vergleichsweise wenig Solargewinn konnte der Zweipunktregler den Sollwert der Raumtemperatur gut einhalten. Es soll allerdings erwähnt sein, dass der mit der Wärmepumpe gelieferte Zweipunktregler sowohl einen Raum- als auch einen Bodenfühler besitzt und neben dem Kompressor auch die Umwälzpumpe des Heizkreises ansteuern kann.

Durch den Raumfühler kann insbesondere eine Einschaltung der Wärmepumpe am 21. November Mittags (Zeitpunkt 1.5) verhindert werden. Damit kann das Überschwingen der Raumtemperatur verhindert und Energie eingespart werden.

Die relativ geringe Leistung der Wärmepumpe ermöglicht lange Laufzeiten mit primär von den häufigen Sperrzeiten bestimmten Einschaltzeitpunkten. Die kurzen Ausschaltperioden werden nicht durch den Regler sondern durch die Abtauung nach dem Umkehrprinzip verursacht.

Die dunklen Flächen im untersten Verlauf stellen die Sperrzeiten dar. Die vertraglich möglichen Sperrzeiten von drei mal zwei Stunden werden vom lokalen Elektrizitätswerk nach einem festen Fahrplan vollständig ausgeschöpft (2-4 Uhr, 10-12 Uhr, 17-19 Uhr).

Die Temperatur im Obergeschoss liegt leicht unter derjenigen des Erdgeschosses und reagiert aufgrund der geringeren Fensterfläche weniger auf solare Wärmegewinne. Die leicht tiefere Temperatur im Obergeschoss wurde von den Bewohnern gewünscht. Deshalb wurde die Mehrzahl der Heizkreise im Obergeschoss von den Bewohnern geschlossen.

4.4.7.2 *Zweipunktregler Periode 2000*

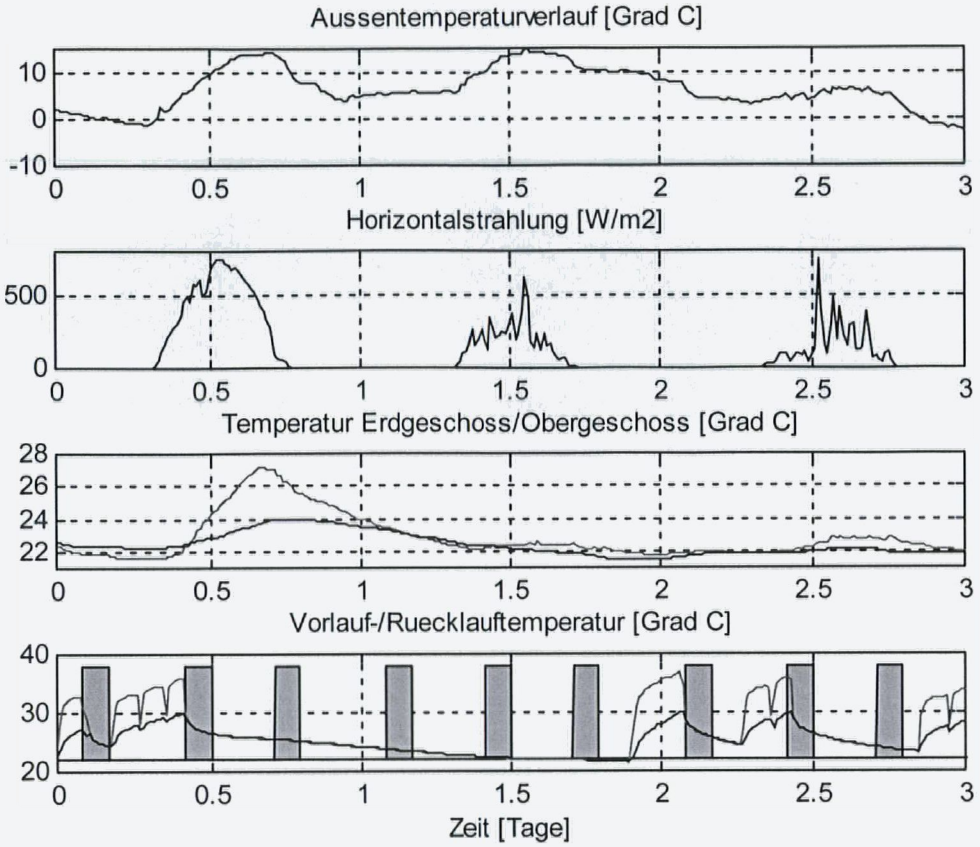


Abb. 65: Verlauf der Aussentemperatur, Solarstrahlung, Raumtemperatur von Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperatur und Sperrzeiten für die Zeit 19. bis 21. März 2000.

Die zweite Messperiode des Zweipunktereglers fällt durch die stärkere Solarstrahlung und die damit verbundenen Schwankungen der Raumtemperaturen auf. Der Sollwert kann entsprechend schlecht eingehalten werden. Die geringe Einschalthäufigkeit ist auf den in der Übergangszeit üblichen geringen Wärmeleistungsbedarf zurückzuführen.

Wegen der Intensität des solaren Wärmegewinns am 19. März kann auf eine Einschaltung am Folgetag fast verzichtet werden. Dem Überschwingen der Raumtemperatur könnte nur mit einer Beschattungsvorrichtung begegnet werden. Allerdings würde dann die Nutzung der solaren Wärmegewinne geringer ausfallen.

4.4.7.3 *Beobachterbasierter Regler*

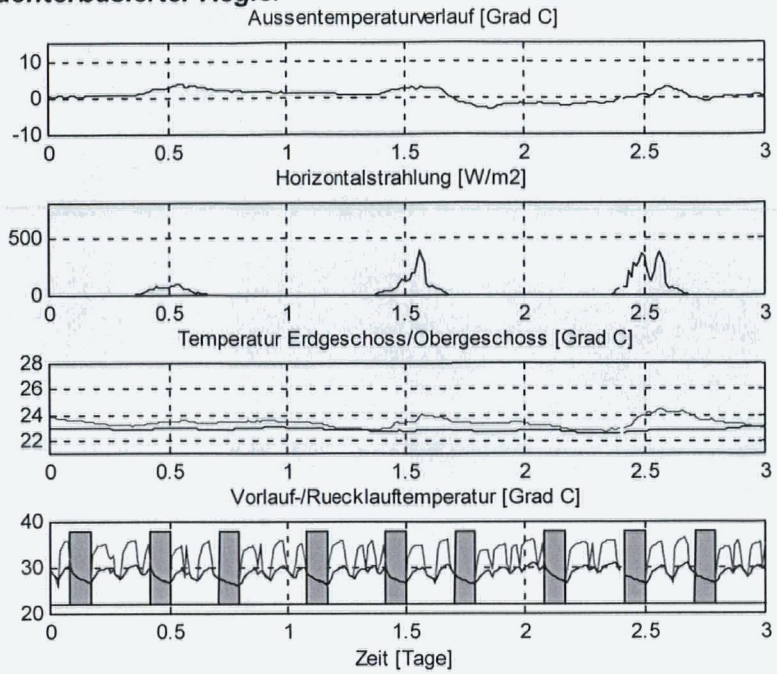


Abb. 66: Verlauf der Aussentemperatur, Solarstrahlung, Raumtemperatur von Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperatur und Sperrzeiten für die Zeit 2. bis 4. Januar 2000.

Der beobachterbasierte Regler kann den Sollwert der Raumtemperatur ebenfalls gut einhalten. Der Stärke der Solarstrahlung ist jahreszeitlich bedingt gering. Die Periodendauer für den nicht gesperrten Fall wurde auf 4 Stunden eingestellt. Die Einschalthäufigkeit könnte durch eine verlängerte Periodendauer noch reduziert werden.

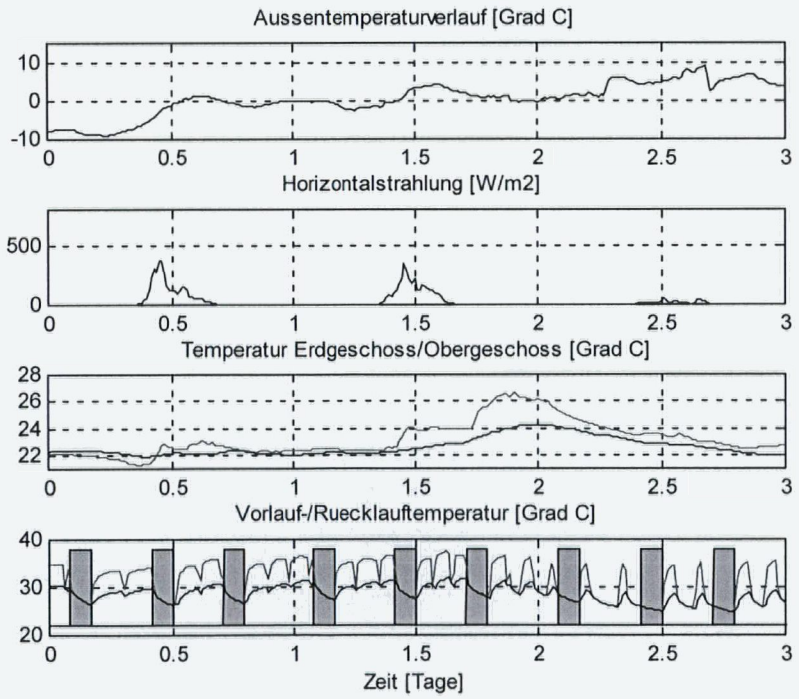


Abb. 67: Verlauf der Aussentemperatur, Solarstrahlung, Raumtemperatur von Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperatur und Sperrzeiten für die Zeit 23. bis 25. Dezember 1999.

Die durch die Weihnachtsfeiern verursachte inneren Fremdwärmegewinne am Ende von Tag 2 werden nur langsam abgebaut. Dies ist auf die verzögerte Beobachtung der Raumtemperatur durch Messung der Rücklauftemperatur zurückzuführen. Es ist zu erkennen, dass die Fremdwärmegewinne am 24. nur mittags auf Sonnenschein zurückzuführen ist während der starke Anstieg der Raumtemperatur abends durch nichtmessbare innere Gewinne (z.B. Kerzen am Tannenbaum) verursacht wird.

4.4.7.4 LQ-optimierte Steuerung mit Prädiktion der Aussentemperatur

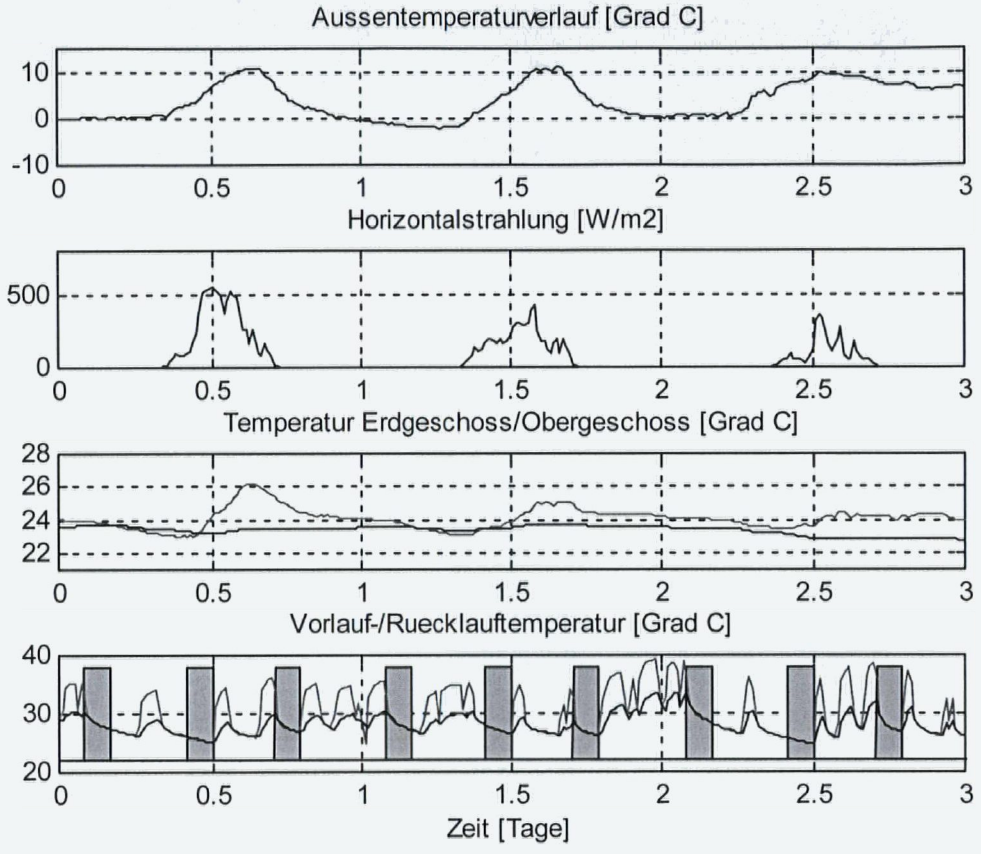


Abb. 68: Verlauf der Aussentemperatur, Solarstrahlung, Raumtemperatur von Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperatur und Sperrzeiten für die Zeit 2. bis 4. Februar 2000.

Die Steuerung kann die von Aussentemperaturschwankungen verursachten Raumtemperaturschwankungen gut ausgleichen. Da kein Rückführsignal verwendet wird (Steuerung!), kann weder auf die Solarstrahlungsgewinne noch auf sonstige Störeinflüsse reagiert werden. Zur Verbesserung dieser Methode muss die Integration einer Rückführung im Regelungskonzept vorgenommen werden.

Zu Erkennen ist die spezielle Verteilung der Einschaltphasen der Wärmepumpe innerhalb der vorgegebenen Sperrzeiten. Wie bereits im Kapitel erwähnt wurde, erfolgt die Pulsbreitenmodulation so, dass die optimalen Laufzeiten (vgl. Kapitel 4.4.2) möglichst gut eingehalten werden.

4.4.7.5 *Energiekennliniensteuerung*

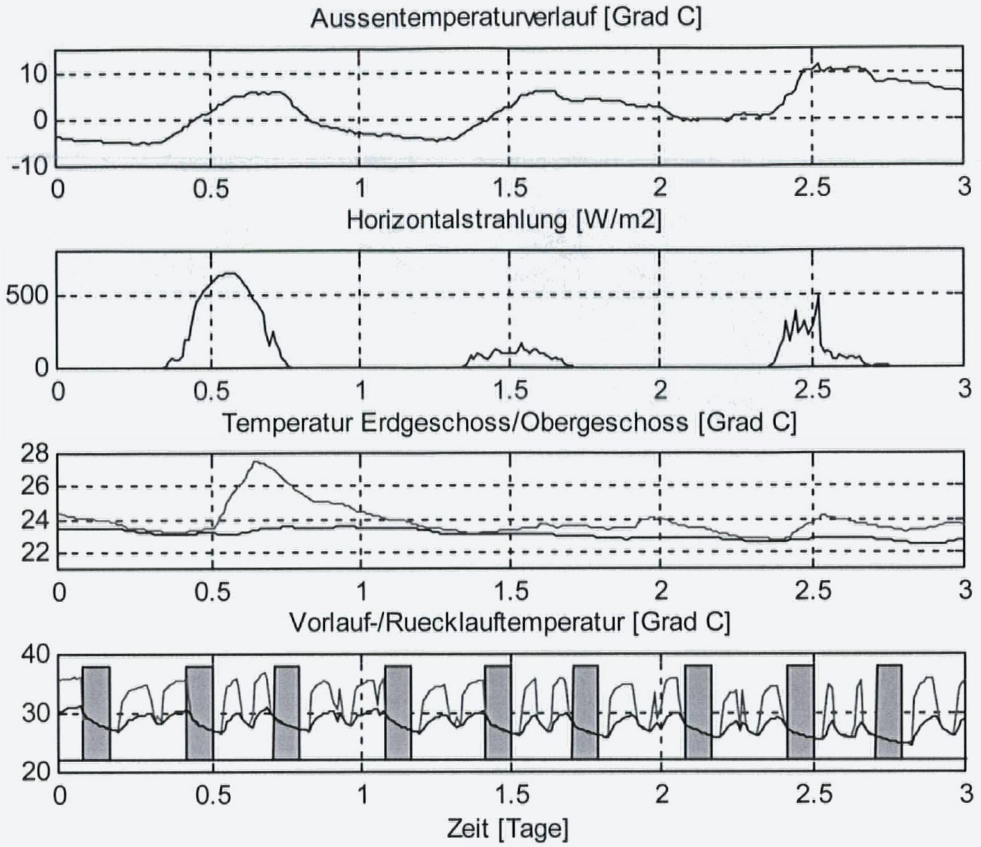


Abb. 69: Verlauf der Aussentemperatur, Solarstrahlung, Raumtemperatur von Erd- und Obergeschoss, sowie der Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Sperrzeiten für die Zeit 25. bis 27. Februar 2000.

Diese Steuerung geht von einem Temperaturmittelwert aus und kann demnach grundsätzlich nicht so gut auf Veränderungen der Aussentemperatur reagieren, wie die LQ-Steuerung. Da es sich hier ebenfalls um eine Steuerung handelt, ist keine Reaktion auf die Solarstrahlungsgewinne zu erkennen.

Betreffend der Pulsbreitenmodulation erkennt man hier die in Kapitel 4.4.4 erwähnten 6 Starts pro Tag, die zu jeweils zwei Einschaltpulsen zwischen zwei benachbarten Sperrzeiten führen.

