



Gratec Isolation und Einsatz eines solaren Luftsystems in einem Minergie-P Gebäude

Ausgearbeitet durch

A. Gütermann, Amena AG

.....
Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

November 2004

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Amena AG
Tösstalstrasse 12
8400 Winterthur
Tel. 052 214 14 41
Mail: amena.ag@energienetz.ch

Autor:

Andreas Gütermann

Begleitgruppe:

H. Bertschinger, P&D Verantwortlicher Programm Gebäude, EMPA/ZEN
A. Eckmanns, Bereichsleiter Gebäude, BFE

Quellenangaben (zusätzlich zum Auftragnehmer)

H.R. Stutz, Degersheim: Photos und Pläne
J. Podhradsky, Degersheim: Potos
C. Freiburghaus, Zürich: Photos
Clicon AG, Rohrschacherberg: Thermographie

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, 8600 Dübendorf (zen@empa.ch • www.empa.ch/ren)
ENET, 9320 Arbon (enet@temas.ch • www.energieforschung.ch/)



Gratec Isolation und Einsatz eines solaren Luftsystems in einem Minergie-P Gebäude

A. Gütermann

November 2003

amena, allgemeine mess- und energietechnik ag, CH-8400 Winterthur

Bundesamt für Energie (BfE), Postfach, CH-3003 Bern



Vorwort des Architekten

Wunsch der Baupartnerschaft Hehli von Dach war, ein Haus nach baubiologischen und ökologischen Grundsätzen zu erstellen und den vorbildlichen MINERGIE(P)-Standard einzuhalten. Dabei sollten Holz als Baumaterial und die Sonne als Energiespender eine zentrale Rolle spielen. Das Dachregenwasser sollte genutzt und im Notfall das Haus mit einem kleinen Holzofen geheizt werden können.

In intensiven Gesprächen sind die Rahmenbedingungen festgelegt worden: Wärmeverluste sind zu minimieren, damit die Wärme im Haus bleibt. Als Bausystem wählte man den vorfabrizierten Holzrahmenbau, welcher mit bis zu 40cm Isolationsmaterial aus Gras gedämmt wurde. Superverglasung der Fenster. Luftdichte Bauweise mit Wärmerückgewinnung aus der Lüftung. Wärmegewinne sind zu maximieren, damit gratis anfallende Wärme im Haus optimal genutzt wird. Südfassade: Grosszügig dimensionierte Fenster lassen die Wintersonne tief ins Gebäude scheinen und erwärmen die massiven Bauteile. Süddach: In solaren Luftkollektoren erwärmte Luft dient zur Warmwassererzeugung und Gebäudetemperierung. Luftdurchströmte Bauteile (Muro- und Hypokausten) speichern die Wärme und geben diese verzögert dem Haus ab. Der Solarboiler als grösste „Abwärmequelle“ steht im Badezimmer, also dort wo der grösste Wärmebedarf herrscht.

Aus meiner Sicht ist die Haustechnik einfach, verständlich und funktioniert gleich sicher wie bei konventionellen Anlagen. Lob verdienen die Bauträgerschaft für die Bereitschaft, im Hausbau neue Wege zu gehen. Es war Vertrauen und engagiertes Mittun, um gemeinsam und entschlossen Neues zu erreichen. Sie haben die schwierigen Entscheide in der Planungsphase mitgetragen und „bewirtschaften“ das Haus heute optimal.

Impressum, Links und am Projekt beteiligte:

- Architekt: Hans Ruedi Stutz, 9113 Degersheim
info@architekturstutz.ch
- Planung Solarsystem: Amena AG, Andreas Gütermann, CH-8400 Winterthur
amena.ag@energienetz.ch
- Holzbau: KHG Bau AG, 9230 Flawil
info@khgbauag.ch
- Heizung/Lüftung/Kollektor: J. Podhradsky AG, 9113 Degersheim
podhradsky@dplanet.ch
- Messprojekt: Amena AG, Andreas Gütermann, CH-8400 Winterthur
amena.ag@energienetz.ch
- Bauträgerschaft: Christoph und Ursula Hehli von Dach, 9113 Degersheim
hehli_vondach@bluewin.ch

Dank

Das Objekt und die Erfolgskontrolle (Messprojekt) wurden als Pilot- und Demonstrationsprojekt durch das Bundesamt für Energie finanziell unterstützt. An dieser Stelle sei für diese Unterstützung, die zu wertvollen Erkenntnissen führte, gedankt.

Der Bauträgerschaft Familie Hehli von Dach, sei für die gewissenhafte Datenauslesung und Übermittlung sowie für die Bereitschaft, der Solarenergienutzung mit einer innovativen Anwendung ein weiteres erfolgreiches Beispiel zu liefern, gedankt.

"Gebrauchsanleitung"

Der vorliegende Schlussbericht ist ausschliesslich zur elektronischen Publikation bestimmt und steht im Internet zum "Download" zur Verfügung oder kann direkt beim Autor bezogen werden (amena.ag@energienetz.ch).

Der Bericht wird im sogenannten PDF- Format publiziert, welches speziell für den elektronischen Dokumentenaustausch entwickelt wurde. Um PDF - Dokumente zu betrachten, ist eine kleine Lesesoftware nötig. Der "Acrobat Reader" kann, falls nicht sowieso auf ihrem System vorhanden (meistens der Fall), im Internet heruntergeladen werden.

<http://www.adobe.de/products/acrobat/readstep2.html>

PDF hat den Vorteil, dass es "plattformunabhängig" auf allen Systemen läuft, ohne dass gewisse Voraussetzungen (z.B. die richtige Schriftart) vorhanden sein müssen.

PDF hat den Vorteil, dass die Dokumentgrösse bescheidener als z.B. ein .DOC – File ist, aber trotzdem alle Möglichkeiten der "Navigation" in einem Dokument bietet:

- Dokumentstruktur (Titel = sog. Lesezeichen) in separater Spalte ein- und ausblendbar mit direktem "Anklicken" der entsprechenden Dokumentstelle.
- Abbildungen, Diagramme, Tabellen und Literaturhinweise sind in Verzeichnissen am Schluss des Berichtes zusammengestellt und sowohl dort als auch durch Querverweise innerhalb des Textes "verlinkt". Man kann also durch Anklicken der entsprechenden Stellen einfach hin und wieder zurück "springen".

Es ist möglich, einzelne Seiten des Dokumentes auszudrucken. Auch der doppelseitige Druck ist möglich, falls ihr Drucker dies unterstützt. Das Dokument wurde aber speziell für die seitenweise Betrachtung am Bildschirm und die Verbreitung im Internet optimiert. Das betrifft vor allem die Bildqualität, und die anklickbaren [Querverweise](#).

Ansonsten ist der Aufbau des Dokumentes konventionell, z.B. mit Seitenzahlen und Inhaltsverzeichnis. Letzteres ist wieder "verlinkt" und erlaubt so den direkten "Sprung" zum entsprechenden Kapitel. Die Dokumentstruktur in der separaten Spalte, dem sogenannten Navigationsfenster, ist aber zu diesem Zweck das bessere und überall verfügbare Inhaltsverzeichnis.



Navigationfenster ein-/ausblenden

Will man nicht alles von vorne bis hinten durchlesen, kann man z.B. wie folgt vorgehen:

1. Die Zusammenfassung durchlesen.
2. Einzelne interessierende Themen können via die Dokumentstruktur in den Kapiteln direkt angesprungen werden. In den Kapiteln mit den Messdatenauswertungen sind die entsprechenden Beschriebe der Gebäude – oder Anlageteile wiederum durch [Querverweise](#) verlinkt.

Temperaturen werden wie folgt angegeben:

Temperaturwerte: In *Grad Celsius* (°C); 0 °C = Gefrierpunkt von Wasser

Temperaturunterschiede: In *Kelvin* (K), 0 K = absoluter Temperaturnullpunkt = - 273 °C. Das *Kelvin* ist in Technik und Wissenschaft eine für Temperaturunterschiede übliche Einheit. Als *Temperaturunterschied* entspricht 1 K exakt 1 °C

Energie wird in *Kilowattstunden* (kWh) angegeben. Die Umrechnung in *Megajoule* (MJ) ist:
1 kWh = 3,6 MJ

Inhaltsverzeichnis

(Hinweis: Das erweiterte Inhaltsverzeichnis steht unter "Ansicht", "Dokumentstruktur" zur Verfügung)

1. Zusammenfassung	8
2. Gebäude und Anlagenbeschrieb	13
2.1. Dach	15
2.2. Aussenwände (EG/OG)	15
2.3. Aussenwände und Boden UG	15
2.4. Boden UG	15
2.5. Fenster	15
2.6. Die Wärmedämmung - Gratec	16
2.6.1. Vorgeschichte	16
2.6.2. Produktion	16
2.6.3. Anwendung	16
2.7. Kollektorkonstruktion	18
2.8. Luftführung und Speicherung	22
2.8.1. Funktionsbeschrieb	24
2.8.2. Technik und Luftführung in der Gebäudestruktur	25
2.8.3. Speicherdecke	27
2.8.4. Ventilator	28
2.8.5. Pumpe	29
2.8.6. Solarboiler	30
2.8.7. Zusatzheizung	32
2.9. Warmwasserbereitung	34
2.10. Betriebsarten	35
2.10.1. Winterbetrieb (geschlossener Kreislauf)	35
2.10.2. Sommerbetrieb	35
2.10.3. Regelung	36
3. Beschreibung der Messdatenerfassung und -auswertung	38
3.1. Klimadaten	38
3.2. Anlagedaten	38
3.3. Raumtemperaturen	39
3.4. Messgenauigkeit	39
3.5. Messdatenauswertung	39

4. Energiebilanz	40
4.1. Klimavergleich	40
4.2. Beheizungs- bzw. Raumtemperaturniveau	41
4.2.1. Raumtemperaturniveau im Sommer	41
4.3. Jahres und Monatsenergiebilanzen	42
4.3.1. Energiekennzahlen	43
5. Gebäude- und Systemverhalten als Reaktion auf das Klima	44
5.1. Verhalten im Winter	44
5.1.1. Luftkreislauf	44
5.1.2. Wasserkreislauf	45
5.2. Verhalten in der Übergangszeit	46
5.2.1. Luftkreislauf	46
5.2.2. Wasserkreislauf	47
5.3. Kollektorwirkungsgrad	48
5.4. Sommerliches Temperaturverhalten	49
5.4.1. Warmwasser	51
6. Überprüfung der GRATEC-Isolation mittels Infrarotaufnahmen	52
6.1. Nordfassade Westteil	53
6.2. Nordfassade Ostteil-Eingang	54
6.3. Ostfassade	55
6.4. Südfassade Ostteil	56
6.5. Südfassade	57
6.6. Westfassade Terrasse	58
7. Wirtschaftlichkeit	59
8. Schlussfolgerungen	62
9. Anhänge	63
9.1. Abbildungsverzeichnis	63
9.2. Diagrammverzeichnis	64
9.3. Tabellenverzeichnis	64
9.4. Literaturverzeichnis	64