4.4.8 Vergleich

Da im Gegensatz zum Vergleich mittels Simulation die Umweltbedingungen während der einzelnen Testperioden nicht vergleichbar sind, ist auch der direkte Vergleich der einzelnen Regelungskonzepte aufgrund der Messwerte nur bedingt aussagekräftig. Die in Tab. 24 eingetragenen Werte sind deshalb unter Berücksichtigung der spezifischen Ereignisse während der Messperioden zu betrachten.

Für die Beurteilung und den Vergleich des mit den einzelnen Reglertypen erzielten Komforts sind in Tab. 24 sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Raumtemperatur ausgewertet und über der gesamten Einsatzdauer angegeben. Die angegebenen Mittelwerte erlauben die Schlussfolgerung, dass alle Reglertypen den von den Bewohnern erwünschten Sollwert der Raumtemperatur von 23 °C einhalten. Die Standardabweichungen der Raumtemperatur sagen etwas über die Raumtemperaturschwankungen aus. Für die Beurteilung der Güte der Regelung (resp. Steuerung) müssen selbstverständlich diese Schwankungen jeweils auf die Schwankungen der Aussenlufttemperatur bezogen werden (vgl. die Zeile bez. Std. Abw. der Raumtemperatur). Daher sind neben dem Mittelwert der Aussentemperatur auch dessen Standardabweichung in Tab. 24 angegeben. Die auf die Standardabweichung der Aussentemperatur bezogenen Standardabweichungen der Raumtemperatur für

die neu erprobten Regler sind insbesondere bei dem beobachterbasierten Regler und der LQ-optimierten Steuerung etwas höher als bei dem Zweipunktregler der Periode 1999.

Ein weiteres Beurteilungsmass ist die Anzahl der Einschaltungen. Für einen Vergleich sind neben der Gesamtzahl der Einschaltungen auch die Einschaltungen pro Tag angegeben. Die Anzahl der Einschaltungen pro Tag sind bei allen drei neu erprobten Versuchsreglern höher als beim Zweipunktregler. Der Grund liegt darin, dass bereits bei der Auslegung die Anzahl der möglichen Einschaltungen durch die Wahl der Periodendauer vorgegeben wurde. Diese hätte nach Auswertung der Messdaten sicherlich grösser gewählt werden dürfen. Erachtet man jedoch das breite 95%-Band der in Bezug auf Arbeitszahl optimalen Laufzeiten, dann relativieren sich diese Abweichungen.

Für eine summarische Beurteilung sind zu jedem Reglertyp die Heizgradtage, die gesamte Heizenergie und die auf Heizgradtage bezogenen Heizenergie ebenfalls in der Tabelle angegeben. Da die Bewohner den Sollwert der Raumtemperatur auf 23 °C anstelle der gemäss SIA 380/1 vorgesehenen 20 °C eingestellt hatten, sind neben den normierten (20/12) auch die effektiven Heizgradtage (23/12) in der Tabelle enthalten werden

		Zweipunktregler Periode 1999	Zweipunktregler Periode 2000	Beobachterbasierter Regler	LQ-optimale Steuerung	Energiekennlinienbasierte Steuerung
Dauer	Total [h]	568	994.5	780	526	287.5
Einschaltungen	Total [-]	63	68	160	110	54
	pro Tag [1/d]	2.7	1.6	4.9	5.0	4.5
Aussentemperatur	Mittelwert [°C]	-0.6	5.93	0.29	1.75	1.89
	Std. Abw. [°C]	3.47	4.55	3.02	5.96	3.83
Raumtemperatur	Mittelwert [°C]	22.9	23.2	23.2	23.2	233
	Std. Abw. [°C]	0.58	1.51	0.66	1.34	1.23
	bez. Std. Abw. [°C]	0.17	0.33	0.22	0.22	0.33
Heizgradtage (HGT)	Norm 20/12 [K*d]	478.5	571.6	626.6	387.1	201.7
	Effektiv 23/12 [K*d]	547.5	691.6	722.6	450.1	234.7
Heizenergie	Total [kWh]	1248.1	1373.3	1960.9	1119.3	611.0
	Pro $HGT_{23/12}$ [kWh/(K*d)]	2.3	2.0	2.7	2.5	2.6

Tab. 24: Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen von Aussen- und Raumtemperatur EG sowie der Einschaltungen, der Heizgradtage, Heizenergie total und Heizenergie pro Heizgradtage für die einzelnen Regler

4.4.9 Fazit

Die grössere Streuung der Steuerungsansätze sind einerseits durch die starke Sonneneinstrahlung und andererseits durch das Fehlen einer Rückführung verursacht. Der Entscheid, auf die Messung der Raumtemperatur zu verzichten, hat mit der verzögerten Reaktion auf Störeinflüsse eine Verschlechterung der Regelqualität und eine Erhöhung des spezifischen Heizleistungsbedarfes zur Folge. Da ein Trend für eine Bedienstation im Wohnzimmer festzustellen ist, sollten zukünftige Entwicklungen von der Messung einer Referenzraumtemperatur ausgehen. Es wäre dann noch Gegenstand weiterer Abklärungen, inwieweit diese Grösse repräsentativ für das Gebäude ist.

5 MARKETINGKONZEPT

5.1 Zielgruppe und Marktpotential

Zielgruppe sind die Trendsetter, welche sich im Hausneubau frühzeitig für fortgeschrittene Haustechnik entscheidet. Sie folgen auf die Gruppe der Pioniere, welche in den vergangenen fünf Jahren die Grundlagen für den Minergie-Standard geschaffen hat. Während die Pioniere nur 3% des Marktes abdecken, können die Trendsetter bis zu 30% des Marktes erreichen. Das ergibt beim heutigen Stand der Neubautätigkeit (1999: rund 13'500 neu gebaute Einfamilien-/Doppeleinfamilien-Häuser) ein jährliches Marktvolumen von 4'000 Häusern. Die bisher (bis Mai 2000) mit dem Minergie-Label ausgezeichneten 500 Wohnbauten sind weitgehend Pionierprojekte, die auf die eine oder andere Art unterstützt wurden (kantonale oder staatliche Förderprogramme). Ab sofort geht es darum, die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Haustechnik als akzeptierten Stand der Technik zu etablieren. Dies bedingt einerseits eine Verankerung des Know-hows bei einer spezialisierten Gruppe von Haustechnik-Fachleuten, andererseits eine gute Kommunikation mit den Trendsettern. Parallel dazu sind die Anbieter von Fertighäusern und die fortschrittlichen Architekten einzubinden. Darauf ausgerichtete Schulungsmassnahmen sind erforderlich.

5.2 Oekonomie

5.2.1 Kostensituation (Stand 1999)

Die Kostensituation ist geprägt durch einen Markt, der noch kleine Stückzahlen aufweist und in dem es nur wenige Spezialisten gibt, die schon genügend Erfahrung mit solchen Systemen haben. Dies wirkt sich auch auf die Preise der Komponenten und der Installationen aus, die Sicherheitszuschläge enthalten. Im Rahmen des BFE-Projektes wurden die folgenden drei Varianten untersucht und kostenmässig genau erfasst:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Niedrigtemperatur-Bodenheizung 30/25° in Kombination mit einem Abluft-WP-Boiler und einer kontrollierten Frischluftzufuhr über Mauerventile
- Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Niedrigtemperatur-Bodenheizung 30/25° in Kombination mit einem Warmwasser-Beistellboiler, Einzelraum-Lüftung mit WRG im Wohnzimmer sowie periodischer mechanischer Lüftung im WC
- Luft/Luft-Wärmepumpen-Kompaktgerät mit Ansaugung über ein Erdregister und Wärmerückgewinnung für die Zuluft- und die Wassererwärmung (nur geeignet für ein Passivhaus)

Die Jahreskosten der verschiedenen Systeme ergeben sich aus den drei Anteilen für Energie, Betrieb/Unterhalt und Kapital (Amortisation und Verzinsung der Investition über der Lebensdauer). In der Praxis wird oft verglichen mit den konventionellen Heizsystemen Öl- und Gaskessel mit Bodenheizung 45/35° und mechanischer Abluft im WC. Dieser Vergleich hinkt, da bezüglich Luftqualität die Systeme mit einer Lufterneuerungsanlage wesentlich besser sind (CO_2-Konzentration < 1000 ppm). Das beste Kosten/Nutzen-Verhältnis weist das Luft/Luft-Wärmepumpensystem[2] auf, da die hydraulische Wärmeverteilung entfällt. Das System ist allerdings nur für Passivhäuser geeignet. Bauseitige Kosten für die zusätzliche Wärmedämmung (Passivhausstandard) sind darin nicht enthalten !

[2] Kosten für Heizung, Warmwasser u. Lüftung mit WRG im Passivhaus der Fa. Renggli AG (CEPHEUS-Projekt)

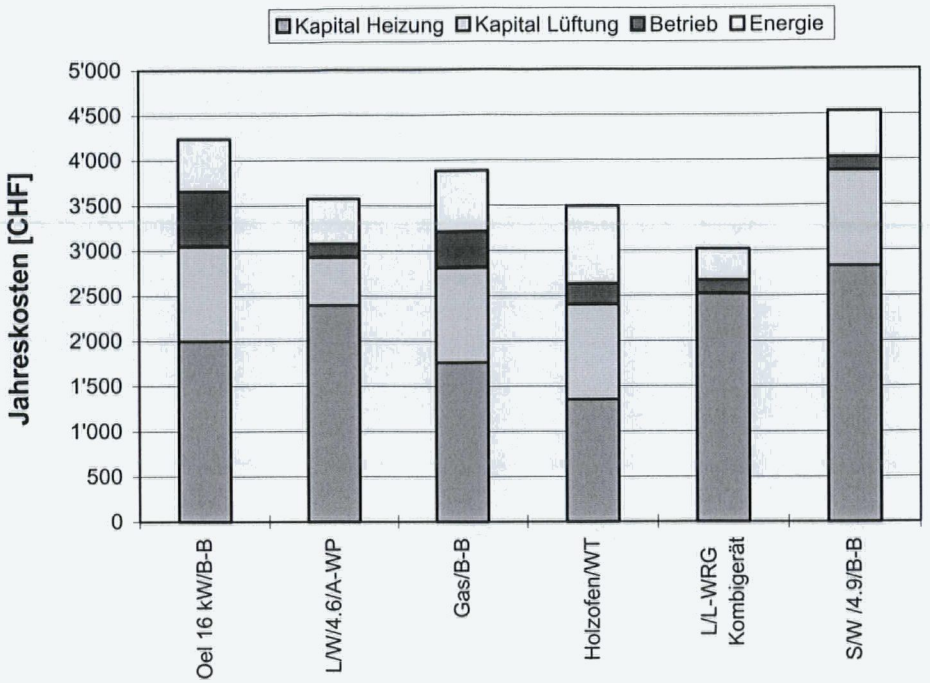


Abb. 70: Jahreskosten der verschiedenen Systeme mit kontrollierter Lüftung

Die detaillierten Kostenangaben zu den drei untersuchten Varianten sind im Anhang enthalten.

5.2.2 Kostensituation von morgen

Die Anlagekosten für die Wärmepumpen-Varianten dürften aus folgenden Gründen sinken:

- Steigende Stückzahlen und Konkurrenz unter den Gerätelieferanten (Gerätepreis: -10%)
- Reduktion der Sicherheitszuschläge bei der Wärmeverteilung (Verlegeabstand und Berücksichtigung der thermischen Effekte im Gebäude) (Wärmeverteilung: -10%)
- Kleinerer Planungs- und Installationsaufwand infolge besserer Vertrautheit mit solchen Anlagen (ca. Fr. 500 weniger)
- Standardisierung der Anlagentypen im Neubau und direkte Einplanung der Luftkanäle bei der Haus-Vorfabrikation (Holzbauweise)
- Reduktion der Strompreise infolge der Marktliberalisierung

Insgesamt darf eine Reduktion von 2000 – 3000 Franken erwartet werden, die bei den konventionellen Systemen nur zum Teil wirksam wird (Lüftungsanlage).

Ebenso wichtig sind jedoch die Vorteile der Wärmepumpen-Systeme hinsichtlich Werterhaltung des Gebäudes. Die Umweltfreundlichkeit der Heizung dürfte in Zukunft ein entscheidendes Verkaufsargument darstellen.

5.3 Pro/contra der verschiedenen Systeme

Für den Investor stellt sich die Frage, wo die Vorteile/Nachteile der verschiedenen Systeme liegen. Die nachfolgende Tabelle versucht eine einfache Analyse der Hauptfaktoren Komfort, Ökologie und Ökonomie für die untersuchten Varianten:

Variante:	Pro	Contra
Öl-Heizungssystem	Unabhängigkeit, Lagerhaltung, Preis pro kW Heizleistung	Umweltbelastung, Emissionen, Image, kommende Abgaben
Gas-Heizungsystem	Bessere Umweltbilanz als Öl, günstigere Investitionskosten	Abhängigkeit vom Gasversorger, kommende Abgaben
Holzofen-System	Einheimischer, erneuerbarer Energieträger	Manuelle Arbeit erforderlich, Zusatzheizung bei Abwesenheit nötig
Luft/Wasser-System	Kostengünstiger Wohnkomfort mit Bodenheizung und Lüftung, Umweltfreundlichkeit	Energiekosten höher als beim der Sole-Wasser-System
Sole/Wasser-System	Niedrige Energiekosten, hohe Umweltfreundlichkeit	Höhere Investitionskosten als bei Luft/Wasser-System
Luft/Luft-System	Hoher Wohnkomfort dank Passivhaus-Standard, hohe Umweltfreundlichkeit	Keine Bodenheizung, Zusatzkosten bei der Wärmedämmung des Gebäudes

Tab. 25: Pro und contra der verschiedenen Varianten

5.4 Argumentarium

Der Minergie-Standard wird von fast allen Kantonen unterstützt. Kommende kantonale Förderprogramme dürften als Bedingung für eine Subvention im Hausbau das Erreichen dieses Standards zwingend vorschreiben. Die Systemvarianten mit Wärmepumpen bieten in solchen Fällen eine umweltfreundliche Lösung. Bereits erfolgreich eingeführt wurde die FWS-Broschüre „Die Wärmepumpe im Minergiehaus" [NTH4 00b], welche von vielen Akteuren als geeignetes Werbeinstrument eingesetzt wird. Sie kann bei der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz kostenlos bezogen werden.

Verschiedene Dokumente können auch von der Website heruntergeladen werden:

http://www.waermepumpe.ch/fe/projekte/nth

6 WESENTLICHE ERKENNTNISSE AUS DEM PROJEKT

Die Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb über 2 Jahre zeigen:

- Das einfache Hydraulikschema (direkte Einbindung ohne Speicher und Thermostatventile) funktioniert dank des Selbstregeleffekts von Niedrigtemperaturbodenheizungen einwandfrei.
- Die Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe des Erdwärmesondenkreislaufs in Grafstal konnte um den Faktor drei gesenkt werden. Er liegt jetzt bei 70 W für eine 100 m-Sonde. Kälteträger ist eine 25 Vol-%-Aethylenglykol-Wasser-Mischung. Simulationsergebnisse ergaben für die Erdwärmesonde ein Optimum bei 4 K Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt. In diesem Bereich, in dem die Sonde laminar betrieben wird, ergibt sich für den Elektrizitätsverbrauch ein Minimum. Für die Wärmeverteilung auf der Wärmesenkenseite wurde in der Anlage Grafstal derselbe Pumpentyp verwendet. Ausgelegt wurde die Pumpe mit dem Programm [EWSDRUCK 99]. Bei WP-Anlagen im EFH kann oft der gleiche Pumpentyp für die Heiz- und Solepumpe verwendet werden.
- Die Wärmepumpe sollte so knapp wie möglich ausgewählt werden. D. h. vom berechneten Leistungsbedarf sollte eher die nächst kleinere Pumpe als die nächst grössere Wärmepumpe gewählt werden.
- Eine Lufterneuerungsanlage ist wegen der Dichtheit der Gebäudehülle erforderlich. Die nachträgliche Installation einer Einzelraumlüftung in Grafstal brachte eine markante Verbesserung der Luftqualität. Die Kombination von Einzelraumlüftung und Mauerventilen mit zentraler Absaugung in den Nasszellen ist eine besonders kostengünstige Lösung (1999: ca. CHF 3500.-). Der Einbau von Mauerventilen ist aber ein Kompromiss: Die Mauerventile ermöglichen die kontrollierte Zufuhr frischer Aussenluft, welche kalt in die Räume dringt und bei unsachgemässer Installation zu Behaglichkeitsproblemen führen kann. Werden Mauerventile in verschiedenen Stockwerken eingebaut, kann im Winter durch Auftriebseffekte die Strömungsrichtung umkehren (Kamineffekt). Mauerventile müssen mit einer Schalldämmung versehen werden. Wenn nicht, kann von aussen gehört werden, was innen gesprochen wird.
- Für zukünftige Bauvorhaben wäre abzuwägen, ob nicht eine Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung eingesetzt werden kann. Eine Wärmerückgewinnung hat gegenüber der reinen Abluftnutzung Vorteile. Die Abluft-Wärmepumpe bringt keine Energieersparnis (Der Vorteil der höheren Quellentemperatur wird vom schlechteren Verdichter-COP bei Kleinstwärmepumpen kompensiert). Bei Gebäuden mit einer dichten Gebäudehülle sowie Fenstern mit einem guten U-Wert empfiehlt sich der Einbau einer Komfortlüftung (Zu- und Abluft), damit eine gute Luftqualität eingehalten werden kann. Die Komfortlüftung sollte in die Haustechnik integriert werden, so dass beispielsweise die Abwärme der Abluft durch eine Wärmerückgewinnung dem Gebäude wieder zugeführt werden kann.
- Die Haustechnik sollte im beheizten Raum stehen. Auf diese Weise können (unvermeidliche) Speicherverluste genutzt werden. Falls dies nicht möglich ist, müssen alle Leitungen im unbeheizten Bereich isoliert werden. Besonders bei den Warmwasserleitungen und deren Anschlussstutzen ist darauf zu achten.
- Alle Leitungen durch die Gebäudehülle müssen abgedichtet werden. In Grafstal ergaben die Passiv-Tracergasmessungen für die Kellerzone trotz geschlossener Fenster den grössten Luftwechsel, weil der Kanal für die Elektroleitungen zwischen Haustableau und Keller nicht abgedichtet war.
- Um eine Überwärmung im Gebäude bei einfallender Sonnenstrahlung zu vermeiden, sollte das Gebäude viel Masse besitzen (Dämpfung der Temperaturschwingungen). Bei Leichtbauten in Holzbauweise ist eine unbedingt Beschattungsvorrichtung vorzusehen.
- Das Gebäude hatte in den oberen Stockwerken eine 2 bis 3 K höhere Temperatur, als nach SIA 384/2 dimensioniert. Die Heizkreise in den Obergeschossen mussten stark gedrosselt werden, zumal sich in diesem Bereich die Schlafräume befanden, in denen eine reduzierte Temperatur erwünscht ist.

- Präzis definierte Kennzahlen sind zur Beurteilung des Gesamtsystems erforderlich. Die folgenden Kennzahlen kommen zur Anwendung:
  - Der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad WNG ist ein Mass für die Qualität der Wärmeproduktion und die Vergleichsgrösse für Heizsysteme mit Öl- oder Gaskessel
  - Der Systemnutzungsgrad SNG enthält alle Verbraucher bzw. Verluste und vergleicht diese mit der zur Verfügung gestellten Nutzenergie. Er ist ein Mass für die Qualität des Gesamtsystems.
- Bei einem EFH mit zentraler Warmwassererzeugung ist eine Begleitheizung, i.a. ein elektrisches Heizband, zu vermeiden. Bei den Pilotanlagenmessungen hat das Heizband mehr Energie verbraucht als die Abluft-Wärmepumpe, bevor es ausser Betrieb genommen wurde !
- Die Trinkwassererwärmung durch eine Erdsondenwärmepumpe für Heiz- und Warmwasserbetrieb ist mit einem geeigneten Kältemittel (Propan R290, R134a, etc.) problemlos möglich.
- Während der EW-Sperrzeiten sinkt die „operative Temperatur" (Strahlungs-Luft-Temperatur in der Raummitte) unwesentlich. Jedoch wird die sich abkühlende Oberflächentemperatur des Bodens bei Körperkontakt als unangenehm empfunden.
- Der Speicher der Abluft-Wärmepumpe muss gut isoliert sein. Es ist ratsam, die Abdeckung für eine Kontrolle zu öffnen.
- Alleskönner, wie z.B. das Haustechnikmodul, versprechen oft mehr als sie leisten. Probleme treten vor allem auf, wenn das Benutzerverhalten stark von den Planungsdaten abweicht (z.B. 23° statt 20°C Raumtemperatur) oder wenn die von der WRG gelieferte Wärme beim Aufheizen nach Ferienabwesenheit nicht genutzt werden kann.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit Wärmeerzeugungsnutzungsgraden von 3,0[3] und 4,3[4] für die gesamte Wärmeerzeugung konnte auch in der Praxis gezeigt werden, dass das Auslegungskonzept und die einfache Hydraulikschaltung einwandfrei funktionieren. Die im Schlussbericht der Phase 2 [NTH2 98a] beschriebene Handrechenmethode stimmt auf ±5% mit den Messungen überein, wenn auf Planungswerte zurückgerechnet wird.

Hilfsaggregate und Bereitschaftsverluste des Warmwasserspeichers erhöhen den Betriebsaufwand um über 20% und sind damit nicht vernachlässigbar. Als sehr vorteilhaft erwies sich der nachträgliche Einbau einer Einzelraumlüftung und eines stärkeren Abluftventilators bei der Pilotanlage Grafstal. Die Luftqualität verbesserte sich erheblich, indem die CO_2-Konzentration im Mittel auf 800 ppm gesenkt werden konnte. Die Zusatzinvestition von knapp über CHF 3000.- ist sicher rechtfertigt.

Auch das Haustechnikmodul HTM200 (Fully) erreichte in der verbesserten Version einen Wärmeerzeugungsnutzungsgrad von 2,9, kann aber in dieser Form nicht empfohlen werden, weil die Zusatzheizung (GLH-Modul) kaum funktionierte und das HTM200 als reine Luftheizung für ein Haus nach Minergie-Standard nicht ausreicht. Als problematisch erwies sich das direktkondensierende Wärmeabgabesystem des GLH-Moduls, was in den zukünftigen Aggregaten nicht mehr angewandt wird.

Bei der Regelung funktionierten sowohl die konventionellen Rücklauf-Zweipunktregler als auch die neuen Reglerkonzepte, welche pulsbreitenmodulierend arbeiten, einwandfrei. Anstelle eines Ein/Aus-Schaltvorgangs über einen Temperatursollwert wird bei der Pulsbreitenmodulation der Energieverbrauch für einen Tag im voraus berechnet. Die Wärme wird dem Haus in mehreren Pakten zu definierten Zeitpunkten zugeführt. Getestet wurden ein beobachterbasierter Regler, eine Steuerung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und eine Steuerung, welche mit einer Energiekennlinie arbeitet. Auf einen Raumtemperaturfühler wurde verzichtet. Anzumerken ist hierzu, dass die Optimierungspotenziale in Bezug Sperrzeiten, Trinkwassererwärmung und Schaltzyklenhäufigkeit noch nicht im vollen Umfange genutzt wurden und die Verwendung eines Raumtemperaturfühlers bei zukünftigen Regelkonzepten zusätzliche Vorteile bringen könnte.

Bei allen Anlagen haben sich die Verbesserungsmassnahmen nach der 1. Heizperiode positiv ausgewirkt. Die wichtigsten sind das Abschalten der elektrischen Begleitheizung, der Ersatz der Solepumpe und die bessere Isolation von Speicher und Warmwasserleitungen.

Die Wärmepumpen in den Anlagen Schötz und Grafstal wurden 20-30% knapper dimensioniert, als dies bei einer strikten Auslegung nach SIA der Fall wäre. Elektrische Heizstäbe wurden nicht installiert. Trotz ungünstigem Benutzerverhalten (2-3 K höherer Innentemperatur) funktionierten die Anlagen auch bei Kälteperioden zur vollen Zufriedenheit. Die Dimensionierungsgrundlagen nach SIA sind bei Niedrigenergie- und Passivhäusern kritisch zu hinterfragen.

Die im Projekt bei den Anlagen Grafstal und Schötz gewählte Leichtbauweise verhält sich in Bezug Überhitzung problematisch. Wegen der geringen Speichermasse besitzt das Gebäude wenig Trägheit und überhitzt schnell, wenn nicht konsequent abgeschattet wird.

Bezüglich Kosten ist die Luft/Luft-Wärmepumpe im Passivhaus die günstigste, die Erdsondenwärmepumpe im Minergiehaus die teuerste Variante. Dies ist jedoch nur die halbe Wahrheit, weil die bauseitigen Kosten für den zusätzlichen Aufwand bei der Wärmedämmung nicht berücksichtigt sind. Nimmt man ein Typenhaus mit einer Dämmung nach SIA-Grenzwert und einer modernen Gasheizung als Basis und das Erreichen des Minergiestandards mit einer Erdsondenwärmepumpe und kontrollierter Wohnungslüftung zum Ziel, erhöhen sich die Investitionskosten um 13%. Die Zusatzinvestitionen bei den in Grafstal und Schötz verwendeten Typenhäusern wären in derselben Grössenordnung [Bürgi 00]. Beim massiv gebauten Haus in Fully wurde der Minergiestandard mit dem Haustechnikmodul HTM200 realisiert. Die Zusatzinvestion beträgt hier nur 4%. Allerdings sind darin die Investitionen für den Ersatz des nicht funktionierenden Grundlastmoduls GLH3000 nicht enthalten. Im Mittel ergeben sich zusätzliche Investitionskosten von ca. 9% und bei Einbezug der geringeren Energiekosten ein Zuwachs bei den durchschnittlichen Jahreskosten von 5,5%.

---

[3] Schötz: Luft/Wasser-Wärmepumpe für Heizung

[4] Grafstal: Erdsonden-Wärmepumpe für Heizung und Warrmwasser

8 SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Begriff
$T_{L24}(t)$	[°C]	Aussenluftmitteltemperatur der letzten 24 Stunden
Q_{Bed}	[kJ]	Heizenergiebedarf
$Q_{Bed\,24}$	[kJ]	Heizenergiebedarf der nächsten 24 Stunden
$\dot{Q}^{*}_{WP}$	[kW]	Heizleistung der Wärmepumpe
$\dot{Q}_{WP,hw}$	[kW]	Heizleistung der Wärmepumpe für Heizen und Warmwasser
$\dot{Q}^{*}_{Bed}$	[kW]	Heizleistungsbedarf
$\dot{Q}^{*}_{V}$	[kW]	Verlustwärmestrom an Aussenluft
$\dot{Q}^{*}_{FB}$	[kW]	Wärmeflussstrom in den Fussboden
$\dot{Q}^{*}_{WGB}$	[kW]	Wärmegewinnstrom in den Fussboden
$\dot{Q}^{*}_{WGR}$	[kW]	Wärmegewinnstrom in den Raum
$\dot{Q}^{*}_{BR}$	[kW]	Wärmestrom vom Boden in den Raum
$\dot{Q}^{*}_{WB}$	[kW]	Wärmestrom vom Wasser in den Boden
ε(t)	[-]	momentane Leistungszahl der Wärmepumpe (COP)
ρ_G	[kg/m^3]	Gebäudedichte
ρ_W	[kg/m^3]	Dichte des Heizungswassers
A_B	[m^2]	Bodenfläche
AZ(t)	[-]	momentane Arbeitszahl der Wärmepumpe
c_B	[kJ/kg.K]	spezifische Wärmekapazität des Bodens
c_G	[kJ/kg.K]	spezifische Wärmekapazität des Gebäudes
CO2	[ppm]	CO2-Gehalt der Raumluft
COP	[-]	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
c_W	[kJ/kg.K]	spezifische Wärmekapazität des Heizungswassers
d	[m]	Durchmesser
E_{aux}	[kWh]	Elektrischer Energiebezug der für die Wärmeerzeugung erforderlichen Hilfsaggregate
EBF	[m^2]	Energiebezugsfläche
E_d	[kWh]	Strombedarf Ventilatoren und Regelung (Fully)
E_e	[kWh]	Strombedarf Heizstäbe (Fully)

E_h	[kWh]	Energiebezug für Heizbetrieb
E_{h_HPu}, $E_{h,H\text{-}Pu}$	[kWh]	Energiebezug Heizungspumpe für Heizbetrieb
E_{h_SPu}, $E_{h,S\text{-}Pu}$	[kWh]	Energiebezug Solepumpe für Heizbetrieb
E_{h_WP}, $E_{h,WP}$	[kWh]	Energiebezug Wärmepumpe für Heizbetrieb
E_{HPu}, $E_{H\text{-}Pu}$	[kWh]	Energiebezug Heizungspumpe
E_{hw}	[kWh]	Energiebezug für Heizung und Warmwasser
E_L	[kWh]	Energiebezug Einzelraumlüftungsgerät
E_{SPu}, $E_{S\text{-}Pu}$	[kWh]	Energiebezug Solepumpe
E_v	[kWh]	Energiebezug für Lüftung
E_{venti}	[kWh]	Energiebezug für Abluftventilator ausserhalb der Boilerladezeit
E_w	[kWh]	Energiebezug für Warmwasserbetrieb
E_{w_HPu}, $E_{w,H\text{-}Pu}$	[kWh]	Energiebezug Heizungspumpe für Warmwasserbetrieb
E_{w_SPu}, $E_{w,S\text{-}Pu}$	[kWh]	Energiebezug Solepumpe für Warmwasserbetrieb
E_{w_WP}, $E_{w,WP}$	[kWh]	Energiebezug Wärmepumpe für Warmwasserbetrieb
E_{WL}	[kWh]	Energiebezug Wohnungslüftung (Abluft-WP-Boiler mit Ventilator)
E_{WP}	[kWh]	Elektrischer Energiebezug der Wärmepumpe
$E_{WP,aux}$	[kWh]	Elektrischer Energiebezug der Hilfsaggregate der Wärmepumpe
$E_{Z,h}$ (=$Q_{Z,h}$)	[kWh]	Elektrischer Energiebezug der Zusatzheizung (Heizstab) für Heizen
$E_{Z,w}$ ($Q_{Z,w}$)	[kWh]	Elektrischer Energiebezug der Zusatzheizung (Heizstab) für Warmwasser
$f_{T,TVL}$	[-]	Korrekturfaktor für Vorlauftemperatur (JAZ-Handrechenmethode)
$HGH_{xx/\vartheta i}$	[K*h]	Heizgradstunden
$HGT_{12/\vartheta i}$	[K*Tage]	Heizgradtage
I_{g_hor}, $I_{g,hor}$	[W/m^2]	Globalstrahlung, horizontal
$I_{Süd}$	[W/m^2]	Vertikale Einstrahlung auf die Südfassade
J	[-]	Güteindex
JAZ	[-]	Jahresarbeitszahl
K, U	[W/K m^2]	Wärmedurchgangskoeffizient
LQ	[ppm]	CO_2-Konzentration im Wohnzimmer Erdgeschoss
LW	[h^{-1}]	Luftwechsel
m_B	[kg]	Masse des Bodens
n	[- / h^{-1}]	Einschaltvorgänge des Verdichters / Aussenluftwechsel
P_{El}	[kW]	elektrische Leistung
phi_{i_EG}	[%]	relative Feuchte im Wohnzimmer Erdgeschoss
phi_{w_ZUL}	[%]	relative Feuchte am Eintritt des Abluftwärmepumpenboilers
P_{HPu}	[kW]	elektrische Leistungsaufnahme der Heizkreispumpe
P_{SPu}	[kW]	elektrische Leistungsaufnahme der Solepumpe
P_{WP}	[kW]	elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
$P_{WP,aux}$	[kW]	elektrischer Leistungsanteil für Druckabfall am Verdampfer und Verflüssiger
Q	[-]	Bestrafungsfaktor der Raumtemperaturabweichung vom Sollwert

q	[W/m^2]	spezifische Wärmeleistung (Wärmeleistung pro Flächeneinheit)
Q_{AWN}	[kWh]	Abwärmenutzung
Q_h	[kWh]	Heizwärmebezug
$Q_{h,WP}$	[kWh]	erzeugte Heizwärme ab Wärmepumpe
Q_{hv}	[kWh]	Heizwärmebezug und Verluste ab Wärmezähler Heizung
Q_{hw}	[kWh]	Wärmebezug für Heizung und Warmwasser
Q_{SP}	[kWh]	Wärmverlust der Heizspeicheranlage
Q_t, Q_T	[kWh]	Transmissionswärmeverluste
Q_{ug}, Q_{WG}	[kWh]	genutzte Gewinne durch Sonne, Personen und Elektrizität
Q_v, Q_L	[kWh]	Lüftungswärmeverlust
$Q_{v_\vartheta i_n_LW}$	[kWh]	Korrektur der Lüftungsverluste gemäss Minergie-Planungsdaten
Q_{v_h}	[kWh]	Verteilverluste Heizwasserverteilung
Q_{v_HPu}	[kWh]	nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe
Q_{v_hw}, $Q_{v,hw}$	[kWh]	Verluste der Verteilung für Heiz- und Warmwasser
Q_{v_SPu}	[kWh]	nicht nutzbare Wärmeverluste Solepumpe
Q_{v_w}	[kWh]	Bereitschaftsverluste Boiler
Q_{vhw}, $Q_{v,hw}$	[kWh]	Verteilverluste (Heizung und Warmwasser)
Q_w	[kWh]	Wärmebezug für Warmwasser
$Q_{w,WP}$	[kWh]	erzeugte Warmwasserwärme ab Wärmepumpe
Q_{WP}	[kWh]	während der Laufzeit von der Wärmepumpe abgegebene Wärme
$Q_{WP,hw}$	[kWh]	abgegebene Heizwärme der Wärmepumpe für Heizen und Warmwasser
Q_{WRG}	[kWh]	Wärmerückgewinnung Einzelraumlüftungsgerät
$Q_{Z,h}$	[kWh]	abgegebene Heizwärme der Zusatzheizung (Heizstab) für Heizen
$Q_{Z,w}$	[kWh]	abgegebene Heizwärme der Zusatzheizung (Heizstab) für Warmwasser
R	[-]	Bestrafungsfaktor der Heizleistung für die Optimierung
SNG	[-]	Systemnutzungsgrad
T	[°C]	Temperatur
T_B, T_{FB}	[°C]	Bodentemperatur
t_{Boiler}	[h]	Boilerladezeit
t_{h_SPu}, $t_{h,S\text{-}Pu}$	[h]	Laufzeit Solepumpe für Heizbetrieb
T_{Hori}	[h]	Prädiktionshorizont
t_{HPu}, $t_{H\text{-}Pu}$	[h]	Laufzeit Heizungspumpe
T_L, T_A	[°C]	Aussenlufttemperatur
T_R	[°C]	Raumlufttemperatur
$T_{R.Soll}$	[°C]	Raumluftsollwert
T_{RL}	[°C]	Rücklauftemperatur
t_{SPu}, $t_{S\text{-}Pu}$	h	Laufzeit Solepumpe
T_{VL}	[°C]	Vorlauftemperatur
t_{w_SPu}, $t_{w,S\text{-}Pu}$	[h]	Laufzeit Solepumpe für Warmwasserbetrieb