1. Zusammenfassung

Gebäude und Anlagenbeschrieb



Abbildung 1-1:

Südwest, Nordwest und Nordostansicht des Hauses (Baujahr 2002) an einer Südhanglage in Degersheim (Kt. St. Gallen) auf 840 M.ü.M, erstellt nach Minergie-P und nach baubiologischen Richtlinien in Holzelementbauweise

Das Dach, die Aussenwände und der Boden gegen das (betonierte) Untergeschoss, wurden mit **Gratec** wärmegeklämt. Gratec, eine in der Schweiz entwickelte und produzierte "Grasfaser", wird aus Gras gewonnen, dem durch Fermentierung die Proteine und Kohlenhydrate entzogen werden, sodass eine elastische Faser aus 100 % Cellulose zurückbleibt. Die Proteine sind Futtermittel und die Kohlenhydrate könnten in einem WKK als Biogas eingesetzt werden. Gratec wäre somit eine Isolation, die nicht nur Energie spart, sondern bei deren Produktion 2x mehr Energie frei wird, als dafür aufgewendet werden muss (leider ist das Produkt nicht mehr lieferbar)

Das **solare Luftsystem** für Warmwasser und Heizungsunterstützung ist vollflächig im, mit 70° optimal geneigten, Südwestdach (30 m²) integriert. Die Bodenhypokausten werden mit Hilfe von im Handel erhältlichen, sogenannten Elektrosteinen (KS) erstellt. Diese grossformatigen KS-Elemente weisen bereits Bohrungen auf und können so genau verlegt werden, dass widerstandsarme Luftkanäle entstehen. Damit wird eine sehr kostengünstig und in Trockenbauweise erstellte Hypokauste mit optimalen physikalischen und ökologischen Eigenschaften (KS) realisiert. Die passive Solarenergie wird durch die Hypokauste (Schiefer als Bodenbelag) und durch teilweise massive (KS) Innenwände genutzt. Die KS-Wände dienen auch als Murokausten. Zusatzheizung ist ein raumluftunabhängiger, kleiner Holzofen mit Register für den Warmwasserboiler.

Bei der **Lüftung mit Wärmerückgewinnung** sind die Zuluftkanäle direkt in die Holzelemente der Aussenwände integriert und durch den Elementbauer auch gleich (in Holz) realisiert werden. Auch die Abluftkanäle sind zu 90% innerhalb des Dämmperimeters verlegt.

Resultate des Messprojektes

Das Messprojekt wurde Ende Feb 2004 abgeschlossen und die Daten eines ganzen Jahres standen für die Auswertung zur Verfügung. In Diagramm 1-1 (unten) sind die Energieeinträge monatsweise (und aufsummiert für die Heizsaison) dargestellt.

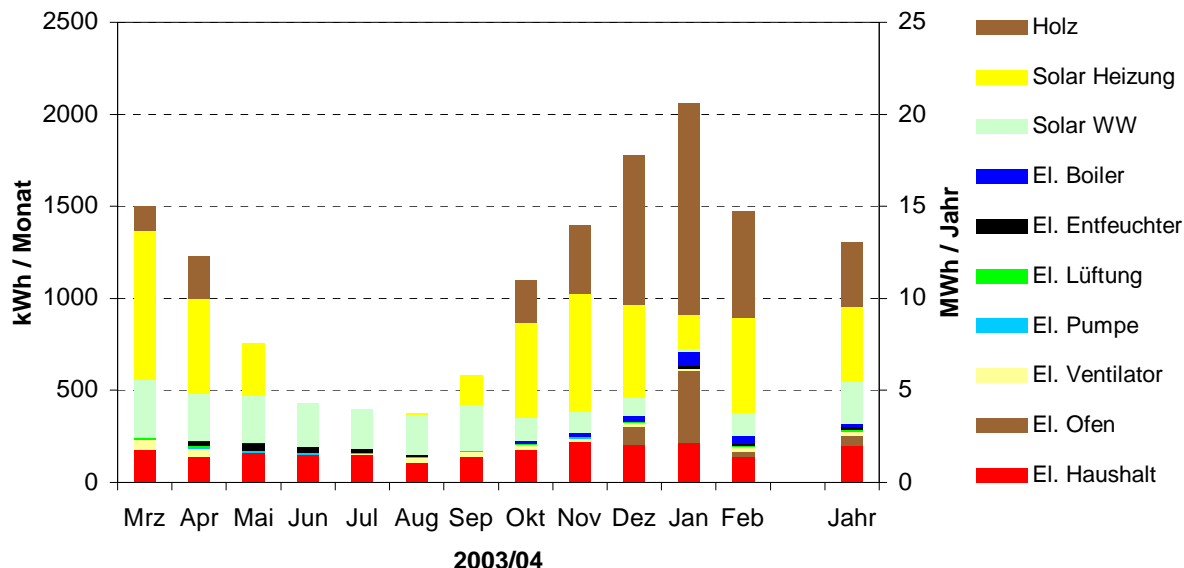


Diagramm 1-1: Energieeinträge [Dh-Monatsauswertung.xls, Energieeintrag]

Einige Feststellungen zu Diagramm 1-1:

- Die Monate November und Dezember weisen aussergewöhnlich hohe Solarerträge auf. Im Januar sind die Solarerträge klein und bei sehr kalten Aussentemperaturen, muss der kleine Holzofen fallweise durch einen kleinen, mobilen Elektroofen unterstützt werden. Februar hat wieder einen höheren Solarertrag und trotz tiefen Aussentemperaturen reicht der Holzofen aus. (Details siehe Kapitel [4](#) und [5](#)).
- Der Holzverbrauch (Heizung und Warmwasser) belief sich auf 1.6 Ster Hartholz oder 815 kg respektive 3500 kWh. Der Stromverbrauch zur Wärmeerzeugung (Raumnachheizung (500 kWh), Boilernachheizung (200 kWh), Ventilator-(250 kWh) und Pumpenstromstromverbrauch (50 kWh) beträgt gesamthaft 1000 kWh. Nach Minergie-P wird der Elektrizitätsverbrauch zur Wärmeerzeugung doppelt gewichtet, Biomasse (Holz) zur Hälfte, sodass bei einer Energiebezugsfläche von 171 m² eine "gewichtete Energiekennzahl Wärme" von 22 kWh/m². Dieser Wert liegt weit unterhalb des geforderten Planungswertes (30 kWh/m²) für Minergie-P.
- Der Elektrizitätsverbrauch liegt mit 3200 kWh trotz des gelegentlichen Elektroofeneinsatzes nur bei rund der Hälfte einer entsprechenden "Durchschnittsfamilie" (5000 kWh).
- Das solare Luftsystem liefert 6400 kWh und ist somit der weitaus grösste Energielieferant des Hauses. Vom Solarertrag entfallen $\frac{2}{3}$ auf Raumwärme und $\frac{1}{3}$ Warmwasser. Der solare Deckungsgrad (Heizung und Warmwasser) beträgt 58 %, und der spezifische Kollektorsertrag ist mit 210 kWh/m² für einen selektiven Luftkollektor in einem mässig sonnigen Klima ein guter Wert.
- Die Leistung der Warmwassererzeugung mittels Luft-Wasser-Wärmetauscher mit 2 Doppelrohrreihen im Gegenstrom ist ausreichend und in Schönwetterperioden beträgt der solare Deckungsgrad für das Warmwasser 100 %.

Unten stehendes Diagramm zeigt das Temperaturverhalten des Systems beispielhaft an einem schönen aber kalten Frühlingstag.

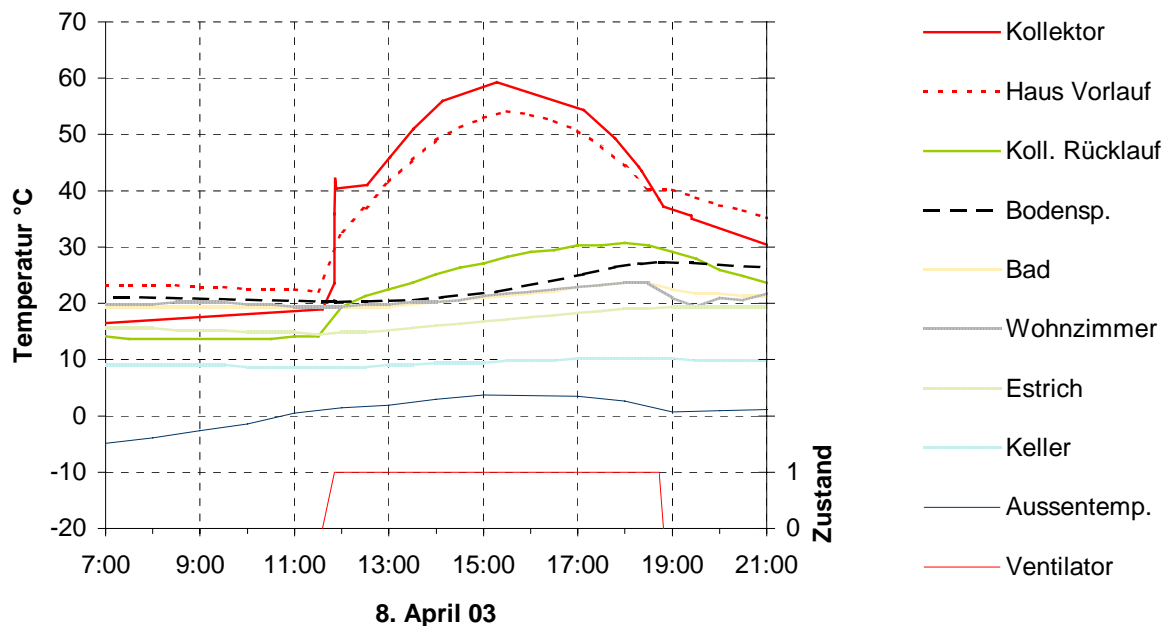


Diagramm 1-2: Systemtemperaturen eines schönen, kalten Frühlingstags [H-030408.xls, 8.3.H]

Durch die steile SW-Orientierung geht der Kollektor erst kurz vor 12 Uhr in Betrieb, läuft dann aber 7 Stunden. Trotz tiefen Aussentemperaturen um 0 °C erreichen die Kollektortemperaturen um 15 Uhr 60 °C. Beim Wärmetauscher für das Warmwasser werden 6 ° ausgekoppelt, sodass die Luft noch mit 54°C ins Haus eintritt (Haus Vorlauf). Durch die Murokausten und den Hypokaustenboden sowie wieder zurück in den Kollektor-Rücklauf werden ca. 26 K abgebaut, was bei einem Durchsatz von 1400 m³/h einer wirksamen Heizleistung von 12 kW (400 W/m²) entspricht (Momentanwert 15:00). Diese Leistung wird von den Muro- und Hypokausten aufgenommen, gespeichert und langsam wieder abgegeben (Temperaturverlauf Bodenspeicher). Ein Vergleich mit dem wesentlich grösseren (70 m²) nichtselektiven Luftkollektor beim Messprojekt Hermann in Braunwald zeigt, dass die spezifische Leistung durch Einsatz eines selektiven umströmten Absorberbleches etwa um 65 % zunimmt.

Der freie Horizont und die steile SW-Orientierung hat den Vorteil, dass der Kollektor bis Sonnenuntergang (18:45) in Betrieb ist. In den 7 Betriebsstunden erhöhte sich die Temperatur der Hypokauste (Bodenspeicher) von 20 auf 27 °C. Die Temperatur im Bad und im Wohnzimmer ist mit 24 °C schon fast "sommerlich".

Durch die Abwärme der Luftkollektoralgregate (Wärmetauscher, Ventilator) steigt auch die Temperatur des Estrichs im Laufe des Tages von 15 auf 20 °C an und bildet dadurch einen sehr effektiven Pufferraum.

Der Keller ist hingegen kalt (10 °C), was neben der natürlichen Temperaturschichtung auch am sehr hohen Wärmedämmstandart (30 cm) der darüberliegenden Decke liegt.

Bei Häusern mit sehr niederem Heizenergiebedarf wird der Verbrauch an Warmwasser, der ja unabhängig vom Isolationsstandard des Hauses ist, immer wichtiger und beeinflusst, wegen der so "produzierten" Abwärme, die Wärmebilanz und den Komfort wesentlich. Aus diesen Gründen wurde der Solarboiler direkt im Badezimmer platziert, eine Strategie, die sich schon mehrfach bewährt hat.

Im unten stehenden Diagramm sind die Temperaturwerte bezüglich Warmwasser für den gleichen Tag dargestellt (aus Gründen der Übersichtlichkeit in einem separaten Diagramm).

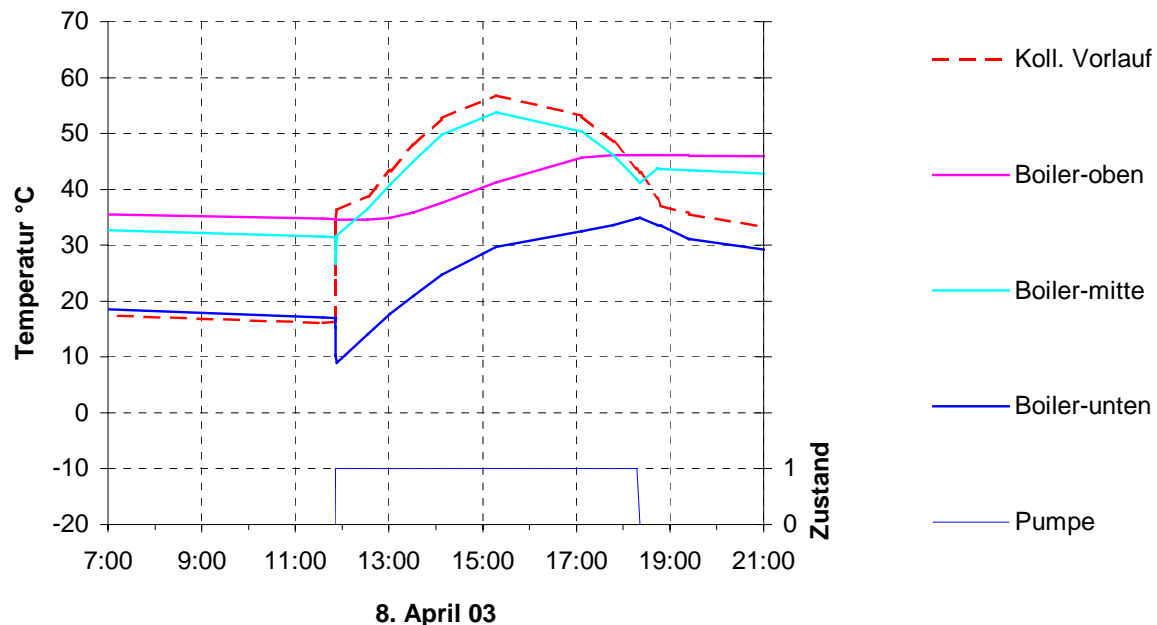


Diagramm 1-3: Temperaturverläufe der solaren Warmwassererzeugung [H0203c.xls, 27.3.WW]

Sehr gut erkennbar ist das ausgesprochen gute Schichtverhalten des Chromstahlboilers sowohl anfangs als auch ende der Ladeperiode. Auch die Einspeicherung des solar erwärmten Boilerwassers stört die Schichtung nicht, sodass die hydraulische Einbindung und der Wasserdurchsatz als optimal bezeichnet werden können.

Die Wasser-Vorlauftemperatur (Boiler-mitte) beträgt um 15 Uhr 45 °C und liegt nur 3 °K unter der Kollektor-Vorlauftemperatur.

Bei Betriebsbeginn ist ein deutlicher Temperatureinbruch im unteren Teil des Boilers erkennbar, weil dort das kalte Wasser des Leitungsinhalts zuerst ausgestossen wird. Trotzdem ist die Energiebilanz immer positiv.

Gratec

Bei der Isolation mit deorganischen, getrockneten Grasfasern konnten beim Ausblasen der Holzelemente keine ins Gewicht fallende Unterschiede zu anderen Materialien (z.B. Isofloc) festgestellt werden. Die Wirkung konnte anhand des Füllgrades beurteilt werden, indem Infrarotaufnahmen gemacht wurden. Das Produkt ist leider in der Zwischenzeit vom Markt verschwunden.

Zusatzheizung (Holzofen) und Minergie-P

Obwohl nach Minergie-P geplant, genügte das Gebäude den Anforderungen bezüglich Heizleistungsbedarf (10 W/m²) im Endergebnis nicht (Luftdichtigkeit, Fenster, Wärmebrücken), sodass schlussendlich der maximale Heizleistungsbedarf etwa 20 W/m² entsprach. Damit war auch der Holzofen zu klein und seine Eignung für Passivhäuser konnte nicht unter Beweis gestellt werden. Allerdings ist das Haus in Degersheim bezüglich Minergie-P keine Ausnahme und selbst zertifizierte Häuser zeigen im Nachhinein oft sogar noch schlechtere Werte wie eine Untersuchung des HTA Luzern 2004 belegte. Letztlich entscheidend ist aber der Energiebedarf welcher in Degersheim trotzdem deutlich unter Minergie-P liegt.

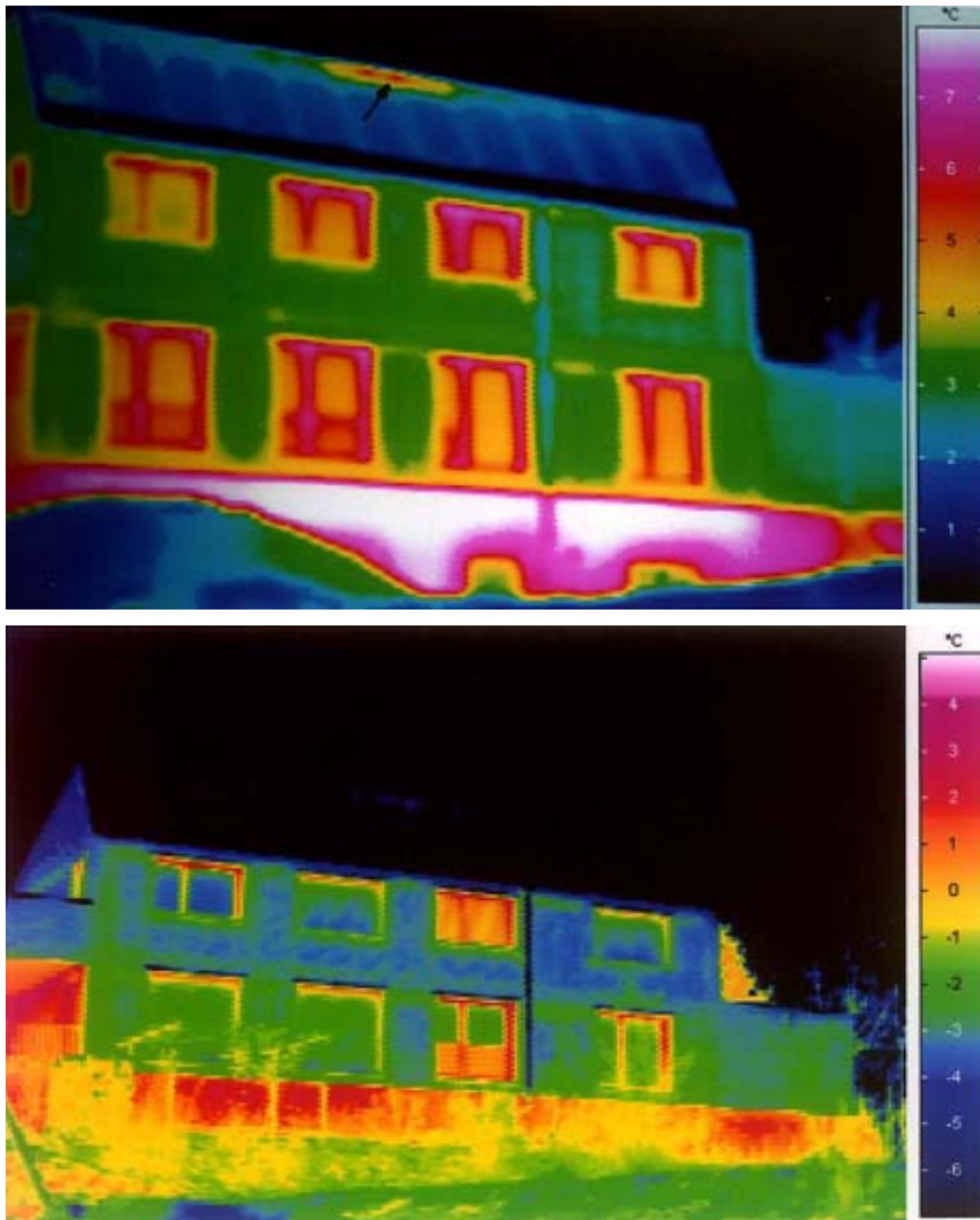


Abbildung 1-2: Infrarotaufnahmen der Südfassade bei Inbetriebnahme und 2 Jahre danach.