V_H	[kg]	Heizkreisvolumen
V_h, $\dot{V}_H^*$	[m³/s]	Durchfluss Heizung
V_{w_ZUL}	[m³/s]	Abluftvolumenstrom am Eingang des Abluftwärmepumpenboilers
V_{WP}	[m³/s]	Durchfluss Wärmepumpe
WAZ	[-]	Wochenarbeitszahl (Fully)
WNG	[-]	Wärmeerzeugungsnutzungsgrad
WoNG	[-]	Wochennutzungsgrad (Fully)
w_{TA}	[-]	Gewichtungsfaktor für Aussentemperaturintervall
Δt_{hori}	[h]	Prädiktionszeithorizont
Δt_{LZ}	[s]	Laufzeit der Wärmepumpe
$\Delta t_{LZ,opt}$	[s]	optimalen Laufzeit der Wärmepumpe
Δt_P	[s]	Periodendauer (Zykluszeit der Wärmepumpe)
ϑ_{AL}	[°C]	Aussenlufttemperatur
ϑ_{am}	[°C]	Tagesmittelwert Aussenlufttemperatur ϑ_a
ϑ_{h_ABL}	[°C]	Ablufttemperatur Luft/Wasser-Heizwärmepumpe
ϑ_{h_RL}	[°C]	Rücklauftemperatur Heizung
ϑ_{h_VL}	[°C]	Vorlauftemperatur Heizung
ϑ_{h_ZUL}	[°C]	Zulufttemperatur Luft/Wasser-Heizwärmepumpe (Aussenlufttemperatur)
ϑ_i	[°C]	Raumlufttemperatur im Gebäude (1 Zone)
ϑ_{i_DG}, T_{i_DG}	[°C]	Raumlufttemperatur im Dachgeschoss
ϑ_{i_EG}, T_{i_EG}	[°C]	Raumlufttemperatur im Wohnzimmer Erdgeschoss
ϑ_{i_OG}, T_{i_OG}	[°C]	Raumlufttemperatur im Zimmer Süd-Ost Obergeschoss
ϑ_{KW}	[°C]	Temperatur Boilerzuleitung
ϑ_{RL}	[°C]	Rücklauftemperatur Heizung und Warmwasser
ϑ_{s_RL}	[°C]	Rücklauftemperatur Sole
ϑ_{s_VL}	[°C]	Vorlauftemperatur Sole
ϑ_{SP1}	[°C]	Oberflächentemperatur Speicher oben
ϑ_{SP2}	[°C]	Oberflächentemperatur Speicher unten
ϑ_{VL}	[°C]	Vorlauftemperatur Heizung und Warmwasser
ϑ_{W_ABL}	[°C]	Austrittstemperatur der Abluft am Abluftwärmepumpenboiler
ϑ_{W_ZUL}	[°C]	Eintrittstemperatur der Abluft am Abluftwärmepumpenboiler
ϑ_{WW}	[°C]	Temperatur Warmwasser
κ_B	[W/(m²*K)]	Wärmedurchgangskoeffizient Boden-Raum
κ_G	[W/K]	Wärmedurchgangskoeffizient Gebäude-Aussenluft
κ_W	[W/K]	Wärmedurchgangskoeffizient Heizwasser-Boden
τ_{AUS}	[h]	Ausschalttransiente der Wärmepumpenheizleistung
τ_{EIN}	[h]	Einschalttransiente der Wärmepumpenheizleistung

τ_G	[h]	Zeitkonstante des Gebäudes

Indizes

A	aussen
AL, L	Aussenluft
B, FB	Boden
BR	Boden zu Raum
EW	Elektrizitätswerk
G	Gebäude
H	Heizungswasser
h	Raumheizung
HG	Heizgrenze
hw	Heizung und Warmwasser
LER	Luft-Erdregister
R	Raum
RL	Rücklauf
S	Sole
V	Verlust; Verdampfer
VL	Vorlauf
w	Warmwasser
W	Wasser
WA	Wärmeabgabe
WB	Wasser zu Boden
WP	Wärmepumpe

9 LITERATURLISTE

[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).

[Afjei 00a] Th. Afjei: Handbuch für kostengünstige Niedrigenergie- und Passivhäuser, 11. Statusseminar „Energie- und Umweltforschung im Hochbau", 14./15.9.2000, EMPA-ZEN, Zürich, CH (8 Seiten).

[Afjei 00b] Th. Afjei: Kostengünstige Wärmepumpenheizungssysteme für Niedrigenergie- und MINERGIE-Häsuer, Energie Effizientes Bauen, 3/2000, Urbach, D.

[Afjei 00c] Th. Afjei: Kostengünstige Wärmepumpenheizungssysteme für Niedrigenergiehäuser, Vortrag und Poster am Herbstsymposium für angewandte Forschung und Entwicklung der FHBB, Muttenz, CH (8 Seiten).

[Afjei 00d] Th. Afjei: Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser, Technisches Planungshandbuch, tec21 Nr.47/2000, Zürich, CH (4 Seiten).

[Afjei 00e] Th. Afjei: Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser, Technisches Planungshandbuch, Bulletin SEV/VSE 24/2000, Zürich, CH (4 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.

[Bürgi 00] H.P. Bürgi: Kosten und Nutzen im MINERGIE-Haus – Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit, MINERGIE-Agentur Bau, Bern, CH (10 Seiten) http://www.minergie.ch

[ES550D 95] Elektro Standard Abluft-Wärmepumpenwasserwärmer, Typ: ES 550 D, Bedienungsanleitung, Vertrieb CH: Durena AG, Sägestrasse, 5600 Lenzburg, 1995, CH

[EWSDRUCK 99] EWS: Auslegung und Dimensionierung von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern [Huber 97 / Huber 99a].
Software EWSDRUCK (Excel-Tabelle) und Bericht (Hu_Hyd_Ber.pdf) können gratis von der folgenden Website heruntergeladen werden:
http://www.igjzh.com/huber/index.htm

[Gabathuler 99] H.R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 1, Schlussbericht, Bundesamtes für Energie, 1999, CH (ENET-Nr. 9723972).

[Gabathuler 00] H.R. Gabathuler, H. Mayer: "Regelung mit einfacher Pulsbreitenmodulation", Tagungsband zur 7. UAW-Tagung: Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems, Burgdorf, 2000, CH..

[Ginsburg 99] S. Ginsburg: „Hierarchische Wärmepumpenregelung mit Robust Control und Fuzzy Control", ETH Diss Nr. 13365, Zürich, 1999, CH.

[Huber 97] A. Huber, O. Schuler: Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1997. ENET-Nr. 195'115.

[Huber 99a] A. Huber, D. Pahud: Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1999. ENET-Nr. 195'116, Download von www.waermepumpe.ch/fe

[Ljung 87] L. Ljung: System Identification, Theory for the User, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987, USA.

[MathWorks 99] User's Guide: XPC Target for Use with Real-Time Workshop, The MathWorks Inc., 1999, USA.

[NTH2 98a] Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Doka, G.; Geering, H. P.; Giger, Th.; Ginsburg, S.; Glass, A.; Huber, A.; Shafai, E.; Wetter, M.; Wittwer, D.; Zweifel, G.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1998. ENET-Nr. 194'993.

[NTH2 98b] Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Doka, G.; Geering, H. P.; Giger, Th.; Ginsburg, S.; Glass, A.; Huber, A.; Shafai, E.; Wetter, M.; Wittwer, D.; Zweifel, G.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Anhang zum Schlussbericht. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1998. ENET-Nr. 194'994.

[NTH4 00a] Afjei, Th.; Bühring, A.; Dürig, M.; Huber, A.; Keller, P.; Shafai, E.; Widmer, P.; Zweifel, G.: Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser. Phase 4: Technisches Handbuch, Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 2000, (95 Seiten).

[NTH4 00b] Bauherrenbroschüre: Die Wärmepumpe im Minergiehaus – Energieeffiziente Haustechnik für das 21. Jahrhundert, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz, Zürich, 2000, CH (14 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).

[PentIAQ 00] PentIAQ: Ventilation measurements in two single family houses, Passive tracer gas technique used in house 1, Grafstal, and house 2, Schötz, Final Report, Auftrag von HTA Luzern an Pentiaq AB, P.O. Box 7, SE-801 02 Gävle, SE (17 Seiten).

[PWM 99] H.R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Schlussbericht Phase 1, Diessenhofen, CH (35 Seiten).

[RAVEL 96] Gabathuler, R; Baumgartner, T; Mayer, H; Szodoky, G.: Wärmepumpen: Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen. Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1996, CH (EDMZ 724.356d, 76 Seiten)

[Recknagel 94/95] Recknagel,Sprenger,Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klima Technik, 67. Auflage, 1995 Oldenbourg Verlag, D, ISBN 3-486-26213-0

[Reiner 98] Reiner G.; Shafai E.; Wimmer R.; Zogg D.; Gabathuler H. R.; Mayer H.; Bruderer H. U.: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 1 bis Phase 3, Schlussbericht: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation, Bundesamtes für Energie, 1998, CH (ENET-Nr. 9657407).

[Shafai 00a] E. Shafai: „Kurztestmethode für Wärmepumpen und Gesamtsysteme – 1. Teil", Tagungsband zur 7. UAW-Tagung: Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems, Burgdorf, 2000, CH.

[Shafai 00b] E. Shafai, S. Ginsburg, R. Wimmer: „Modellbasierte Pulsbreitenmodulation", Tagungsband zur 7. UAW-Tagung: Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems, Burgdorf, 2000, CH.

[Shafai 99] E. Shafai, S. Ginsburg, R. Wimmer, D. Zogg: "Validation of a model for a residential heat pump system based on short-period measurements", Proceedings of 6th IEA Heat Pump Conference, Berlin, 1999, D.

[SIA380/1 88] SIA 380/1; Energie im Hochbau; Ausgabe 1988; Nachdruck 7/1993; Zürich, CH.

[SIA381/3 82] SIA 381/3, Heizgradtage der Schweiz, Ausgabe 1982, Nachdruck 5/1984, Zürich, CH (26 Seiten).

[Söderstrom 89] T. Söderstrom, P. Stoica: „System Identification, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

[Wimmer 99] R. Wimmer, E. Shafai, H.R. Gabathuler, H. Mayer:" Pulse-width modulation for low-power heat pump heating systems", Proceedings of 6th IEA Heat Pump Conference, Berlin, 1999, D.

[WPZ 97] WPZ-Bulletin Nr. 11; Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss; Nordostschweizerische Kraftwerke NOK; Elektrizitätswerk des Kantons Zürich EKZ; Töss, 1997, CH.

10 ANHANG

10.1 Verwendete Messgeräte und Sensoren

Datenlogger

Fabrikat	Datataker
Typ	Grundgerät DT605, Kanalerweiterungsmodul CEM - AD

Temperaturen

Typ	Pt100, 4 Leiter, DIN 1/5

Globalstrahlung

Fabrikat	Haenni Solar 130
Typ	Silizium Pyranometer
Bereich	0 ... 15000 W/m^2

Relative Feuchtigkeit

Fabrikat	Rotronic
Typ	F3V-W-010W, Hygromer HLK-Messumformer

Luftqualität (CO_2)

Fabrikat	Landis & Stäfa
Typ	Luftqualitätsfühler QPA62.1
Bereich	0 ... 2000 ppm

Elektrizitätsverbrauch Wärmepumpen

Fabrikat	Leistungs- und Energiemesser EMU Elektronik AG
Typ	EMU30.x7, 16 A

Durchfluss Raumheizung

Fabrikat	Wärmezähler GWF
Messprinzip	Volumenmessteil: Einstrahl-Flügelrad-Zähler
Typ	EnerCal 731 EAW

Energieverbrauch Heizungund Warmwasser

Fabrikat	Wärmezähler GWF
Messprinzip	Volumenmessteil: Einstrahl-Flügelrad-Zähler Temperatur: Pt100
Typ	EnerCal 731 EAW

Laufzeit Umwälzpumpen und Boilerladezeit

Während der Betriebszeit der Umwälzpumpen bzw. der Boilerladezeit wird über ein Relais ein Spannungssignal von 5 Volt auf den Datenlogger gegeben.

10.2 Gemessene und berechnete Grössen in Grafstal

Die verwendeten Nummerierungen bei den nachfolgend aufgeführten Formeln beziehen sich auf das Energieflussdiagramm in Abb. 17.

10.2.1 Gemessene Energieflüsse

Symbol	Einheit	Begriff
E_{hw}	kWh	Energiebezug für Heizung und Warmwasser (1 + 2 + 3 + 4)
Q_{hv}	kWh	Heizwärmebezug und Verluste ab Wärmezähler Heizung
Q_{WP}	kWh	Heizwärmebezug Wärmepumpe (16)
Q_w	kWh	Wärmebezug für Warmwasser (14)

10.2.2 Berechnete Energieflüsse

Symbol	Einheit	Begriff
E_{h_WP}	kWh	Energiebezug Wärmepumpe für Heizbetrieb (1) $E_{h_WP} = E_h - E_{h_HPu} - E_{h_SPu}$ Gl. 31
E_h	kWh	Energiebezug für Heizbetrieb $E_h = E_{hw}\ ausserhalb\ Boilerladezeit$ Entscheidungskriterium: wenn Durchfluss Heizung < 100 m³/h
E_{h_HPu}	kWh	Energiebezug Heizungspumpe für Heizbetrieb $E_{h_HPu} = t_{h_HPu} \cdot P_{HPu}$ Gl. 32 t_{h_HPu} = Laufzeit Heizungspumpe für Heizbetrieb P_{HPu} = Leistungsaufnahme Heizungspumpe: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.
E_{h_SPu}	kWh	Energiebezug Solepumpe für Heizbetrieb $E_{h_SPu} = t_{h_SPu} \cdot P_{SPu}$ Gl. 33 t_{h_SPu} = Laufzeit Solepumpe für Heizbetrieb P_{SPu} = Leistungsaufnahme Solepumpe: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.
E_{w_WP}	kWh	Energiebezug Wärmepumpe für Warmwasserbetrieb (2) $E_{w_WP} = E_w - E_{w_HPu} - E_{w_SPu}$ Gl. 34
E_w	kWh	Energiebezug für Warmwasserbetrieb $E_w = E_{hw}\ während\ Boilerladezeit$ Entscheidungskriterium: wenn Durchfluss Heizung > 100 m³/h
E_{w_HPu}	kWh	Energiebezug Heizungspumpe für Warmwasserbetrieb $E_{w_HPu} = t_{w_HPu} \cdot P_{HPu}$ Gl. 35

t_{w_HPu} = Laufzeit Heizungspumpe für Warmwasserbetrieb
P_{HPu} = Leistungsaufnahme Heizungspumpe: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.

E_{w_SPu} kWh Energiebezug Solepumpe für Warmwasserbetrieb

$$E_{w_SPu} = t_{w_SPu} \cdot P_{SPu}$$

Gl. 36

t_{w_SPu} = Laufzeit Solepumpe für Warmwasserbetrieb
P_{SPu} = Leistungsaufnahme Solepumpe: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.

E_{SPu} kWh Energiebezug Solepumpe (3)

$$E_{SPu} = E_{h_SPu} + E_{w_SPu}$$

Gl. 37

E_{HPu} kWh Energiebezug Heizungspumpe (4)

$$E_{HPu} = E_{h_HPu} + E_{w_HPu}$$

Gl. 38

E_L kWh Energiebezug Einzelraumlüftungsgerät (5)

$$E_L = t_L \cdot P_L$$

Gl. 39

t_L = Laufzeit Einzelraumlüftungsgerät (24-Stunden Betrieb)
P_{HPu} = Leistungsaufnahme Einzelraumlüftungsgerät: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.