Die Infrarotaufnahme am 28.2.03 07:00 bei 2°C Aussentemperatur nach einer hochnebelartig bewölkten Nacht (oben) zeigt die Verteilung der Oberflächentemperaturen. Die mit Gratec gedämmten Holzelemente erscheinen in gleichmässigem Dunkelgrün, was auf eine homogen verteilte Wärmedämmung schliessen lässt. Die Wiederholung nach einem Jahr am 15.12.04 bei -6°C Aussentemperatur ebenfalls um 07:00 nach einer klaren Nacht zeigt neben den Unterschieden bei den Fenstern (geschlossene Storen) klar, dass der Füllgrad der Gratec Wärmedämmung nach wie vor gut ist.

Neben dem unisolierten Untergeschoss sind vor allem die Wärmebrücken an den Fenster-rähmen auffällig (Glasrandverbund aus Aluminium, Holzrahmen und durchlaufendes Futterbrett). Der grosse Unterschied zu den sehr stark gedämmten Flächen untermauert die Tatsache, dass bei hochisolierten Gebäuden Wärmebrücken einen relativ viel grösseren Einfluss haben als bei wenig- oder gar unisolierten Gebäuden. Details siehe Kapitel [6](#)

2. Gebäude und Anlagenbeschrieb

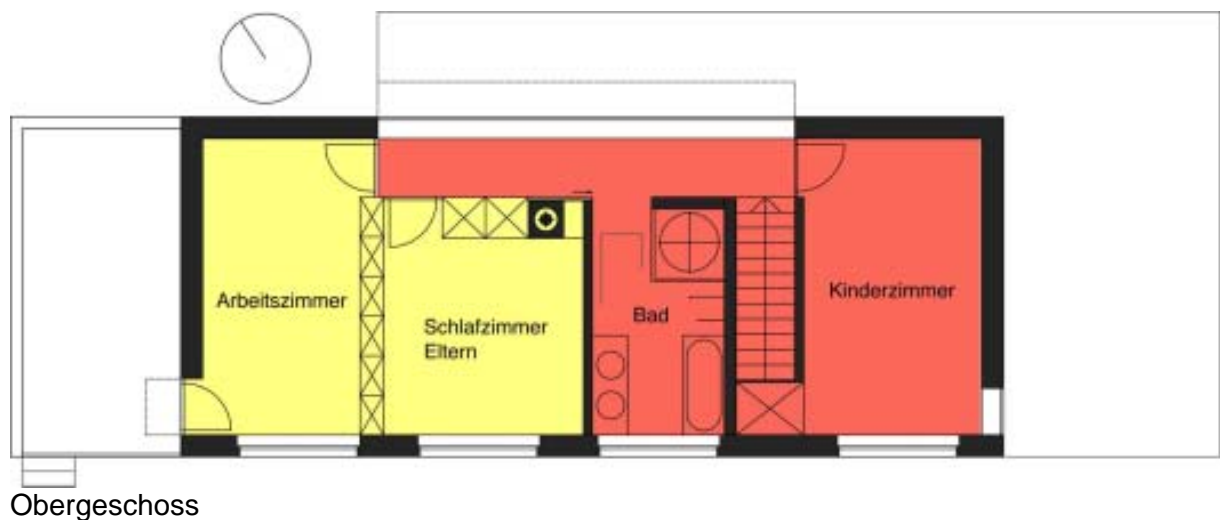
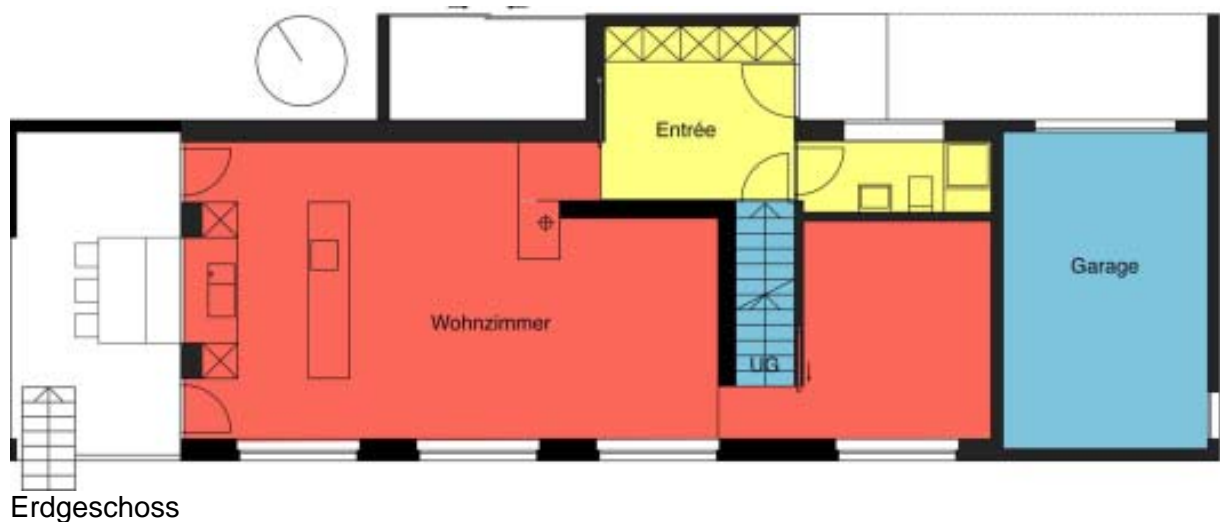
Das Einfamilienhaus verfügt über zwei Wohngeschosse und ein unbeheiztes Kellergeschoss, welches als betoniertes Sockelgeschoss seitlich auch Terrasse und Garage unterfängt. Die Aussenwände wurden in vorgefertigter Holzelementbauweise (Holzrahmenbau) nach Minergie-P-Standard erstellt und mit Fichtenschindeln beschlagen. Auffallend ist die dachvorsprungslose Ausführung und das steile, 70 ° geneigte Kollektordach. Die Dachwasserrinnen sind süd- wie nordseitig einspringend in die Konstruktion integriert.



Abbildung 2-1: Südwestansicht



Abbildung 2-2: Nordost und Nordwestansicht



- Vollbeheizte Kernzone
- Teilbeheizte Pufferzone
- Unbeheizte Pufferzone

Abbildung 2-3: Grundrisse mit Wärmezonen

Das beheizte Volumen ist kompakt ausgeführt und die Zonierung optimiert. Im Erdgeschoss ist die vollbeheizte Fläche identisch mit dem solaren Hypokaustenboden. Das Entrée kann durch eine Schiebetüre (mit Dichtungen) abgetrennt werden, sodass eine Pufferzone entsteht. Die Wand neben dem Ofen (solare Murokauste) ist gegen das Entrée isoliert (6 cm). Der kalte Keller (UG) ist vollständig abgetrennt und der Boden unter der Hypokauste mit 30 cm Gratec isoliert. Gegen die Garage sind die Wände mit 20 cm isoliert.

Der zentral positionierte, kleine Holzofen verteilt seine Wärme durch Strahlung (Wohnzimmer) und Konvektion über die Treppe ins OG (Wärme steigt).

Im Bad sorgt der Solarboiler für zusätzliche (Ab-)Wärme und ein durch den Holzofen gespeisener Handtuchradiator eine zusätzliche Beheizungsmöglichkeit in diesem sensiblen Bereich.

Alle Aufenthaltsräume sind nach Süden orientiert um von der Aussicht und der passiven Solarenergienutzung durch die Südverglasung zu profitieren.

2.1. Dach

Das Dach bildet mit dem Dachboden (Decke OG) einen luftdicht geschlossenen Raum, dessen Querschnitt ein rechtwinklig, ungleichschenkliges Dreieck bildet. Die ganze Konstruktion (inkl. Dachboden) ist Teil des Konzeptes:

- Wärmedämmung "rundum" mit 20 cm ergibt einen Gesamt-U-Wert von $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, ohne das "übertrieben" gedämmt werden musste.
- Der geschlossene Raum dient "multifunktional" als Abstellraum, Technikraum für das Solarsystem, Pufferraum mit schwankenden Temperaturen und Bypass-Kanal des Solarsystems im Sommer

Durch diesen Aufbau wurde die Isolationswirkung gegen die Sommerhitze (100°C im Kollektor, 45° im Dachraum) erhöht. Das Kollektorglas bildete gleichzeitig die Dachhaut. Im Winter sind im Süddach neben der Isolation auch noch die Pufferwirkung des Luftkollektors wirksam, was erfahrungsgemäss ([Lit. 2 - 4](#)) den Temperaturgradienten zur Aussenluft etwa halbiert. Mit andern Worten: Die Isolationswirkung ist doppelt so hoch ($= 40 \text{ cm}$) wie die tatsächlich vorhandene Isolationsstärke.

2.2. Aussenwände (EG/OG)

Vorfabrizierte Holzelemente. Beidseitig mit 3-Schicht-Platten beplankt. 30 cm Gratec - Wärmedämmung eingeblasen.

2.3. Aussenwände und Boden UG

Das UG bildet Gleichzeitig das Sockelgeschoss. Armierter Beton. Unisoliert.

2.4. Boden UG

Auf die Betonwände des UG als "Basis" für das Haus aufgelegte vorfabrizierte Holzelemente. 35 cm Gratec - Wärmedämmung eingeblasen. Da der Boden neben dem Haus auch noch die Last der Hypokauste tragen musste ergab sich die Dicke, und damit die Wärmedämmung automatisch.

2.5. Fenster

Die Fenster konnten nicht ganz in Passivhaus-Wärmedämmqualität ausgeführt werden. Die 3-fach-Verglasung mit 2 Wärmeschutzbeschichtungen und Argonfüllung wurde versehentlich mit "normalen" Aluminium-Distanzhaltern geliefert und die Rahmen sind gewöhnliche Holzrahmen ($U\text{-Wert } 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$), sodass die entsprechenden Wärmebrücken doch erheblich wurden. Daher wurde der durch den Passivhausstandard geforderte Rahmen-U-Wert ($0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$) nicht eingehalten.

2.6. Die Wärmedämmung - Gratec

Gratec ist eine in der Schweiz entwickelte und produzierte "Grasfaser". Sie wird aus normalem Grasschnitt gewonnen, wie er zur Heuproduktion in der Landwirtschaft anfällt. Durch Fermentierung werden die Proteine und Kohlenhydrate entzogen, sodass eine elastische Faser aus 100 % Zellulose zurückbleibt. Die Proteine sind Futtermittel und die Kohlenhydrate werden in einem WKK als Biogas eingesetzt. Gratec ist somit die einzige Isolation, die nicht nur Energie spart, sondern bei deren Produktion 2x mehr Energie frei wird, als dafür aufgewendet werden muss. Leider ging die Firma, welche das Verfahren entwickelte und bereits Pilotanlagen betrieb, in der Zwischenzeit Konkurs. Letzterer Umstand ist der Grund, wieso sich der vorliegende Schlussbericht mehr auf die Aspekte des Solaren Luftsystems und seiner Komponenten konzentriert.

2.6.1. Vorgeschichte

Es war nicht das primäre Ziel, Gras in Dämmstoff umzuwandeln, das Stefan Grass und seine beiden Firmenpartner, Graeme Hansen und Peter Müller 1996 anvisierten. Ihr Ehrgeiz lag in erster Linie darin, einen nachwachsenden Rohstoff zu finden, die sich in Energie umwandeln liess. Von Beginn weg wurde darauf hingearbeitet, aus allen Grasbestandteilen Produkte herzustellen, die auf dem Markt gefragt sind. Sie fanden eine Möglichkeit den Vorgang des "Wiederkäuens" (z.B. der Kühe) technisch nachzubilden, Die Zellwände der Grashalme werden mechanisch aufgetrennt und die Zellulose-Fasern separiert. In den Zellwänden sitzt das für die Kühe so wichtige Protein, das für den Menschen bis jetzt erst nach dem Wiederkäuen in Form von Milch zugänglich gewesen war.

2.6.2. Produktion

Die aufgewärmten Grashalme werden zuerst mechanisch zerkleinert und anschliessend durch einen speziellen, ebenfalls mechanischen Prozess, in ihre Bestandteile zerlegt. Aus diesem Substrat, einer suppenähnlichen Brühe, können nun der Reihe nach Fasern für Dämmmaterial, Proteine für Futter und Kohlehydrate für Biogas separiert werden. Die Zellulosefaser wird abgepresst und dann in einer Nassbehandlung mit Borat (Brand- Frass- und Fäulnisschutz) versehen, welches die Zellen der offenen Fasern gleichsam aufsaugen. Die Zellulose erhält jetzt noch einen Trocknungsprozess, bei dem sie die so wichtige dreidimensionale, spiralförmige Endform erhält. Diese Dreidimensionalität gibt, zusammen mit den unterschiedlichen Längen der Faser, jene Volumentreue, die gute Dämmstoffe auszeichnet.

2.6.3. Anwendung

Gratec wird ähnlich wie Altpapierflocken (z.B. Isofloc, Isocell, Isodan, usw.) appliziert, indem der zu füllende Hohlraum angebohrt wird (z.B. Ø 65), der Druckschlauch eingeführt und das Material mit viel Luft und hohem Druck eingeblasen und verdichtet wird. Die resultierenden Eigenschaften der Wärmedämmung sind weitgehend identisch mit den obengenannten Altpapierflocken, jedoch wird ein besseres (praktisch nicht vorhandenes) Setzungsverhalten angegeben. Dies zu überprüfen (Infrarotaufnahmen) war ein Teilaspekt des vorliegenden Projektes, welcher durchgeführt werden konnte.

Weiterführende Informationen siehe Bundesamt für Energie: "Bioenergie Schaffhausen - Biogas, Protein und Fasern aus Gras" sowie "Bioenergie, Protein & Fasern aus Gras - Monitoring des Biogasprozesses.



Abbildung 2-4: Gratec und zwei Einbringungsvarianten (Prospektauszug)

Eigenschaften	Technische Daten	Erläuterungen
Rohdichte*	25-50 kg/m ³ 30-65 kg/m ³ 30-65 kg/m ³	freiliegend raumfüllend CSO-Verfahren
Wärmeleitfähigkeit λ_R	0,040 W / (m·K)	DIN 52612
Spezifische Wärmekapazität c	2196 J/(kg·K)	SIA 381/1
Baustoffklasse	B2 in Bearbeitung	DIN 4102
Brandklasse	BKZ 5	
Wasserdampf- diffusionswiderstand μ	1-2	
Sorptionsfeuchte	14 %	DIN 52620
Normalfeuchte	ca. 8 %	
Luftdurchlässigkeit	4 m ³ /(m ² ·h) bei 50 Pa	gemessen zwischen nicht verklebten Baupappe bei 16 cm Dicke und 75 kg/m ³
Widerstand gegen Schimmelpilze	keine Pilzentwicklung	DIN IEC-2
zugelassen in Konstruktionen ohne chemischen Holzschutz		DIN 68800-2
* Die am Bau gewählte Rohdichte ist abhängig von den konstruktiven Voraussetzungen. Die konkreten Vorgaben für die setzungssichere Verdichtung erhält der verarbeitende Fachbetrieb vom Hersteller.		
Rohstoff	Naturfasern (Gras)	
Zusätze	Borsäure 3%	

Abbildung 2-5: Eigenschaften von Gratec (Prospektauszug)

2.7. Kollektorkonstruktion

Der Kollektor konnte wegen dem heiklen Transport, der noch heikleren Montage und der Lieferverzögerungen bei den Halbfabrikaten für den Luftkollektor nicht wie vorgesehen schon beim Hersteller der Holzelemente "im Werk" montiert werden. Daher soll nachfolgend auf die Ortsmontage detaillierter eingegangen werden.

Die Dachkonstruktion, die Giebelseiten sowie die Decke des Obergeschosses bestehen aus mit 20 cm wärmegeprägten Holzelementen um den Wärmeschutz des Hauses zu gewährleisten. Damit bilden sie gleichsam einen begehbaren, wärmegeprägten Technikraum, der im Sommer auch als grosser Rücklaufkanal (Bypass) für die Solarluft gebraucht wird. Somit ist das Solarsystem auch im Sommerbetrieb geschlossen, ohne das Hausklima unnötig anzuheizen.

Das Südwestdach wurde, für die Solarenergienutzung optimal, mit 70° Neigung konzipiert. Die sich dabei zwangsläufig ergebende, relativ kleine Dachfläche (30 m²) ist vollständig verglast.

Das selektive beschichtete Flachblech (Halbfabrikat aus der konventionellen Kollektorproduktion) und die doppelte Wärmeabgabefläche des sowohl über- wie unterströmten Absorbers verdoppelt annähernd die Wärmeleistung pro m² gegenüber nichtselektiven und nur überströmten Absorbern.

Die Sammel- sowie Verteilstrukturen sind in den Kollektor integriert. Dies aus Erfahrung früherer Projekte, bei denen sich die Integration in den Kollektor als optimalste Variante herausstellte.

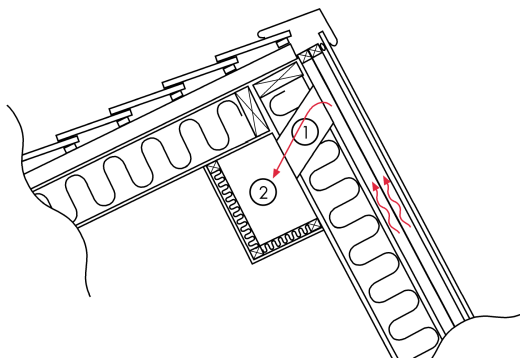


Abbildung 2-6:

Giebelbereich des Luftkollektors;
1: Absaugöffnung
2: Kurzer (2 m) Vorlaufkanal bis zur Technik-Achse (Wärmetauscher, Ventilator)

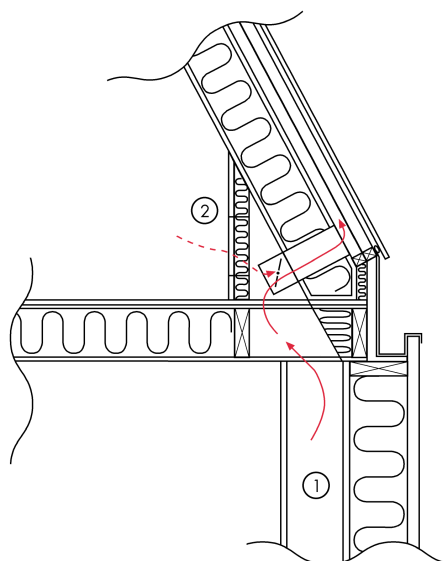


Abbildung 2-7:

Kniestockbereich des Luftkollektors;
1: Rücklaufkanal von der Hypokauste (EG)
2: Klappenabdeckung mit Servicetüre welche im Sommer geöffnet ist.

Die Südwestseite des Daches wurde wie folgt "eingedeckt":

1. gestaffelte Konterlattung gemäss Schema Abbildung 2-7.
2. Selektiv beschichtetes Aluminium-Flachblech.
3. gestaffelte Konterlattung wie 1.
4. Solarglas mit konventionellen Glashalteprofilen.

Die vertikale Stafflung der Konterlattung bezweckt eine möglichst gleichmässige Strömungsgeschwindigkeit auch im integrierten Verteil- und Sammelkanal des Kollektors, diagonal von seitlich-unten nach mittig-oben.