Q_{WRG} kWh Wärmerückgewinnung Einzelraumlüftungsgerät (6)

$$Q_{WRG} = \eta_t \cdot V_{ABL} \cdot \rho_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 40

η_t = Temperatur-Änderungsgrad = 0.5 (gemäss Herstellerangaben)
V_{ABL} = Abluftvolumenstrom = 30 m^3/h
ρ = Luftdichte in kg/m^3
c_{pL} = spezifische Wärmekapazität Luft in J/(kg K)
$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz ϑ_a zu ϑ_i

Q_{ug} kWh genutzte Gewinne durch Sonne, Personen und Elektrizität (7)
Berechnung nach SIA 380/1

Q_{v_SPu} kWh nicht nutzbare Wärmeverluste Solepumpe (8)
50% von E_{Spu}

Q_{v_HPu} kWh nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe (9)
50% von E_{Hpu}

Q_{vhw} kWh Verluste Heizwasserverteilung (10)
bis Wärmezähler Heizung

$$Q_{WP} - Q_w - Q_{v_w} - Q_{hv}$$

Gl. 41

ab Wärmezähler Heizung

$$Leitungen: l \cdot k_R \cdot \Delta\vartheta$$

$$Bodenheizungsverteiler\ und\ Bodenheizungsrohr: a_K \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

A = Oberfläche in m^2
Bodenheizungsverteiler A = 0.384 m^2
Bodenheizungsrohr A = 0.00386 m^2

α_K = Wärmeübergangskoeffizient aus [Recknagel 94/95] Bild 135-29:
Bodenheizungsverteiler α_K = 6.1 W/(m^2K)
Bodenheizungsrohr α_K = 7.0 W/(m^2K)

k_R = Wärmedurchgangskoeffizient aus SIA 380/1 [SIA380/1 88], Tabelle D3
k_R = 0.145 W/(m K)

l = Leitungslänge = 12 m

$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz ϑ_{VL} bzw. ϑ_{RL} zu ϑ_i

Q_{v_w} kWh Bereitschaftsverluste Boiler (11)

$$Q_{v_w} = V \cdot \rho \cdot c_{pw} \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 42

V = Speicherinhalt = 0.3 m^3
ρ = Wasserdichte in kg/m^3
c_{pw} = spezifische Wärmekapazität Wasser in J/(kg K)
$\Delta\vartheta$ = Auskühlung Speicher in K

Q_t kWh Transmissionswärmeverluste (12)

$$Q_t = Q_{ug} + Q_h + Q_{WRG} - Q_v$$

Gl. 43

Q_v kWh Lüftungswärmeverlust (13)

$$Q_v = V_{Gebäude} \cdot n \cdot \rho_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 44

$V_{Gebäude}$ = Gebäudevolumen = 390 m^3
n = Aussenluftwechsel
ρ = Luftdichte in kg/m^3
c_{pL} = spezifische Wärmekapazität Luft in J/(kg K)
$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz ϑ_a zu ϑ_i

Q_h kWh Heizwärmebezug (15)

$$Q_h = Q_{hv} - Q_{v_h}$$

Gl. 45

wobei Q_{v_h} Verteilverluste ab Wärmezähler Heizung

10.2.3 Temperaturen

Gemessene Temperaturen

Symbol	Einheit	Begriff
ϑ_{s_VL}	°C	Vorlauftemperatur Sole
ϑ_{s_RL}	°C	Rücklauftemperatur Sole
ϑ_{VL}	°C	Vorlauftemperatur Heizung und Warmwasser

ϑ_{RL}	°C	Rücklauftemperatur Heizung und Warmwasser
ϑ_{h_VL}	°C	Vorlauftemperatur Heizung
ϑ_{h_RL}	°C	Rücklauftemperatur Heizung
ϑ_{WW}	°C	Temperatur Warmwasser
ϑ_{KW}	°C	Temperatur Boilerzuleitung
ϑ_{SP1}	°C	Oberflächentemperatur Speicher oben Messstelle 0,4 m ab Boilerboden
ϑ_{SP2}	°C	Oberflächentemperatur Speicher unten Messstelle 1,0 m ab Boilerboden
ϑ_{i_EG}	°C	Raumlufttemperatur im Wohnzimmer Erdgeschoss Messstelle 1,6 m ab Boden
ϑ_{i_OG}	°C	Raumlufttemperatur im Zimmer Süd-Ost Obergeschoss Messstelle 1,6 m ab Boden
ϑ_{i_DG}	°C	Raumlufttemperatur im Zimmer Süd-Ost Dachgeschoss Messstelle 1,6 m ab Boden
ϑ_a	°C	Aussenlufttemperatur

Berechnete Temperaturen und Heizgradtage

Symbol	Einheit	Begriff
ϑ_i	°C	arithmetischer Mittelwert aus ϑ_{i_EG}, ϑ_{i_OG} und ϑ_{i_DG}
ϑ_{am}	°C	Tagesmittelwert Aussenlufttemperatur ϑ_a
$HGT_{12/\vartheta i}$	K*Tage	Heizgradtage $HGT_{12/\vartheta_i} = \sum(\vartheta_i - \vartheta_{am})$ Gl. 46 für $\vartheta_{am} < 12$ °C (Heizgrenze)

10.2.4 Luftqualität

Gemessene Grössen

Symbol	Einheit	Begriff
phi_{i_EG}	°C	relative Feuchte im Wohnzimmer Erdgeschoss Messstelle 1,6 m ab Boden
LQ	ppm	CO_2-Konzentration im Wohnzimmer Erdgeschoss (Wenn ausser Personen keine Verunreinigungsquellen (z.B. Verbrennung von Gas zu Kochzwecken) vorhanden sind, kann der CO_2-Gehalt als Luftqualitätsindikator verwendet werden) Messstelle 1,6 m ab Boden.

10.3 Gemessene und berechnete Grössen in Schötz

Die verwendeten Nummerierungen bei den nachfolgend aufgeführten Formeln beziehen sich auf das Energieflussdiagramm in Abb. 18.

10.3.1 Gemessene Energieflüsse Schötz

Symbol	Einheit	Begriff
E_h	kWh	Energiebezug Heizung (1 + 2)
E_{WL}	kWh	Energiebezug Abluft-WP-Boiler mit Abluftventilator (3 + 4)
Q_{h_WP}	kWh	Heizwärme Luft/Wasser-Wärmepumpe (15)
Q_w	kWh	Wärmebezug für Warmwasser (12)

10.3.2 Berechnete Energieflüsse Schötz

Symbol **Einheit** **Begriff**

E_{h_WP} kWh Energiebezug Luft/Wasser-Wärmepumpe (1)

$$E_{h_WP} = E_h - E_{hPu}$$

Gl. 47

E_{h_Pu} kWh Energiebezug Heizungspumpe (2)

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

Gl. 48

t_{h_Pu} = Laufzeit Heizungspumpe
P_{h_Pu} = Leistungsaufnahme Heizungspumpe: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.

E_{w_WP} kWh Energiebezug Abluft-WP-Boiler während der Boilerladezeit (3)

$$E_{w_WP} = E_{WL} - E_{Venti}$$

Gl. 49

E_{Venti} kWh Energiebezug Abluftventilator ausserhalb der Boilerladezeit (4)

$$E_{Venti} = E_{WL} - t_{Boiler} \cdot P_{w_WP}$$

Gl. 50

t_{Boiler} = Boilerladezeit
P_{w_WP} = Leistungsaufnahme Abluft-WP-Boiler: Die Leistungsaufnahme wurde bei einer Einzelmessung ermittelt und als konstant angenommen.

Q_{AWN} kWh Abwärmenutzung (5)

$$Q_{AWN} = Q_{w_WP} - E_{w_WP}$$

Gl. 51

Q_{w_WP} und E_{w_WP} während der Heizperiode

Q_{ug} kWh genutzte Gewinne durch Sonne, Personen und Elektrizität (6)
Berechnung nach SIA 380/1

Q_{v_hPu} kWh nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe (7)

50% von E_{hPu}

Q_{v_h} kWh Verluste Heizwasserverteilung (8)

$$Leitungen: l \cdot k_R \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 52

$$Bodenheizungsverteiler\ und\ Bodenheizungsrohr: a_K \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 53

A = Oberfläche in m^2
Bodenheizungsverteiler A = 0.435 m^2
Bodenheizungsrohr A = 0.0032 m^2
α_K = Wärmeübergangskoeffizient aus [Recknagel 94/95] Bild 135-29:
Bodenheizungsverteiler α_K = 6.1 W/(m^2K)
Bodenheizungsrohr α_K = 7.0 W/(m^2K)
k_R = Wärmedurchgangskoeffizient aus SIA 380/1 [SIA380/1 88], Tabelle D3
k_R = 0.145 W/(m K)
l = Leitungslänge = 11.9 m
$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz ϑ_{VL} bzw. ϑ_{RL} zu ϑ_i

Q_{v_w} kWh Bereitschaftsverluste Boiler (9)

$$Q_{v_w} = V \cdot \rho \cdot c_{pw} \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 54

V = Speicherinhalt = 0.18 m^3
ρ = Wasserdichte in kg/m^3
c_{pw} = spezifische Wärmekapazität Wasser in J/(kg K)
$\Delta\vartheta$ = Auskühlung Speicher in K

Q_t kWh Transmissionswärmeverluste (10)

$$Q_t = Q_{ug} + Q_h - Q_v$$

Gl. 55

Q_v kWh Lüftungswärmeverlust (11)

$$Q_v = V_{Gebäude} \cdot n \cdot \rho_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\vartheta$$

Gl. 56

$V_{Gebäude}$ = Gebäudevolumen = 365 m^3
n = Aussenluftwechsel
ρ = Luftdichte in kg/m^3
c_{pL} = spezifische Wärmekapazität Luft in J/(kg K)
$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz ϑ_a zu ϑ_i

Q_{w_WP} kWh Heizwärme Abluft-WP-Boiler (13)

$$Q_{w_WP} = Q_w + Q_{v_w}$$

Gl. 57

Q_h kWh Heizwärmebezug (14)

$$Q_h = Q_{h_WP} + E_{hPu} - Q_{v_hPu} - Q_{v_h}$$

Gl. 58

10.3.3 Temperaturen Schötz

Gemessene Temperaturen

Symbol	Einheit	Begriff
ϑ_{h_ZUL} (ϑ_a)	°C	Zulufttemperatur Luft/Wasser-Wärmepumpe (Aussenlufttemperatur)
ϑ_{h_ABL}	°C	Ablufttemperatur Luft/Wasser-Wärmepumpe
ϑ_{VL}	°C	Vorlauftemperatur Raumheizung
ϑ_{RL}	°C	Rücklauftempertur Raumheizung
ϑ_{w_ZUL}	°C	Zulufttemperatur Wärmepumpen-Boiler
ϑ_{w_ABL}	°C	Ablufttemperatur Wärmepumpen-Boiler
ϑ_{WW}	°C	Temperatur Brauchwarmwasser
ϑ_{KW}	°C	Temperatur Boilerzuleitung
ϑ_{SP1}	°C	Oberflächentemperatur Speicher oben Messstelle 1,0 m ab Boilerboden
ϑ_{SP2}	°C	Oberflächentemperatur Speicher unten Messstelle 0,5 m ab Boilerboden
ϑ_{i_EG}	°C	Raumlufttemperatur im Wohn- und Esszimmer Erdgeschoss Messstelle 1,7 m ab Boden
ϑ_{i_OG}	°C	Raumlufttemperatur im Vorraum Obergeschoss Messstelle 1,6 m ab Boden

Berechnete Temperaturen und Heizgradtage

Symbol	Einheit	Begriff
ϑ_i	°C	arithmetischer Mittelwert aus ϑ_{i_EG} und ϑ_{i_OG}
ϑ_{am}	°C	Tagesmittelwert Aussenlufttemperatur ϑ_a
$HGT_{12/\vartheta i}$	°C Tage	Heizgradtage $HGT_{12/\vartheta_i} = \sum(\vartheta_i - \vartheta_{am})$ Gl. 59 für ϑ_{am} < 12 °C (Heizgrenze)

10.3.4 Luftqualität Schötz

Gemessene Grössen

Symbol	Einheit	Begriff
phi_{i_EG}	°C	relative Feuchte Wohn- und Esszimmer Erdgeschoss Messstelle 1,7 m ab Boden
LQ	ppm	CO_2-Konzentration Wohn- und Esszimmer Erdgeschoss (Wo ausser Personen keine Verunreinigungsquelle vorhanden sind, kann der CO2-Gehalt als Luftqualitätsindikator verwendet werden) Messstelle 1,7 m ab Boden.
V_{Venti}	m^3/s	Abluftvolumenstrom

10.4 Annahmen für den Kostenvergleich

10.4.1 Kostenzusammenstellung für Ölheizung mit Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem

Oel 16 kW/B-B	**Oel 16 kW-Heizkessel mit Beistellboiler und Zuluft-/Abluft-Wärmetauschersystem**			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität
Zinssatz	5%	Jahre	Fr.	Fr.
	Wärmequelle			
	Oeltank (2000 l)	30	1'450.00	94.32
	Zubehör	30	290.00	18.86
	Spanplattenwand	30	1'000.00	65.05
	Eingabe Amt für U'Schutz	30	150.00	9.76
	Wärmeerzeugung			
	Heizkessel mit Beistellboiler inkl. Reg	15	8'500.00	818.91
	Kamin 8m	30	4'000.00	260.21
	Expansionsgefäss	15	350.00	33.72
	Pumpen/Leitungen/Isolat.	15	500.00	48.17
	Platzbedarf	30		
	Wärmeverteilung			
	Niedertemp. 50/40 Grad (Installation + Planung)	30	5'840.00	379.90
	Warmwasserbereitung			
	im Kessel integriert	15		
	Montage/Einregulierung	15	2'500.00	240.86
	Elektriker komplett	15	800.00	77.07
	Zuluft-/Abluft-System			
	Monobloc	15	5'000.00	481.71
	Zuluft-/Abluftkanäle	30	8'000.00	520.41
	Total Kapitalkosten		38'380.00	3'048.96
Betriebskosten	(gemäss Erdölvereinigung)			Kosten Fr.
	Service			360.00
	Reinigung, Kaminfeger			120.00
	Kontrolle			60.00
	Tankrevision			70.00
	Versicherung			
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			610.00
Energiekosten		Menge	Preis Fr.	Kosten
	Elektrizität	kWh		
	Niedertarif		0.10	
	Hilfsenergie	200		20.00
	Hochtarif		0.25	
	Hilfsenergie	200		50.00
	Elektroboiler im Sommer			
	Niedertarif		0.10	
	Warmwasser (eta=0.7)	1807		180.70
	Heizöl	Liter	Fr./Liter	Fr.
	Heizung (eta=0.85)	836	0.33	275.88
	Warmwasser (eta=0.8)	158		52.14
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Energiekosten			578.72
Jahreskosten exkl. Mwst.			38'380.00	4'237.68
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				1188.72
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				12.92
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				46.31

10.4.2 Kostenzusammenstellung für Luft/Wasser-WP-Heizung mit Abluft-Wärmepumpe zur Wassererwärmung

L/W/4.6/A-WP	**Luft/Wasser-WP mit 4.6 kWth (bei L-7/W35)** **+ Abluft-WP-Wassererwärmer**			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität
Zinssatz	5.0%	Jahre	Fr.	Fr.
	Wärmequelle			
	Bauarbeiten	30	500.00	32.53
	Zu-, Abluftschläuche	15	800.00	77.07
	Wärmeerzeugung			
	Wärmepumpe inkl. Regler	15	10'350.00	997.14
	Montage der WP	15	990.00	95.38
		15		
	Einregulierung	15	450.00	43.35
		15		
	Planungsanteil	30	500.00	32.53
	Anschlussgebühren			
	Elektriker komplett	30	800.00	52.04
	Wärmeverteilung			
	Niedrigtemp. 30/25 Grad (Installation + Planung)	30	9'470.00	616.04
	Warmwasseraufbereitung			
	Abluft-WP-Wassererw.	15	4'660.00	448.96
	Kanäle, Schalldämpfer	30	1'430.00	93.02
	Mauerventile (6 Stück)	15	1'035.00	99.71
	Montage+Inbetriebnahme	15	3'200.00	308.30
	Planungsanteil	30	500.00	32.53
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		**34'685.00**	**2'928.59**
Betriebskosten				Kosten
				Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			**150.00**
Energiekosten	**174 MJ/m2a Heizenergiebed.**	Menge	Preis	Kosten
	62 MJ/m2a Warmwasserbed.	kWh	Fr./kWh	Fr.
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil		0.10	
	3.5 JAZ der Wärmepumpe	771		80.23
	Zusatzheizung			
	2.5 JAZ der Abluft-WP	385		40.02
	Hilfsenergie	56		5.81
	0.62 Hochtarifanteil		0.16	
	3.5 JAZ der Wärmepumpe	1259		200.12
	2.5 JAZ der Abluft-WP	628		99.83
	Hilfsenergie	91		14.49
	Teuerung/Fixkosten			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Zahlergebühr			57.60
	Total Energiekosten			**498.09**
Jahreskosten exkl. Mwst.			**34'685.00**	**3'576.69**
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				-55.08
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				648.09
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				7.04
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				39.09

10.4.3 Kostenzusammenstellung Gasheizung mit Beistellboiler und Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem (WRG)

Gas/B-B mit WT	**Gaskessel atmosphärisch 13 kW mit Beistellboiler mit Zuluft/Abluft-Wärmetauschersystem**			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität
Zinssatz	5.0%	Jahre	Fr.	Fr.
	Zuluft-/Abluft-System			
	Monobloc	15	5'000.00	481.71
	Zuluft-/Abluftkanäle	30	8'000.00	520.41
	Wärmeerzeugung			
	Gaskessel	15	2'860.00	275.54
	Heizungsregelung	15	1'030.00	99.23
	Hydraulisches Zubehör	15	1'170.00	112.72
	Montage	15	1'000.00	96.34
	Inbetriebnahme	15	300.00	28.90
	Dachkamin komplett	30	1'000.00	65.05
	Gasleitung im Haus	30	1'500.00	97.58
	Anschlussgebühr	30	3'000.00	195.15
	Wärmeverteilung			
	Niedertemp. 50/40 Grad (Installation +Planung))	30	5'840.00	379.90
	Warmwasseraufbereitung			
	Beistellboiler 300 l	15	2'100.00	202.32
	Platzbedarf	30		
	Elektriker komplett	30	1'500.00	97.58
	Montage/Einregulierung	30	2'500.00	162.63
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		36'800.00	2'815.07
Betriebskosten				Kosten Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			400.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			400.00
Energiekosten	**174 MJ/m2a Heizenergiebed.**	Menge	Preis	Kosten
	62 MJ/m2a Warmwasserbed.	kWh	Fr./kWh	Fr.
	Elektrizität			
	Niedertarif		0.10	
	Hilfsenergie	200		20.00
	Hochtarif		0.25	
	Hilfsenergie	200		50.00
	Teuerung		0.25	
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		3.18
	Gasverbrauch	kWh	Fr./kWh	Fr.
	Heizung (eta=0.9)	7894	0.054	426.30
	Warmwasser (0.8)	3165		170.89
	Total Energiekosten			670.37
Jahreskosten exkl. Mwst.			36'800.00	3'885.44
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				-29.35
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				1070.37
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				11.63
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				42.46

10.4.4 Kostenzusammenstellung Holzheizung mit Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem Eco Confort (WRG)

Holzofen/WT	**Schwedenofen zentral mit Zuluft/Abluft-System Eco Confort**			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität
Zinssatz	5.0%	Jahre	Fr.	Fr.
	Wärmequelle			
	Bauarbeiten	30	300.00	19.52
	Erdregister	30	1'200.00	78.06
	Wärmeerzeugung			
	Schwedenofen	15	5'500.00	529.88
	Kamin	15	4'000.00	385.37
	Hydraulisches Zubehör	15		
	Montage+Inbetriebnahme	15	1'000.00	96.34
	Lüftungssystem Eco Confort			
	Monobloc	15	5'000.00	481.71
	Luftführungen komplett	30	8'000.00	520.41
	Elektriker	30	800.00	52.04
	Wärmeverteilung			
	Warmwasseraufbereitung			
	Elektro-Boiler komplett	15	2'500.00	240.86
	(inkl. Sanitäranschluss)	30		
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		**28'300.00**	**2'404.19**
Betriebskosten				Kosten
				Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Kaminfeger			80.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			**230.00**
Energiekosten	**114 MJ/m2a Heizenergiebed.**	Menge	Preis	Kosten
	62 MJ/m2a Warmwasserbed.	kWh	Fr./kWh	Fr.
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil		0.10	
	85 MJ/m2a Lüftungsverlust			
	6 ETV des L-Systems	154		16.00
	0.7 eta des Elektroboiler	3617		376.13
	Hilfsenergie			
	0.62 Hochtarifanteil		0.25	
	6 ETV des L-Systems	481		120.25
	Zusatzheizung			
	Hilfsenergie			
	Holz	Ster	Fr./Ster	Fr.
	Verbrauch	3.4	100.00	344.81
	Total Energiekosten			**857.21**
Jahreskosten exkl. Mwst.			**28'300.00**	**3'491.40**
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				-62.19
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				1087.21
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				11.82
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				38.16

10.4.5 Kostenzusammenstellung Luft/Luft-Kombigerät für Heizung, Lüftung und Wassererwärmung im Passivhaus

L/L-WRG Kombigerät	**Passivhaus mit Lüftungsgerät Drexel Aerex mit Klein-WP für die Zuluft- und Wassererwärmung in einem Beistellboiler**			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität
Zinssatz	5.0%	Jahre	Fr.	Fr.
	Wärmequelle			
	Bauarbeiten	30		
	Erdregister	30	2'868.00	186.57
	Ansaugstutzen	30	1'043.00	67.85
	Wärmeerzeugung			
	Kompakteinheit	15	14'100.00	1'358.43
	inkl. Heizungsregelung			
	inkl. hydraul. Zubehör			
	inkl. Montage			
	Platzbedarf	30		
	Anschlussgebühren			
	Elektriker	30	500.00	32.53
	Wärmeverteilung über Luftkanäle			
	Material + Installation	30	11'500.00	748.09
	Planung	30	1'000.00	65.05
	Warmwasseraufbereitung			
	über Aerex-Wärmepumpe			
	Beistellboiler	30	1'000.00	65.05
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		32'011.00	2'523.56
Betriebskosten				Kosten
				Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			150.00
Energiekosten	**43.2 MJ/m2a Heizwärmebed.**	Menge	Preis	Kosten
	76.88 MJ/m2a Warmwasserbed.	kWh	Fr./kWh	Fr.
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil		0.10	
	2.8 JAZ WP für Heizen	239.40		24.90
	Hilfsstrom Technik	116.19		12.08
	2.8 JAZ WP für Wassererwärmung	340.83		35.45
	Zusatzheizung WW	238.58		24.81
	0.62 Hochtarifanteil		0.16	
	2.8 JAZ WP für Heizen	390.60		62.11
	Hilfsstrom Technik	189.57		30.14
	2.8 JAZ WP für Wassererwärmung	556.10		57.83
	Zusatzheizung WW	389.27		40.48
		2460.55		
	Teuerung/Fixkosten			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Zählergebühr			57.60
	Total Energiekosten			345.41
Jahreskosten exkl. Mwst.			32'011.00	3'018.97
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				-101.56
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				495.41
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				5.38
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				32.99

10.4.6 Kostenzusammenstellung Sole/Wasser-WP-Heizung mit Beistellboiler und Zu-/Abluft-Wärmetauschersystem (WRG)

S/W /4.9/B-B sc Propan	**Sole/Wasser-WP 4.9 kWth (S0/W35) mit Beistellboiler und Zuluft-/Abluft-Wärmetauschersystem**			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität
Zinssatz	5.0%	Jahre	Fr.	Fr.
	Wärmequelle			
	100m Erdwärmesonde komplett	30	8'800.00	572.45
	Bauseitige Arbeiten	30	500.00	32.53
	(Mauerfräsen, Grabarbeit)			
	Wärmeerzeugung			
	Wärmepumpe inkl.	15	9'700.00	934.52
	Heizungsregelung			
	Apparate/Armat./Leit./Isol.	15	1'750.00	168.60
	Zuluft-/A			
	Monobloc	15	5'000.00	481.71
	Zuluft-/Abluftkanäle	30	8'000.00	520.41
	Wärmeverteilung			
	Niedertemp. 30/25 Grad	30	9'500.00	617.99
	(Installation + Planung)	30		
	Warmwasseraufbereitung			
	Beistellboiler komplett	15	2'100.00	202.32
	Sanitäranschluss	30	1'000.00	65.05
	Elektriker komplett	30	1'500.00	97.58
	Transport/Montage kompl.	15	1'900.00	183.05
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		**49'750.00**	**3'876.21**
Betriebskosten				Kosten
				Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			**150.00**
Energiekosten	**174 MJ/m2a Heizenergiebed.**	Menge	Preis	Kosten
	62 MJ/m2a Warmwasserbed.	kWh	Fr./kWh	Fr.
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil		0.10	
	3.1 JAZ der Wärmepumpe	1181		122.85
	Zusatzheizung			
	eta des Elektroboiler			
	Hilfsenergie	56		5.81
	0.62 Hochtarifanteil		0.16	
	3.1 JAZ der Wärmepumpe	1927		306.45
	Zusatzheizung			
	Hilfsenergie	91		14.49
	Teuerung/Fixkosten			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Zählergebühr			57.60
	Total Energiekosten			**507.20**
Jahreskosten exkl. Mwst.			**49'750.00**	**4'533.41**
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				24.64
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				657.20
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				7.14
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				49.55

10.5 Schlussbericht der Luftwechselmessungen mit der Passiv-Tracergas-Methode

(neue Seitenzahlen ab der nächsten Seite)

Ventilation measurements in two single family houses.

Passive tracer gas technique used in house 1, Grafstal house 2, Schötz

Hochschule Technik+Architektur Luzern Switzerland

Final Report 20 September 2000

pentIAQ
Analysis of IAQ and Energy

Pentiaq AB, P.O. Box 7, SE-801 02 Gävle,
ph. +46 26 66 11 99, +46 708 14 77 51, fax +46 26 10 88 01,
www.pentiaq.se, e-mail info@pentiaq.se
House of Building Research

pentIAQ
Analysis of IAQ and Energy
Pentiaq AB, P.O. Box 7, S-801 02, Sweden
ph. +46 26 66 11 99, fax +46 26 10 88 01

MEASUREMENT REPORT

Customer: Hochschule Technik+Architektur Luzern,
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw, Switzerland
Reference: Gerhard Zweifel / Patrick Keller

Subject: Ventilation measurements in two single family houses, house 1, Grafstal, and house 2, Schötz.

Measurement period : house 1: 4 November 1998 to 20 April 2000
house 2: 3 February 1999 to 4 April 2000

Table of contents:

		page
1.	Introduction of measurements	3
2.	Measurement method	4
3.	Experimental layout	5
4.	Measurement results from:	6
	- House 1, Grafstal	7
	- House 2, Schötz	11
6.	Summary and conclusions	14
7.	Description of the Pentiaq tracer gas technique	15
8.	References and publications	17

Gävle, 20 September, 2000
CarlAxel Boman/Hans Stymne

1. Introduction of measurement

This final report, presents the results from measurements of the ventilation rate in two single family houses in Switzerland. House 1 is a three storey building with basement and the house 2 is a two storey building with basement, see figures 1 and 2. The aim of the commission is to measure the distribution of ventilation air and the total air ventilation. The investigations are carried out by using Pentiaq's passive tracer gas technique.

The reported measurements were performed, during the periods 1 to 10, from November 1998 until April 2000 in house 1 and, during the periods 1 to 8, from February 1999 until April 2000 in house 2. The planed measurement period 11 in house 1 and period 9 in house 2 have been cancelled.

During the measurement campaigns, the indoor air temperature was logged by data-loggers in some rooms of the investigated houses.

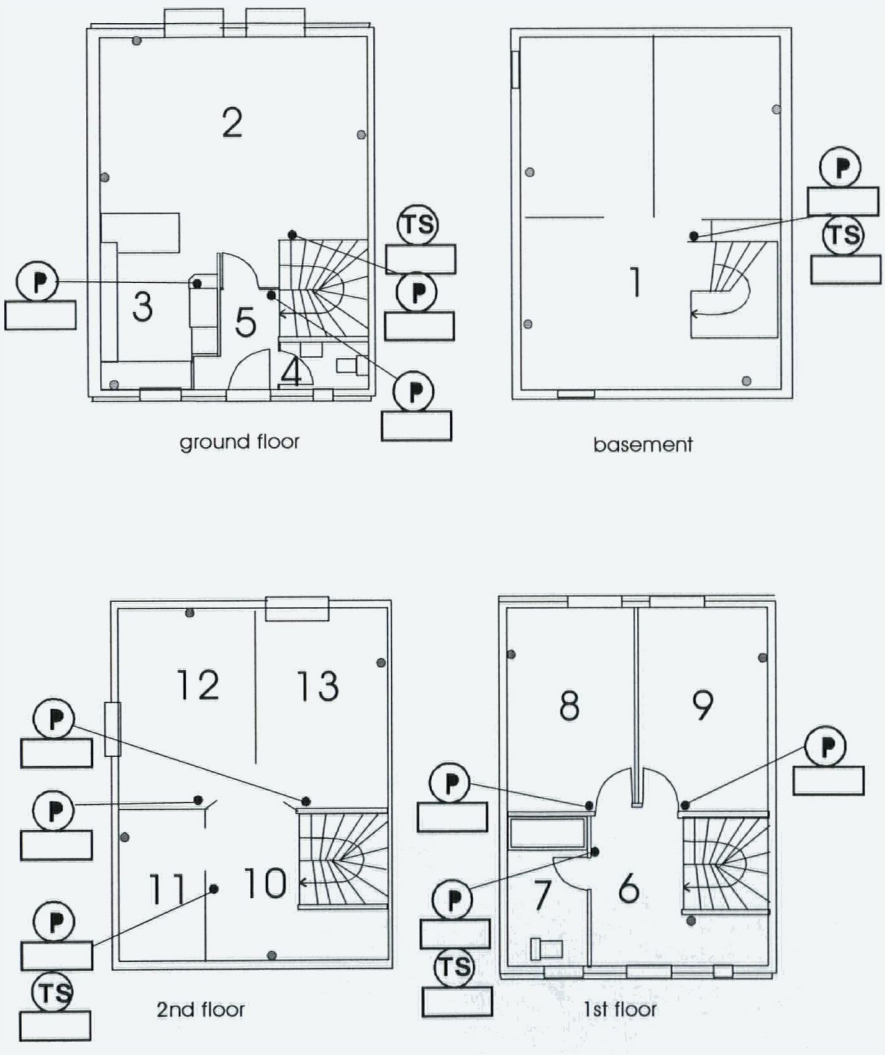


Figure 1. *Schematic plan of house 1 with measurement points design. "P"=sampler, "dots"=tracer gas sources and "TS"= temperature measurements data-logger*

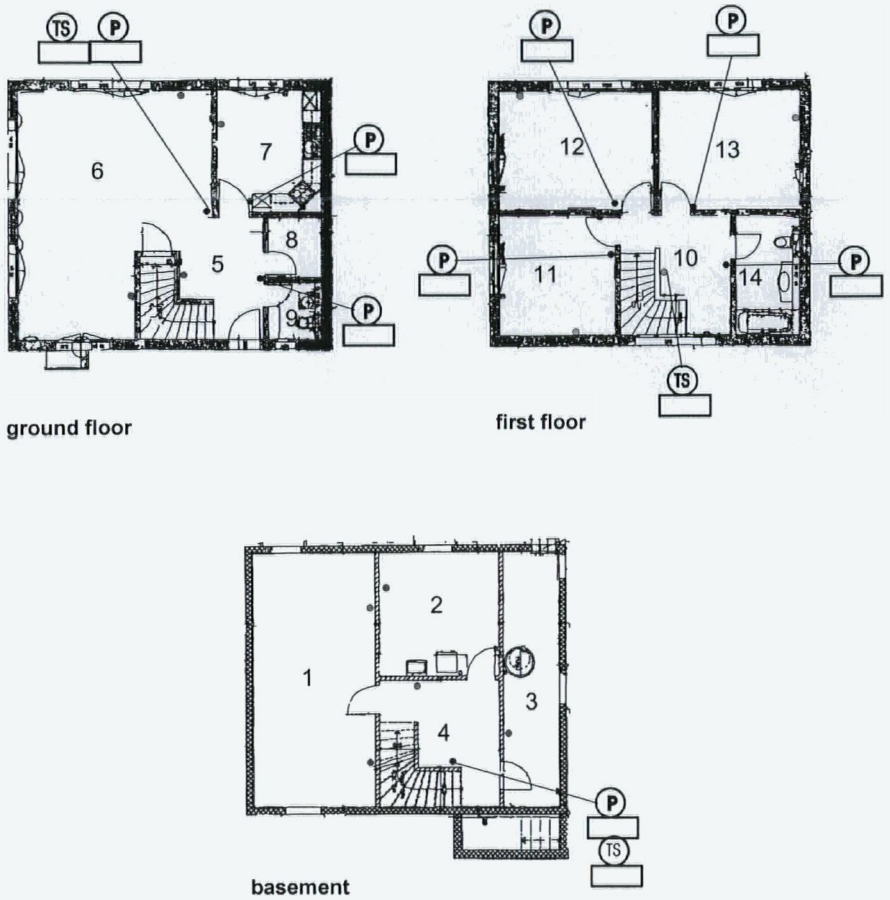


Figure 2. *Schematic plan of house 2 with measurement points design. "P"=sampler, "dots"=tracer gas sources and "TS"= temperature measurements data-logger*

2. Measurement method

The ventilation measurements are performed using a passive tracer gas technique, which is characterised among other things, by the fact that the amount of supplied ambient air to different spaces can be measured in a part of or in a whole building. The measurement period can vary from a few days to several months, depending on the aim of the investigation. The result is expressed as the average supply rate of ambient air during the measurement period. The method can tell how well a specific point in the building space is ventilated from the available air supply. The modern way to express this is using the concept "local mean age of air" (τ [h]), or alternatively as the room specific ventilation flow rate*. Generally speaking, the younger the air is, the cleaner is the air and the older the air is, the more contaminated is it. The local mean age of air is the prime quantity obtained with the passive tracer gas technique.

*Concept explanation: The **room specific air flow rate** [h^{-1}] (dimension: number of space volumes per hour) is defined as the inverted value of the **local mean age of air** [h], which is the quantity measured with the passive tracer gas technique. The local mean age of air expresses how old the air in a point is on average. The total **specific ventilation rate** essentially corresponds to the formerly used concept "air change rate per hour" or ACH, that is the inverted value of the mean age of air. If for example the mean age of air is 2.0 hours, the ACH value is 0.5 per hour.

3. Experimental layout

A special passive tracer gas technique, called the homogeneous emission technique has been used in this case. This technique means that passive tracer gas sources emitting perfluorocarbons as tracer gas are distributed in the whole building volume, in such a way that the emission is as homogeneous as possible.

These measurements have been carried out by using two different types of tracer gas, type A and B. This arrangement makes it possible to calculate the air flows between storeys and in- and outlet of air from each part of the house. In general, in this investigation the 1st and 2nd floor in house 1 and the 1st floor in house 2, were equipped with tracer gas sources, type A. The basements and the ground floor in each house were equipped with tracer gas sources, type B. The basement of the houses has been considered as a separate part of the house. The rest of each house has been divided into 2 zones with the ground floor as zone B and the upper floor(s) as zone A. The reason of this arrangement is that the measurements have shown that there is a very small flow of air between the basement and the rest of the house and v.v. This fact is valid for both the houses.

Table 1. *Types of tracer gas which have been used and dividing up of zones.*

house	storey	type of tracer gas	type of calculation
house 1	2nd floor	A	2-zone
	1st floor	A	2-zone
	ground floor	B	2-zone
	basement	B	single zone
house 2	1st floor	A	2-zone
	ground floor	B	2-zone
	basement	B	single zone

The room spaces were equipped with tracer gas sources and the tracer gas is diffusing out from each source with a constant rate and will be mixed into the room air. The concentration of tracer gas in the room air depends on how well the room is ventilated. A well ventilated room will obtain a lower concentration than a poor ventilated room.