Das steile Südwestdach hatte eine geringe Höhe des Kollektors zur Folge, mit dem Vorteil, dass Absorber und Abdeckung "in einem Stück" also ohne Horizontalstösse verlegt werden konnten.

Beim 0,5 mm dicken, selektiv beschichteten Aluminium-Flachblech (mit Schutzfolie) handelt sich um das Produkt "Miro-Therm" der Firma Alanod welches standardmässig 1,25 m breit und in beliebigen Längen lieferbar ist.

Der Kollektor ist in zwei spiegelsymmetrische Felder aufgeteilt. Die Luft strömt durch eine mechanische Klappe ganz unten/aussen in den Kollektor, wird in der Mitte oben zentral gesammelt und dem Wärmetauscher/Ventilator zugeführt.

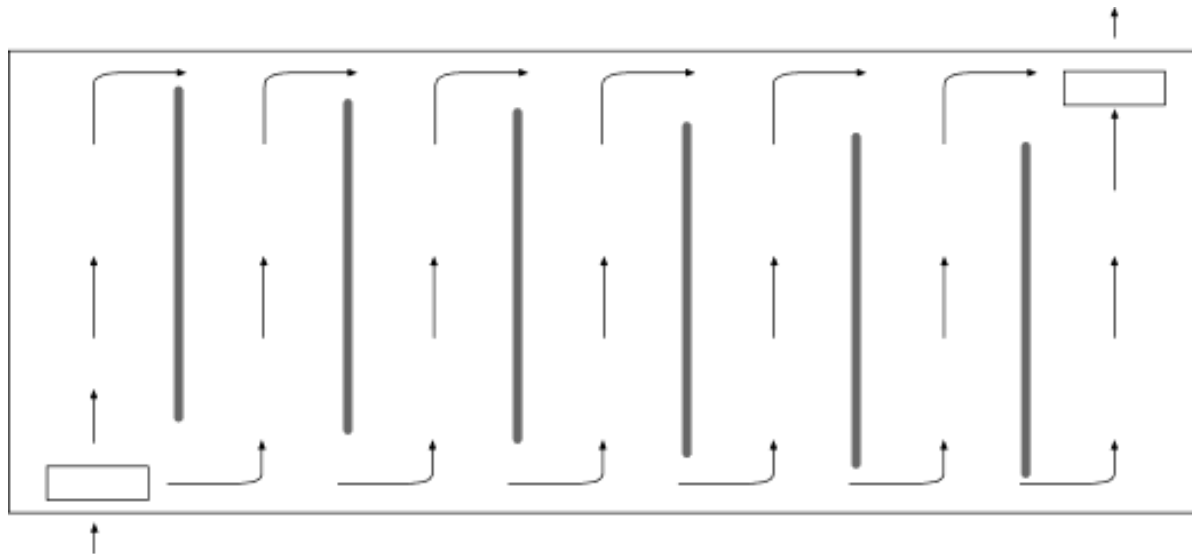


Abbildung 2-8 Durchströmung des Kollektors (Feld "West") mit integriertem Verteilkanal (unten) und Sammelkanal oben.

In Abb. 2-8 sind die Konterlatten und ihre vertikale Stafflung sichtbar. Da der horizontale Abstand der Konterlatten relativ gross ist (1.2 m), mussten die selektiven Bleche mittig unterstützt werden, damit sie nicht "durchhängen". Dafür wurde eine etwas kürzere und überall gleich lange Konterlattung verwendet. Ebenfalls in Abb. 2-8 ist die beginnende Absorbermontage zu sehen. Weitere Abbildungen finden sich in Kapitel 3 (3.9 b-c).



Abbildung 2-9

Unterdach mit Auflage und Luftführungsstruktur (Unterströmung). Im Hintergrund die beginnende Montage des selektiven Absorberbleches.

In Abb. 2-9 ist die Montage des selektiven Absorberbleches abgeschlossen und die obere, dunkel eingefärbte Konterlattung zur Auflage der Glashalteprofile ist ebenfalls montiert. Gut sichtbar ist die vertikale Staffelung zur Optimierung der Kollektorfelddurchströmung. Ausserdem offenbaren die Abbildungen 2-8 und 2-9 ein Problem des Bauablaufes. Ungleich früherer Lieferungen mit weisser Schutzfolie, waren diesmal die selektiven Bleche mit einer transparenten Schutzfolie versehen. Werden nun die Bleche durch die Besonnung heiss, bevor die Schutzfolie entfernt ist, so "verschweisst" diese mit dem Blech und beim nachträglichen, gewaltsamen Entfernen bleiben stellenweise Rückstände und Verfärbungen.



Abbildung 2-10

Fertig montierte selektive Absorberbleche. Im Vordergrund die dunkel eingefärbte Einströmöffnung.

Abschliessend wird das Auflageprofil (Untergurt) der Glashalterung montiert, das Solarglas aufgelegt und das Abdeckprofil (Obergurt) mit dem Auflageprofil verschraubt.



Abbildung 2-11:

Montage der Kollektorabdeckung (Solarglas) über dem Absorber und ein Detail des unteren Auflagers (Untergurt) des Solarglases, wo auch der Übergang zur Dachwasserefassung – Chromstahlblech (Spenglerarbeit) und der Winkel als "Absturzschutz" erkennbar ist.



Detail des Glashalteprofils mit:

- 4: Untergurt mit Dichtungsgummi auf Kantholz aufliegend
- 5: Obergurt mit Dichtungsgummi
- 6: Seitliches Abschlussblech
- 6a: Profil zum Ausgleich des Dickenunterschiedes Glas - Blech

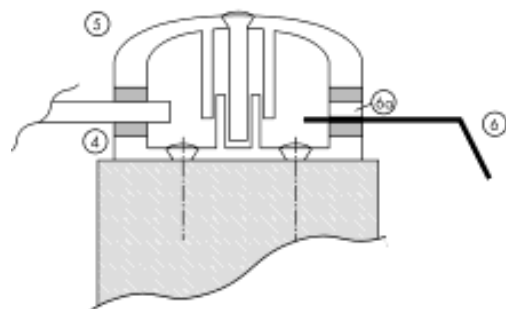


Abbildung 2-12: Glashalteprofil

2.8. Luftführung und Speicherung

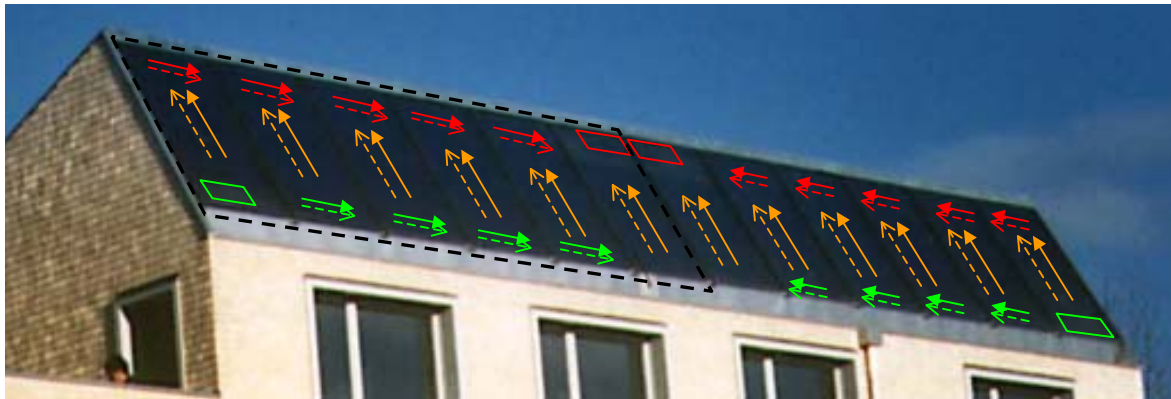
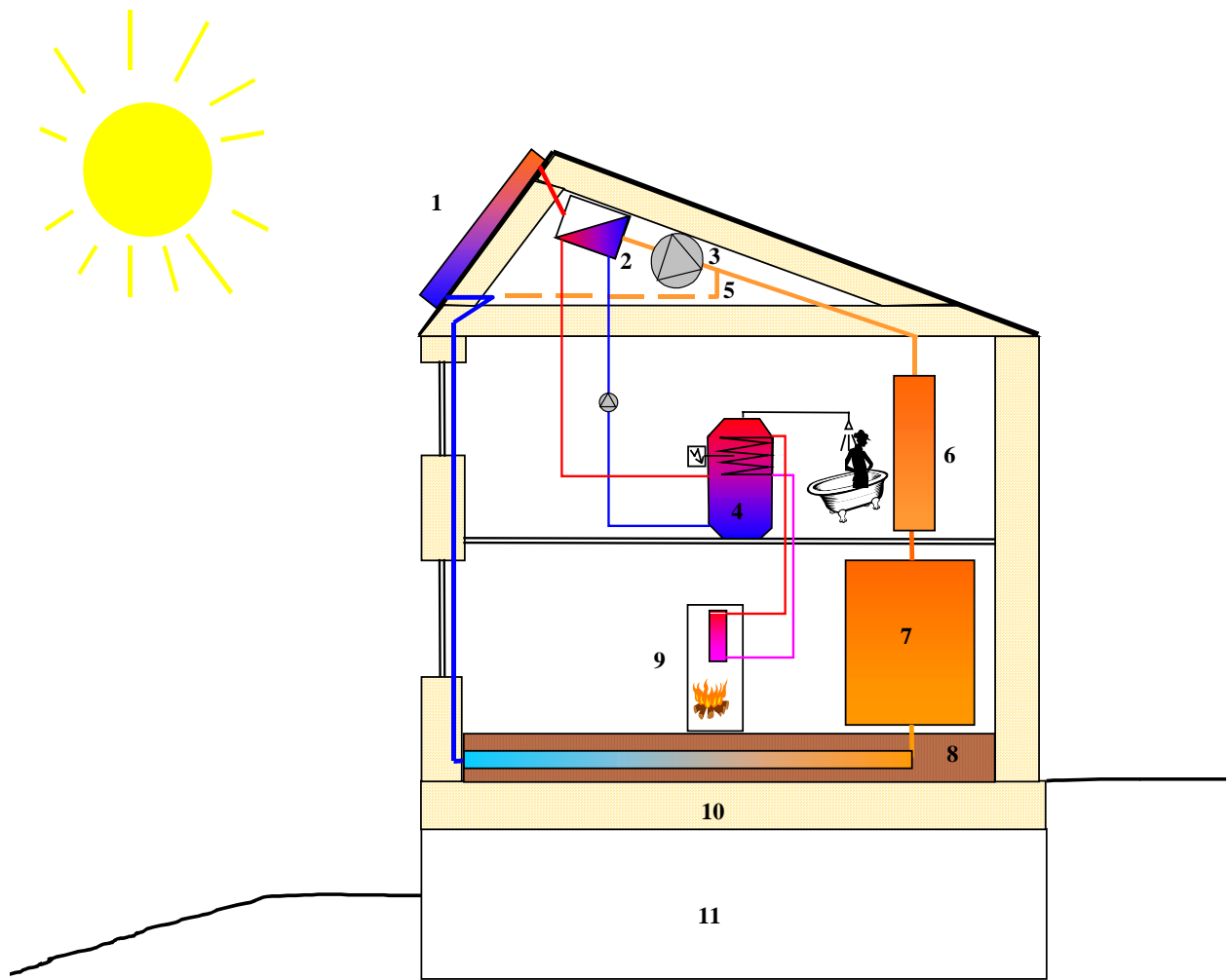


Abbildung 2-13: Durchströmungsmuster des Kollektordaches. Zwei spiegelsymmetrische, diagonal durchströmte Kollektorfelder à je 6 Kollektorbahnen mit über und unterströmtem Absorber.