The concentration of tracer gas in the room air is measured by integrating passive samplers. The positions of the samplers are shown in figures 1 and 2, respectively and at a height of 1.6-2 m above floor.

The equipment for temperature measurements were placed at the same level.

5. Measurement results

Referring to the concept explanation under section 2, the results are given as the mean age of air, τ [h] and presented as the specific flow rate [h^{-1}](ACH).

$\tau = C / (m / V)$ [hour]

where

C = average concentration of tracer gas during the measurement period, [g/m^3]

m/V = emission rate of tracer gas per m^3 space volume, [$g/h,m^3$]

$C = M/(K*T)$, [g/m^3]

where

M = accumulated amount of tracer in the sampler, [g]

K = the air sampling rate of the sampler, [m^3/h]

T = the length of the measurement period, [h]

The specific air flow rate (often called the air change rate per hour or ACH), is defined and calculated from the inverted value of the local mean age of air (τ), which is the quantity primarily obtained, using the passive tracer gas technique.

$ACH = 1/\tau$, [room volumes / hour]

In this investigation the air flows between different rooms also have been estimated, using a 2-zone model, which is made possible by using two different tracer gases.

In the two zone-approach the flow matrix Q is calculated from:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{C_{1A}}{\dot{m}_A} & \frac{C_{1B}}{\dot{m}_B} \\ \frac{C_{2A}}{\dot{m}_A} & \frac{C_{2B}}{\dot{m}_B} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & -q_{12} \\ -q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \quad [m^3/h]$$

where

C_{1A} is the average concentration of tracer gas A in zone 1 etc.

$\dot{m}_A$ and $\dot{m}_B$ are the emission rates of tracer gas A in zone 1 and tracer gas B in zone 2 respectively.

q_{12} is the air flow rate from zone 2 to zone 1 and q_{21} is the flow rate from zone 1 to zone 2.

$(q_{11} - q_{12})$ is the direct inflow of outside air into zone 1 and $(q_{22} - q_{21})$ is the corresponding flow into zone 2.

In this part of the report the measurement results from period 1 – 10 in house 1 and from period 1 – 8 in house 2 are presented in tables and figures.

House 1, Grafstal

Table 2 shows the results for the whole house 1 and the figures 3a and 3b show the specific air flow rate during the measurement periods 1 to 10 separated in figure 3a for the basement and figure 3b for the rest of the house. In table 3a and 3b the results from each room in house 1 are presented. The measurements during period 5, 6 and 7 have been exclude from the presentation because of circumstances that the analysis laboratory have no control of, see table 2.

Table 2. *Specification of results, house 1, periods 1 to 10, for the whole building.*

	the whole building												
period	measurement	enclused time		zone	τtot	ACH	Qtot	t i	air flow, [m³/h], (2-zone calc.)				com.
no	start	[h]	[day]	no	[h]	[h⁻¹]	[m³/h]	[°C]	into	down	up	out	xx)
1	1998-11-04	959	40.0	A	7.55	0.13	-	24.5	4	↓	55	27	
				B	4.40	0.23	-	24.7	51	32	↑	28	
				K	2.11	0.47	50	5.5	-	-	-	-	
2	1998-12-14	840	35.0	A	6.27	0.16	-	23.8	7	↓	79	38	3
				B	4.38	0.23	-	24.0	49	48	↑	19	
				K	1.22	0.82	87	11.4	-	-	-	-	
3	1999-01-18	911	38.0	A	6.50	0.15	-	23.6	2	↓	79	37	
				B	4.16	0.24	-	24.0	55	44	↑	20	
				K	1.00	1.00	106	8.0	-	-	-	-	
4	1999-02-25	1103	46.0	A	7.27	0.14	-	23.2	3	↓	75	24	2
				B	5.00	0.20	-	24.5	50	54	↑	29	
				K	2.54	0.39	42	10.0	-	-	-	-	1,2
5	1999-04-12	1683	70.1	A									
	samplers contaminated			B									
				K									
6	?			A									
	samplers contaminated			B									
				K									
7	1999-07-13	793	33.0	A									
	samplers not opened			B									
				K									
8	1999-12-23	959	40.0	A	4.65	0.22	-	24.3	3	↓	95	67	
				B	2.70	0.37	-	24.5	66	32	↑	2	
				K	1.65	0.61	64	12.5	-	-	-	-	
9	2000-02-01	1032	43.0	A	5.66	0.18	-	23.5	1	↓	88	59	
				B	3.43	0.29	-	23.9	58	30	↑	0	
				K	2.86	0.35	37	12.7	-	-	-	-	
10	2000-03-15	744	31.0	A	9.77	0.10	-	22.7	1	↓	54	36	
				B	6.17	0.16	-	22.6	34	20	↑	0	
				K	6.04	0.17	18	12.4	-	-	-	-	

Explanation of table head in table 2, 3a, 3b, 4, 5a and 5b:

zone no = zone A, consist of the 1st and 2nd floor.
zone B, consist of the ground floor.
zone K, consist of the basement.

τ_{tot} = the mean age of air for the zone.

ACH = the specific air flow rate (in units of room-volumes per hour [h^{-1}]) is the inverted value of the mean age of air, which is the quantity actually measured with the passive tracer gas technique. The mean age denotes the average age of air in a zone. The total specific ventilation flow rate corresponds to the commonly used concept ACH (air change rate per hour).

Qtot = ventilation flow rate, calculated from the ACH and the volume of the basement. This calculation can only be used in a single zone arrangement.

t i = measured average temperature in the zone.

air flow = calculated air flows, into, out from and between each zone. (2-zones calculation).

xx) Individual remarks:

1 the temperature has been assumed
2 the temperature measurement devices are missing
3 the sampler in room no. 9 is missing

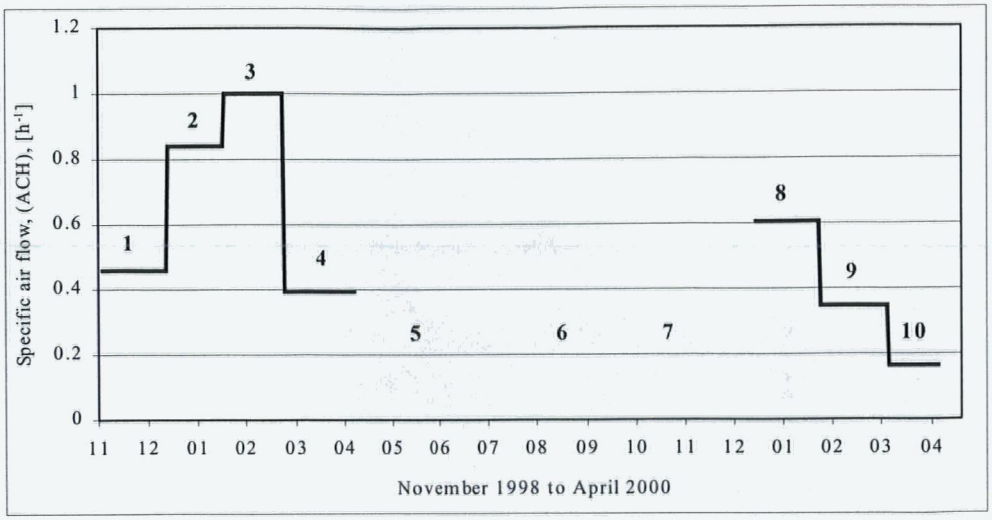


Figure 3a. *Specific ventilation flow rate, ACH, house 1, basement, during the measurement periods 1 - 10.*

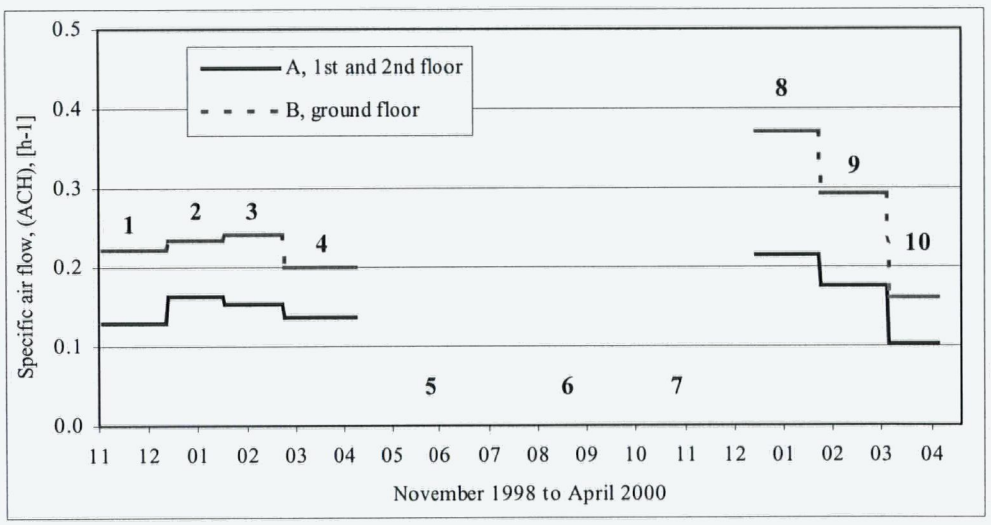


Figure 3b. *Specific ventilation flow rate, ACH, house 1, ground floor and upper floors, during the measurement periods 1 - 10.*

Table 3a. *Specific ventilation flow rate, ACH, and indoor temperature, [°C], house 1,*

	room >	1	basement		2	ground floor		3	ground floor		5	ground floor	
period no	zone no	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]
1	A												
	B				4.33	0.23	24.7	4.72	0.21		2.60	0.39	
	K	2.11	0.47	5.5									
2	A												
	B				4.49	0.22	23.8	3.94	0.25		2.74	0.36	
	K	1.22	0.82	11.4									
3	A												
	B				4.16	0.24	24.0	4.18	0.24		2.38	0.42	
	K	1.00	1.00	8.0									
4	A												
	B				5.11	0.20	24.5	4.51	0.22		3.10	0.32	
	K	2.54	0.39	(10)									
5	A												
	B												
	K												
6	A												
	B												
	K												
7	A												
	B												
	K												
8	A												
	B				2.75	0.36	24.5	2.50	0.40		1.76	0.57	
	K	1.65	0.61	12.5									
9	A												
	B				3.56	0.28	23.9	2.89	0.35		2.38	0.42	
	K	2.86	0.35	12.7									
10	A												
	B				6.10	0.16	22.1	6.45	0.15		5.13	0.20	
	K	6.04	0.17	12.4									

room 1 to 5, during measurement period 1 - 10.

Table 3b. *Specific ventilation flow rate, ACH, and indoor temperature, [°C], house 1,*

	room >	6	1st floor		8	1st floor		9	1st floor		10	2nd floor	
period no	zone no	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]	τ [h]	ACH [h -1]	t i [°C]
1	A	6.25	0.16	24.7	7.50	0.13		9.44	0.11		7.40	0.14	24.5
	B												
	K												
2	A	5.84	0.17	23.0	6.55	0.15					6.32	0.16	24.4
	B												
	K												
3	A	5.06	0.20	24.3	6.26	0.16		9.14	0.11		6.23	0.16	23.4
	B												
	K												
4	A	5.70	0.18	(23.2)	6.07	0.16		10.81	0.09		7.06	0.14	23.2
	B												
	K												
5	A												
	B												
	K												
6	A												
	B												
	K												
7	A												
	B												
	K												
8	A	3.82	0.26	24.1	5.02	0.20		5.08	0.20		4.69	0.21	24.3
	B												
	K												
9	A	5.01	0.20	23.7	6.17	0.16		5.54	0.18		5.89	0.17	23.3
	B												
	K												
10	A	8.27	0.12		10.77	0.09		11.35	0.09		8.93	0.11	22.7
	B												
	K												

rooms 6 to 10, during measurement period 1 - 10.

Indoor temperature

Figure 4 shows the measured indoor temperature in house 1 during the measurement periods 1 to 10. The basement has not been measured by datalogger not before the periods 8 to 10. The periods 5 to 7 have not at all been registrated by datalogger because of the errors of the ventilation measurements.

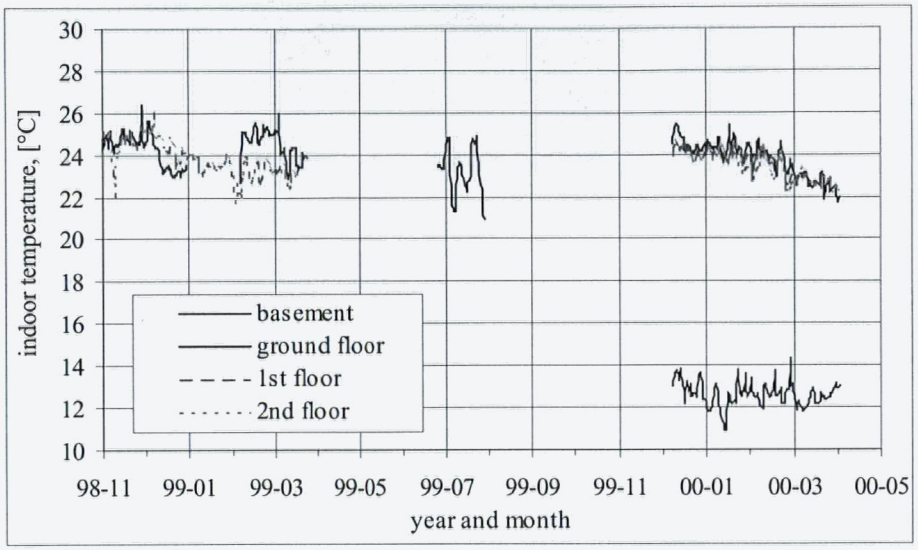


Figure 4. *Indoor temperature, (average day temperature) house 1, basement, ground floor, 1st floor and 2nd floor, measurement periods 1 to 10.*

House 2, Schötz

Table 4 shows the results for the whole house 2 and the figures 5a and 5b show the specific air flow rate during the measurement periods 1 to 8 separated in figure 5a for the basement and in figure 5b for the ground floor and 1st floor.

In tables 5a and 5b the results from each room in house 2 are presented.

Table 4. *Specification of results, house 2, periods 1 to 8, for the whole building.*

	the whole building												
period	measurement	enclused time		zone	τ_{tot}	ACH	Qtot	t inne	air flow, [m³/h], (2-zone calc.)				com.
no	start	[h]	[day]	no	[h]	[h^{-1}]	[m³/h]	[°C]	into	down	up	out	xx)
1	1999-02-03	1174	48.9	A	4.21	0.24	-	22.1	22	↓	114	28	
				B	3.63	0.28	-	23.3	60	107	↑	54	
				K	1.59	0.63	98	10.0	-	-	-	-	1
2	1999-03-24	2138	89.1	A	3.28	0.30	-	23.2	38	↓	49	24	
				B	2.59	0.39	-	24.6	77	63	↑	90	
				K	1.99	0.50	78	10.0	-	-	-	-	1
3	1999-06-21	244	10.2	A	2.03	0.49	-	23.1	52	↓	75	43	
				B	1.34	0.75	-	23.8	160	84	↑	169	
				K	2.14	0.47	73	10.0	-	-	-	-	1
4	1999-07-01	764	31.8	A	1.75	0.57	-	24.0	77	↓	56	59	
				B	1.35	0.74	-	24.6	138	74	↑	156	
				K	3.01	0.33	52	10.0	-	-	-	-	1
5	1999-11-10	764	31.8	A	9.49	0.11	-	22.1	4	↓	92	28	
				B	8.14	0.12	-	23.3	30	68	↑	6	
				K	4.57	0.22	34	12.9	-	-	-	-	
6	2000-01-03	738	30.8	A	2.58	0.39	-	22.1	53	↓	84	58	
				B	2.33	0.43	-	23.1	76	78	↑	70	
				K	3.01	0.33	52	10.0	-	-	-	-	1
7	2000-02-03	569	23.7	A	3.31	0.30	-	22.5	42	↓	72	46	
				B	3.06	0.33	-	23.9	57	69	↑	53	
				K	1.69	0.59	92	12.8					
8	2000-02-27	921	38.4	A	2.47	0.40	-		41	↓	91	41	
				B	1.86	0.54	-		113	91	↑	114	1
				K	1.69	0.59	92	12.8					

xx) Individual remarks of table 4.

1 the temperature has been assumed, because of temperature measurement device has not been planed to be used, or the measurement has been unsuccessful..

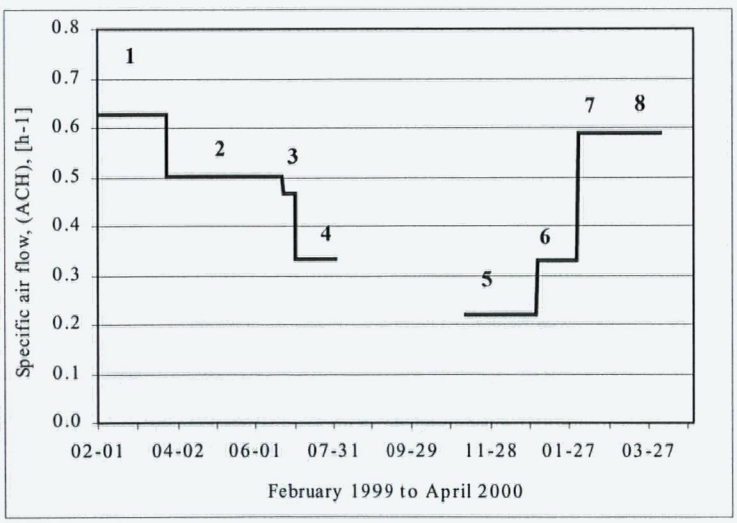


Figure 4a. *Specific ventilation flow rate, ACH, house 2, basement, during the measurement periods 1 - 8.*

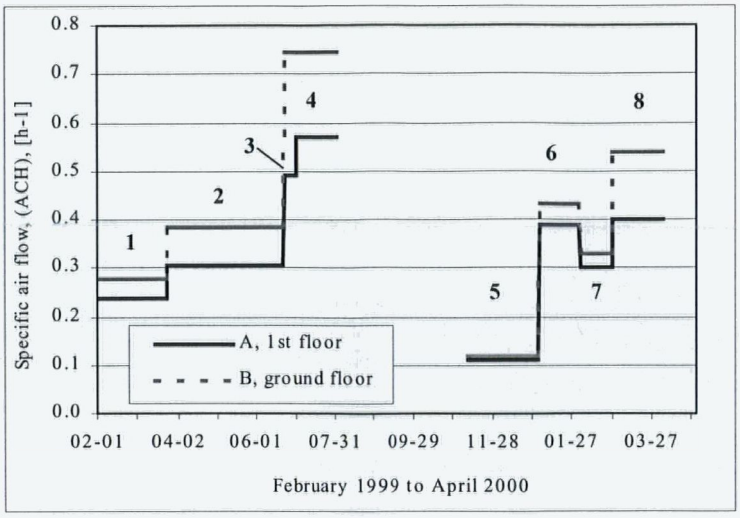


Figure 4b. *Specific ventilation flow rate, ACH, house 2, ground floor and the 1st floor, during the measurement periods 1 - 8.*

Table 5a. *Specific ventilation flow rate, ACH, and indoor temperature, [°C], house 2, rooms 4 to 7, during measurement periods 1 - 8.*

	room >	4	basement		5	ground floor		6	ground floor		7	ground floor	
period	zone	τ	ACH	t i	τ	ACH	t i	τ	ACH	t i	τ	ACH	t i
no	no	[h]	[h -1]	[°C]	[h]	[h -1]	[°C]	[h]	[h -1]	[°C]	[h]	[h -1]	[°C]
1	**A**												
	B				3.93	0.25		3.50	0.29	23.3	3.66	0.27	
	K	1.59	0.63	10.0									
2	**A**												
	B				2.44	0.41		2.58	0.39	24.6	2.79	0.36	
	K	1.99	0.50	10.0									
3	**A**												
	B				1.42	0.70		1.26	0.79	23.8	1.48	0.68	
	K	2.14	0.47	10.0									
4	**A**												
	B				1.27	0.79		1.36	0.73	24.6	1.38	0.72	
	K	3.01	0.33	10.0									
5	**A**												
	B				3.88	0.26		8.84	0.11	23.3	11.03	0.09	
	K	4.57	0.22	12.9									
6	**A**												
	B				2.05	0.49		2.39	0.42	23.6	2.46	0.41	
	K	1.92	0.52	(13.0)									
7	**A**												
	B				3.00	0.33		3.00	0.33	23.9	3.31	0.30	
	K	1.69	0.59	12.8									
8	**A**												
	B				2.05	0.49		1.74	0.58	22.2	2.04	0.49	
	K	1.69	0.59	12.8									

Table 5b. *Specific ventilation flow rate, ACH, and indoor temperature, [°C], house 2, rooms 10 to 13, during measurement periods 1 - 8.*

	room >	10	1st floor		11	1st floor		12	1st floor		13	1st floor	
period	zone	τ	ACH	t i	τ	ACH	t i	τ	ACH	t i	τ	ACH	t i
no	no	[h]	[h^{-1}]	[°C]	[h]	[h^{-1}]	[°C]	[h]	[h^{-1}]	[°C]	[h]	[h^{-1}]	[°C]
1	A	4.25	0.24	22.1	4.42	0.23		4.02	0.25		4.22	0.24	
	B												
	K												
2	A	3.28	0.30	23.2	3.45	0.29		3.28	0.31		3.14	0.32	
	B												
	K												
3	A	1.96	0.51	23.1	2.11	0.47		2.14	0.47		1.91	0.52	
	B												
	K												
4	A	1.54	0.65	24.0	2.10	0.48		1.63	0.61		1.76	0.57	
	B												
	K												
5	A	12.46	0.08	22.1	9.00	0.11		11.41	0.09		5.45	0.18	
	B												
	K												
6	A	2.65	0.38	22.5	2.28	0.44		2.68	0.37		2.68	0.37	
	B												
	K												
7	A	3.31	0.30	22.50	2.51	0.40		3.44	0.29		3.83	0.26	
	B												
	K												
8	A	2.23	0.45	22.20	1.88	0.53		3.15	0.32		2.40	0.42	
	B												
	K												

Indoor temperature

Figure 5 shows the measured indoor temperature in house 2.

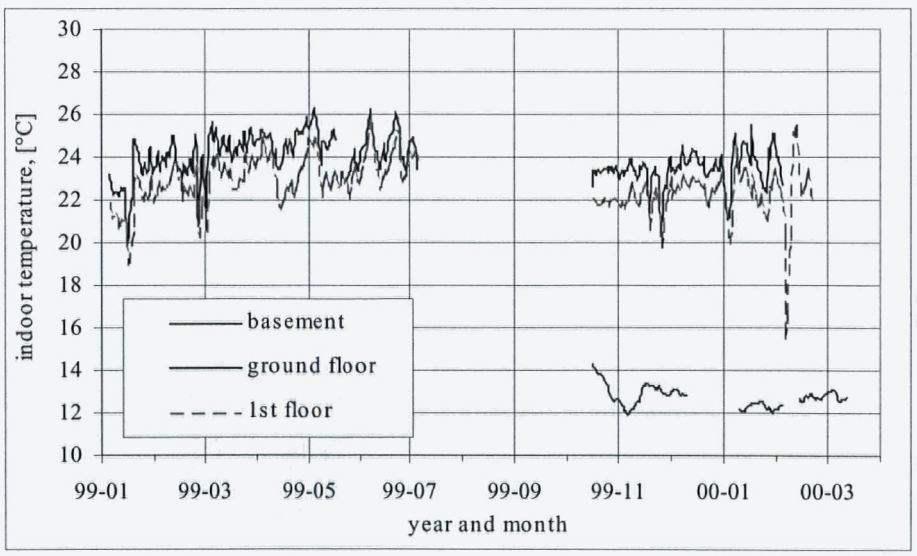


Figure 5. *Indoor temperature, (average day temperature) house 2, ground floor and 1st floor, periods 1 to 8.*

6. Summary and conclusions

House 1.

The ventilation rate in house 1 seems to be rather poor, especially at the 1:st and 2:nd floor, while the ground-floor is somewhat better ventilated. The ventilation varies somewhat being the highest during December – February and during January – February, 2000. The basement shows a similar variation with season, but here there is a radical increase in ventilation rate during December – February, 1999 but not so radical during January – February, 2000.

House 2.

The living space shows a dramatic increase in ventilation rate during the spring and summer. However, the basement shows a similar drastic decrease in ventilation rate during the same period. A similar pattern of the ventilation rate can be seen for the periods during the end of 1999 and the beginning of 2000. However the temperature in the basement is not known, which introduces an uncertainty. An average temperature of 10 °C was assumed in the basement during all measurement periods 1 - 4, 1999.

7. Description and accuracy of the PFT-homogeneous emission technique. The method of Pentiaq.

Introduction

The local mean age of air (τ_p) is a quantity, which tells us how long the air surrounding a point in space in average has spent indoors, since it entered the building. It is thus a statistical quantity, connected to the time required to exchange the "old air" with "fresh" outside air. Well ventilated spaces have short mean ages of air, while poorer ventilated spaces have longer mean ages of air. In a building where the contamination sources are "homogeneously" distributed (that is have equal strength per volume unit in the whole building), the local contaminant concentration is directly proportional to the local mean age of air. The local mean age of air is therefore a suitable air quality indicator.

The mean age of air has a close connection to "classical" ventilation quantities such as *Specific Ventilation Flow Rate*, often known as *"Air Change Rate per hour"* (ACH). The mean age of air leaving a building (τ_n) is equal to the inverse of the *Specific Ventilation Flow Rate.*

When it comes to local ventilation quantities, the specific ventilation flow rate (ACH) is not defined, because it is based on the rate of inflow of outside air divided by the ventilated volume. A local volume has no inflow of "fresh air" - all air flowing through a local volume is more or less "old" unless it is an "isolated" volume, with only supply from the outside and no inflow of "old" air from the rest of the building. However, the mean age of air is well defined also locally.

Homogeneous emission technique

Determination of the local mean age of air using the *homogeneous emission technique* relies on the fact that the local steady state concentration of a tracer compound which is homogeneously emitted in a space is directly proportional to the local mean age of air. Homogeneous emission means that the tracer source is continuously distributed in the building with equal emission rate per volume unit everywhere. Ideal homogeneous emission of a tracer gas is of course not possible. Instead the ventilated system must be sub-divided into a number of smaller zones, in each of which tracer gas is injected at a rate, which is proportional to the zone volume. Air movement creates a more or less uniform concentration in a zone. The smaller the zones, the more closely is the homogeneous emission approximated.

The basic principle of the homogeneous emission tracer gas technique as used by Pentiaq is therefore to inject tracer gas at a constant rate in all parts of a zone divided building, using "passive" tracer gas sources, in such a way that the tracer injection rate in each zone is proportional to the zone volumes. The local steady state concentration will be equal to the tracer injection rate per volume multiplied with the local mean age of air. Therefore the local mean age of air can be obtained from a measured local tracer concentration.

Passive tracer gas sources

The tracer gas source is a miniature container with liquid tracer compound from which tracer gas is released at a known constant rate, through diffusion through a narrow capillary tube. With adjustable passive tracer gas sources it is possible to adjust the emission rate, to fit the volumes of the room.

Samplers

To measure the time averaged concentration of the tracer gas in different parts of the building an integrating sampling is performed, using diffusive samplers.

A diffusive sampler consists of a tube, open at one end with a well defined opening area and packed with adsorption material (activated carbon) at a well defined distance from the opening. The mass flow rate of tracer into the adsorbent, where it is retained, is determined by the "equivalent air sampling rate" (κ) multiplied by the tracer concentration at the opening.

Analysis of samplers

In the laboratory process the amount (M_p) of tracer compound in the samplers is analyzed, using gas chromatography and the average tracer concentration (C_p) evaluated from the air sampling rate (κ) and the measurement time (T).

$$C_p = \frac{M_p}{\kappa \cdot T}$$

Expression of results

Local mean age of air

The local mean age of air (τ [h]) is computed from the tracer concentration (C_p) measured by the air sampler in a zone:

$$\tau_p = \frac{C_p}{(E/V)}$$, where (E / V) is the homogeneous emission rate of tracer gas [g/h,m³]

The local mean ages of air in the different zones are the primary results of the test. However, there are a number of secondary or deduced quantities that might be recorded as test results. Among these are:

- The room-specific ventilation flow rate [h^{-1}]
- The average mean age of air [h]
- The nominal time constant [h]
- The air exchange efficiency
- The local air exchange indices
- Specific ventilation flow rate (ACH) [h^{-1}]
- The total ventilation flow rate [m^3/h]

Uncertainties and quality of the method

Below some measures of the quality of the method are discussed:

Validity: Degree of correlation between the measured quantity and the parameter of interest.

Provided that the air in each zone is fully mixed and that the emission of tracer gas is homogeneous, the time average of the concentration is theoretically equal to the product of the emission rate per volume unit and the local mean age of air.

There often is an interest to know the specific flow rate (ACH) and the total flow rate in a building. Those quantities can however only be exactly calculated from measured local mean ages of air under special conditions, but good approximations can be made in most cases.

Repeatability: Degree of consistency of the test with itself, *i. e.* the extent to which one can assume that it will yield the same result if repeated a second time.

The degree of repeatability is composed of the uncertainty in the emission rate of the tracer gas sources (approx. **5%**), the uncertainty in the equivalent air sampling rate (approx. **5%**) and the uncertainty of the analysis (approx. **3%**). Those uncertainties are essentially un-correlated and their squares can therefore be added to yield the square of the expected deviation of a single measurement from the mean of many measurements made under exactly the same circumstances.

$$s = \sqrt{s_{source}^2 + s_{sampl}^2 + s_{analys}^2}$$

A single measurement should therefore be repeatable to within approx. 8%. By using several tracer gas sources and samplers the reliability improves.

Reproducibility: Degree to which the application of the same method will yield the same result a second time using for example different equipment, laboratory and personnel.

The degree of possibility to reproduce a measurement is primarily depending on matters left for personal judgement when the test is performed. There are a few such matters in the field work : definition of "the ventilated system" , sub-division into zones, positioning of tracer gas sources and samplers, treatment of sources and samplers (contamination) etc. . The reproducibility improves considerably if detailed instructions are available and if as much as possible of the matters of judgement stays at the supplier of the measurement equipment.

Other factors influencing the reproducibility are the circumstances in the laboratory delivering the equipment and performing the analysis. The reproducibility in the manufacture of tracer gas sources and samplers, the treatment of samples and maintenance of the analysis equipment as well as good routines are essential. It is important that the laboratory has a continuous quality assurance program and performs regular calibrations.

The precision including the repeatability and reproducibility is within 10% .

Accuracy: Degree to which the measured quantity agree with the true value.

The accuracy is mainly depending on the calibration of the equipment. Due to the difficulties to make exact calibrations of the emission rate of tracer gas sources, the equivalent air sampling rate of the samplers and the analysis equipment, there will always remain some systematic errors in the calibration constants. These systematic errors will probably yield less than 5% deviation from the true value. The risk of systematic errors increases considerably if the circumstances in the measurement are outside the interval within which the calibrations are performed (e. g. measurement time, tracer concentration or analysed amounts).

Note: Pentiaq is continuously performing studies of the quality of the measurements.

8. References and publications

Böck O, Kofoed P, Borth J, Stymne H & Sandberg M, 1994. " Einsatz eines Passiv Tracing Verfahrens zur Ermittlung des Luftwechsels eines Atriums". Sultzer Infra, Winterthur, Switzerland. Conference paper 1994

Dietz R N, Goodrich R W, Cote E A & Wieser R F, 1986. "Detailed description and performance of a passive perfluorocarbon tracer system for building ventilation and air change measurement." In *Measured Air Leakage in Buildings* (Edited by H R Treschel and P L Lagus), ASTM STP 904, pp 203-264, 1968.

Etheridge, D ; Sandberg, M. 1996. "Building Ventilation Theory and Measurement". John Wiley

NTVVS 019: Buildings - Ventilation Air: Local Mean Age (edition 2, 1988)

NTVVS 105: Ventilation: Flow rate, Total Effective - by Single Zone Approximation (1994)

Sandberg M, 1984. "The multichamber theory reconsidered from the view point of air quality studies". Building and Environment **19**, 221 [1984].

Sandberg M, Blomqvist C, Mattsson M, Stymne H, 1993. "Ventilation i funktion, en handledning för konsulter och kontrollanter". Statens Institut för Byggnadsforskning, Gävle 1993.

Stymne H, Eliasson A 1991. "A new passive tracer gas technique for ventilation measurements", Proc. of 12th AIVC Conference, Canada, Vol. 3, p 1-16 (1991).

Stymne H, Sandberg M and Holmgren O, 1992. "Ventilation measurements in large premises". Proc. of Roomvent '92, vol. 2, pp 33-47, Aalborg, Denmark 1992.

Stymne H, Boman CA, Kronvall J, 1994. "Measuring Ventilation Rates in the Swedish Housing Stock". Building and Environment, Vol. 29, No. 3, pp.373-379, 1994.

Stymne H, Boman CA, 1994. "Measurement of ventilation and air distribution using the homogeneous emission technique - a validation". Healthy Buildings '94, Proc. of the 3rd International Conference, **vol. 2**, pp 539-544, Budapest, Hungary 1994.

Stymne H, 1994. "Monitoring of ventilation rate and air distribution patterns in an apartment block using the homogeneous emission technique". Joint Research Centre, Ispra, Italy, Final report Contract no. 5607-93-11 EI ISP S, 1994.

Stymne H, Blomqvist C & Sandberg M, 1994. "Determination of Local Mean Ages of Air, by the Homogeneous Injection Tracer Gas Technique". Proceedings of the 15th AIVC Conference: The Role of Ventilation, Buxton, UK, Vol. 2, pp 474-482 1994.

Stymne H, 1995. Method to determine local mean ages of air and air exchange efficiency in large buildings and buildings wirh many rooms. NORDTEST, Helsinki 1995, final report project no 1165-94

Stymne H, Boman CA, 1997. "Air distribution in an office building as measured with a passive tracer gas technique". 18th annual AIVC conference, September 1997, vol 1, pp 379-388, Athens, Greece 1997.

Stymne H, Boman CA, 1998. "The principles of a homogeneous tracer pulse technique for measurement of ventilation and air distribution in buildings". Proceedings of the 19th annual AIVC conference, September 1998, Oslo, Norway 1998.

Stymne H, Emenius G, Boman CA, 1998. "Comparison of natural and mechanical ventilation performance in similar houses". Roomvent '98, 6th International Conference on Air Disribution in Rooms, Stockholm, Sweden, June 14-17 1998.

Säteri J. O. (editor), 1991. "Development of the PFT-method in the Nordic Countries" Swedish Council for Building Research, Document D9:1991, (1991)

Öie L, Stymne H, Boman CA, Hellstrand V, 1998. "The Ventilation Rate of 344 Oslo Residences". Indoor Air 1998; 8: 190-196.