Abbildung 2-14: Nordwestseite mit angedeuteter, schematischer Luftführung durch das Innere der Gebäudestruktur (Sommerbetrieb: gestrichelt).



1. Luftkollektoren
2. Luft-/Wasserwärmetauscher und Umwälzpumpe
3. Radialventilator
4. Schichtspeicher für Warmwasser mit Elektro- Notheizung
5. Sommerein- und -auslass
6. Vertikalkanal Bad (OG)
7. Murokauste Wohnzimmer
8. Hypokauste Boden EG
9. Holzofen mit integriertem Wärmetauscher
10. Tragkonstruktion Boden EG (Holzelement)
11. Untergeschoss (Betonwanne)

Abbildung 2-15: Anschauliches Prinzipschema. Alle Isolationen: Gratec.

2.8.1. Funktionsbeschreibung

Sonneneinstrahlung wird im Kollektor zu Wärme umgewandelt und es entsteht heiße Luft. Die heiße Luft gibt die gesammelte Wärme an einen Massespeicher ab und fließt abgekühlt zurück zum Kollektor (

Jedes Solarsystem ist wetterabhängig und daher als Alleinheizung ungeeignet, allerdings wird in der Regel ein hoher Deckungsgrad erreicht, sodass nur eine sehr einfache Zusatzheizung (z.B. kleiner Holzofen) benötigt wird.

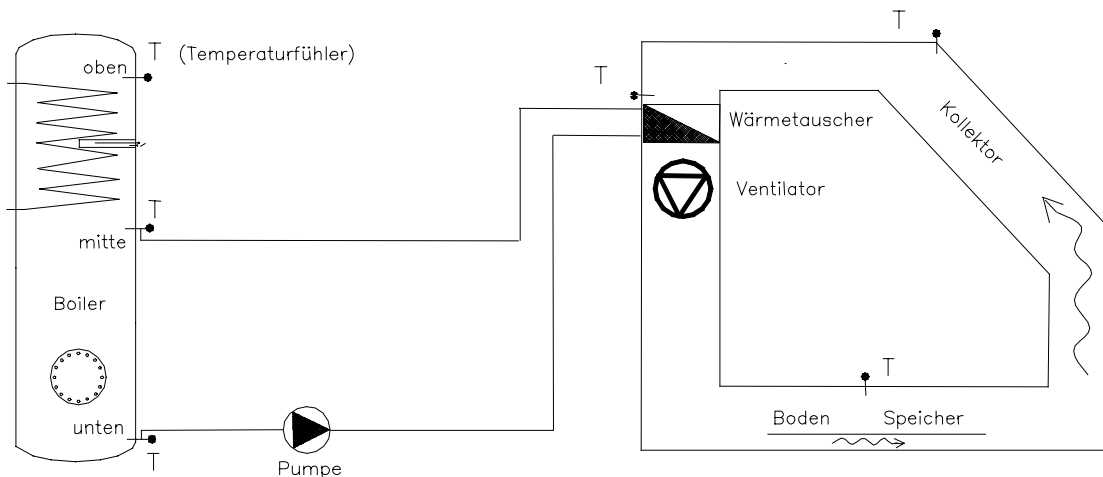


Abbildung 2-16: Schematische Darstellung des solaren Luftkreislaufes und der Warmwasservorwärmung sowie der Anordnung der Temperaturmessstellen

Das solare Luftsystem besteht aus dem Luftkreislauf (rechts) und einem weit gehend autonomen, sekundären Wasserkreislauf (links).

Luftkreislauf

Bei Sonneneinstrahlung steigt die Temperatur im Kollektor und die Steuerung nimmt den Ventilator in Betrieb. Die erwärmte Luft wird oben am Kollektor gefasst und durch die Gebäudestruktur zum Massespeicher (EG -Boden) geführt. Indem die erwärmte Luft durch Hohlräume in der Speicherstruktur(Hypokauste) strömt, nimmt der Speicher diese Wärme auf. Nach dem Speicher wird die abgekühlte Luft wieder in den Kollektor zurückgeführt.

Wasserkreislauf

Direkt nach dem Kollektor ist die Luft am wärmsten. Dort befindet sich ein Luft-Wasser-Wärmetauscher. Ist die Luft dort wärmer als der Boiler unten, so nimmt die Steuerung die Pumpe in Betrieb und Boilerwasser wird im Wärmetauscher erwärmt und wieder in den Boiler "geladen".

Steuerung

Die Steuerung sorgt dafür, dass die Kreisläufe automatisch nur dann in Betrieb genommen werden, wenn der Energieertrag positiv ist. Gleichzeitig ermöglicht sie eine Betriebsüberwachung. Die im Schema eingezeichneten Temperaturmessstellen sind dafür eine Voraussetzung.

2.8.2. Technik und Luftführung in der Gebäudestruktur

Für die "Technik" war der ganze Dachraum vorhanden. Da die vertikale Erschliessung des Gebäudes mit Solarluft wegen der Raumaufteilung nicht genau mittig realisiert werden konnte, musste ein kurzer (2m) Vorlaufkanal den horizontalen Versatz zwischen den Vorlauföffnungen des Kollektors und der "Technik-Achse" überbrücken.

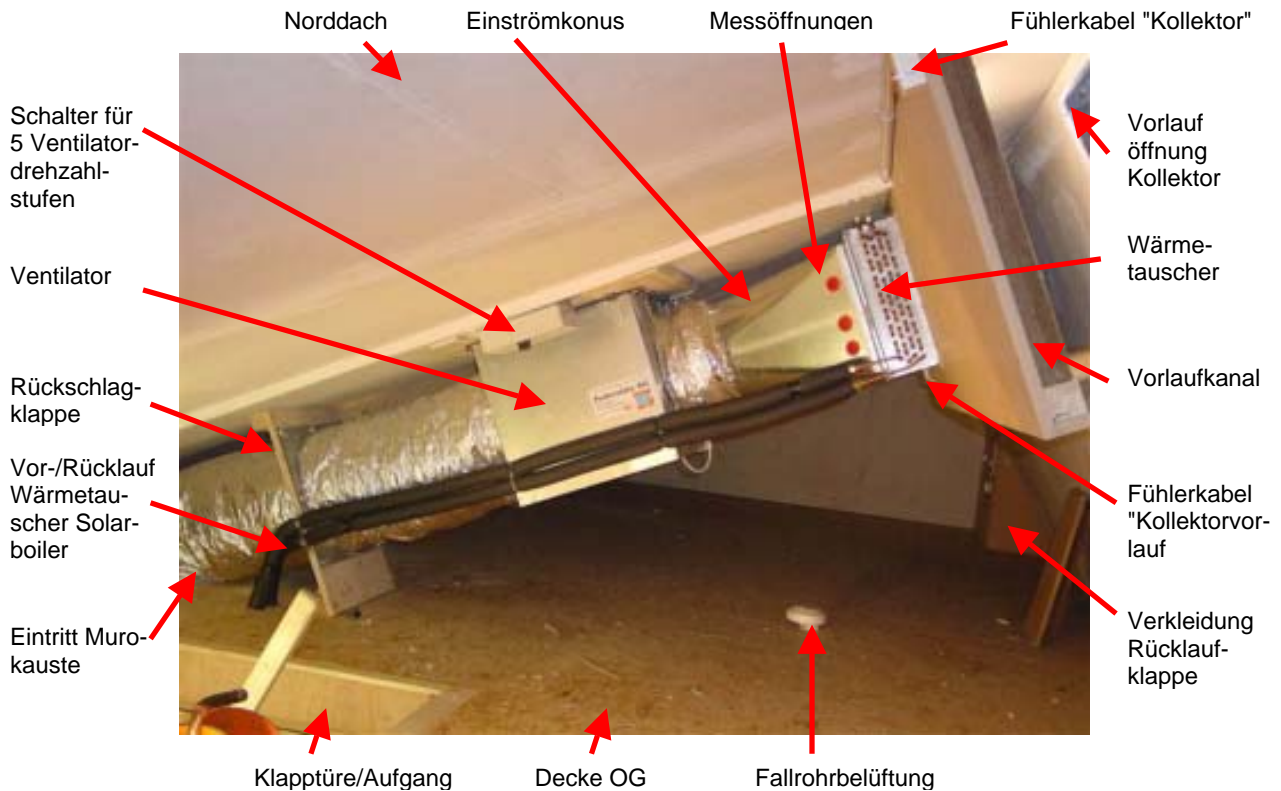


Abbildung 2-17: Der Dachraum mit der gesamten Technik



Abbildung 2-18: Federbelastete Rückschlagklappe im Vorlauf nach dem Ventilator (links); Verkleidung des Rücklaufdurchbruchs in den Kollektor und der motorisierten Rücklaufklappe mit Serviceöffnung .

Für den Sommerbetrieb wird an der Unterseite des Konus hinter dem Wärmetauscher (Abb. 2-16) ein Wartungsluke geöffnet und seitlich am Kollektorfuss die Abdeckung der Motorklappen (Abb. 2-16 und 2-17) abgenommen, womit der ganze Dachraum zum Verbindungskanal wird, was selbst im ventilatorlosen Betrieb gut funktioniert. Die Temperaturen betragen in Dachraum im Sommer im Mittel 35 °C, was aber wegen der ebenfalls guten Wärmedämmung der Obergeschossdecke zu keinerlei Beeinträchtigung des Komforts führt.

Ausser im Dachkollektor wird die Luft ausschliesslich in der Innenstruktur des Gebäudes geführt: Durch einen Öffnung in der OG Decke genau über der Zwischenwand Badezimmer/ nordseitiger Gang gelangt die Luft in diese Hohlwand und weiter ins EG in die Trennwand zwischen Wohnzimmer und nordseitigem Entrée. Diese Wand ist wohnzimmerseitig als Murokauste ausgestaltet (Kalksandstein) und nordseitig als isolierte Holzständerwand, welche auch die Steuerung und die Steigleitung des Warmwasserregisters des Ofens aufnimmt.



Abbildung 2-19: Der mit schwarzem Schiefer belegte Speicherboden (Hypokauste), der kleine Holzspeicherofen und die Murokauste (rötlicher Verputz) mit Verteil-dose (weisser Deckel) für den Temperaturfühler des Bodenspeichers.

Die Rücklaufkanäle von der Speicherdecke zum Kollektor sind innenliegend beidseitig in die Südfassade integriert. Hierzu wurde die Isolation in diesem Bereich von 30 auf 20 cm verringert (Abb. 2-6).

2.8.3. Speicherdecke

Eine erstmalig und erfolgreich eingesetzte Spezialität ist die Konstruktion der Hypokauste. Auf die wärmegeädämmten Holzelemente der Bodenkonstruktion werden sogenannte "Elektrosteine" aus Kalksandstein verlegt. Diese Steine weisen in Längsrichtung mehrere Bohrungen auf, welche zusammengesetzt die Luftkanäle bilden. Elektrosteine werden üblicherweise in Wänden eingesetzt, dabei hat der Elektriker dann die Möglichkeit, in die schon vorhandenen "Steigleitungen" seine Kabel einzuziehen. Die Vorteile dieser Elemente als Hypokauste sind:

1. Keine separate Verlegung von luftführenden Rohren (Kosteneinsparung)
2. Trockene Bauweise, flexibel in der Anordnung.

Die Elektrosteine wurden so verlegt, dass nord und südseitig des Erdgeschosses noch ca. ½ Meter Platz bleibt. Diese Hohlräume werden mit Schalttafeln abgedeckt und bilden die Verteil- und Sammelkanäle der Hypokauste. Nach dem vollflächigen Vergiessen des Estrichs (Unterlagsbodens) auf die Elektrosteine und die Kanalabdeckung ist die Hypokauste fertig und wird mit dem Bodenbelag (Schiefersteinplatten) belegt.



Abbildung 2-20: Zusammenfügen der Hohlsteine zu einer Hypokauste auf den tragenden Holzelementen der Bodenkonstruktion.

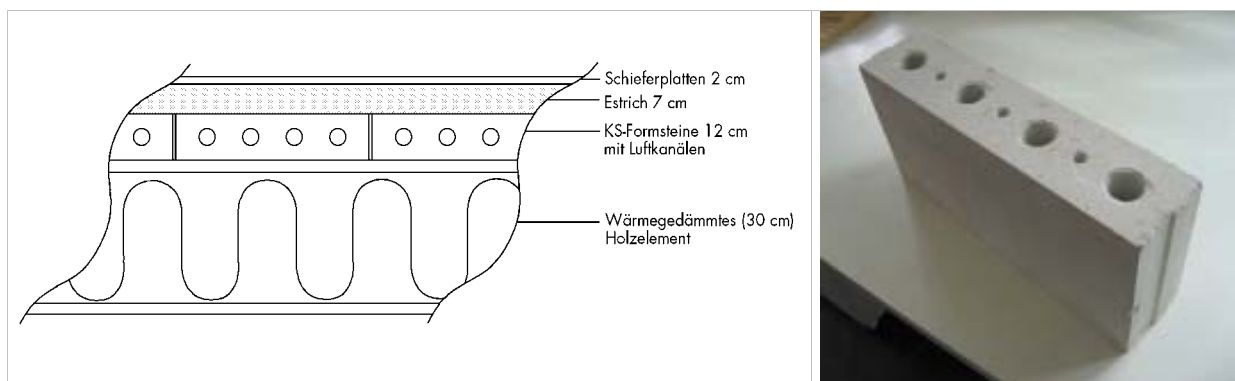


Abbildung 2-21: Querschnitt durch den Hypokaustenboden und Einzelelement



Sammelkanal an der Südfassade nach der Hypokauste, Die Schalungsbretter, die den Kanal abdecken bevor der Unterlagsboden vergossen wird, sind links aufgestellt sichtbar

Der Kanal verbreitert sich zum Steigkanal hin, wie an der einspringenden Kalksandstein-Auflage ersichtlich. Dies um gleichmässige Durchströmungsverhältnisse sicherzustellen.



Verteilkanal an der Nordfassade. Dieser Kanal diente gleichzeitig der Lüftung (Abluft). Die Kalksandstein-Elemente der Hypokauste sind rechts unten erkennbar.

Abbildung 2-22: Ausschnitte aus den Sammel- und Verteilkanälen der Hypokauste.

2.8.4. Ventilator

Dieser befindet sich **nach** dem Wasserwärmetauscher und **nach** dem Sommerauslass ([Abbildung 2-17](#)). Der Ventilator ist ein handelsüblicher, radialer Kanalventilator KVK 355 der Firma Systemair (vormals Antlia) mit folgenden Auslegungsdaten:

Stromaufnahme (Stufe 4 von 5)	300 Watt)
Förderleistung (Auslegung)	1500 m ³ /h;
Förderdruck (Auslegung)	150 Pa

Tabelle 2-1: Ventilatordaten bei Auslegung

Stromaufnahme (Stufe 4 von 5)	300 Watt)
Förderleistung	1400 m ³ /h
Förderdruck	200 Pa
Kollektorfläche (Absorber)	30 m ²
Spez. Förderleistung	47 m ³ h ⁻¹ m ⁻²

Tabelle 2-2: Ventilatordaten gemessen

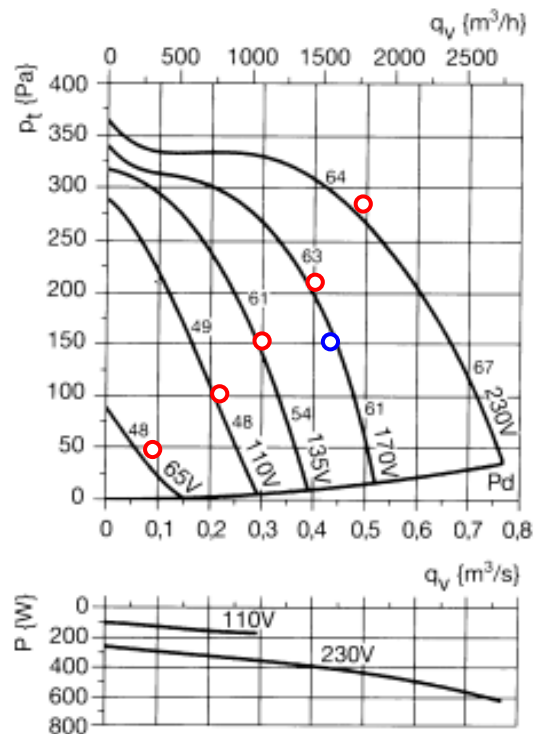
Kennlinien / Caractéristiques

Abbildung 2-23: Ventilator Kennlinien

Eingezeichnet ist der Auslegungspunkt ●, sowie die Messwerte des Volumenstroms ● bei verschiedenen Betriebsspannungen, deren Verbindung die sog. Anlagekennlinie ergibt.

Die recht steile Anlagekennlinie ist eine Folge des relativ hohen Druckverlustes. Dieser ist vermutlich vor allem auf die vielen engen Kanäle der KS-Elemente der Hypokauste zurückzuführen. Trotzdem kann anstelle der vollen Ventilatorleistung (Stufe 5) die Ventilatorstufe 4 benutzt werden, was weniger Lärm und Energieverbrauch bedeutet.

Das nebenstehende Diagramm zeigt die Leistungsaufnahme für zwei verschiedene Betriebsspannungen (Ventilatorstufen), die anderen Stufen müssen interpoliert werden.



Die spezifische Förderleistung pro m^2 Kollektorfläche liegt mit rund $47 m^3 h^{-1} m^{-2}$ im unteren Bereich der Faustregel ($40 - 80 m^3 h^{-1} m^{-2}$). Ein höheres Luftvolumen macht aber bei Systemen, die auch ein relativ hohes Temperaturniveau für die Warmwasserbereitung erreichen sollten keinen Sinn und wären nur mit erhöhtem Ventilatorstromverbrauch verbunden.

Als Nachteil muss ein geringfügig kleinerer Gesamtenergieertrag (- ca. 5 %) in Kauf genommen werden, da der Kollektor auf einem relativ hohen Temperaturniveau betrieben wird, was die Verluste desselben erhöht. Angesichts des höheren Temperaturniveaus, welches u.a. für die Warmwasservorwärmung wesentlich ist, ist dies aber gesamthaft gesehen vorteilhaft.

2.8.5. Pumpe

Die kleinste am Markt erhältliche Umwälzpumpe für Warmwasserzirkulation (25 W) reicht in der Regel bei sorgfältiger Planung und Ausführung. Ein einfacher Durchflussmesser/-einsteller ist unabdingbar, um die Anlage im optimalen Betriebspunkt (1 lt/min) zu betreiben.

2.8.6. Solarboiler

Analog zu einem "normalen" Solarboiler. 500 lt. mit Nachheizregister (elektrisch) auf 2/3 Höhe. Solarer Vorlauf knapp unterhalb der Mitte (ohne Wärmetauscher da Trinkwasser!!) Solarer Rücklauf ganz unten. Bei diesem Projekt kam ein Edelstahlboiler der Firma Feuron AG zum Einsatz, bei dem die Stutzenart und -anordnung sowie die Registergrösse des Wärmetauschers frei wählbar sind.

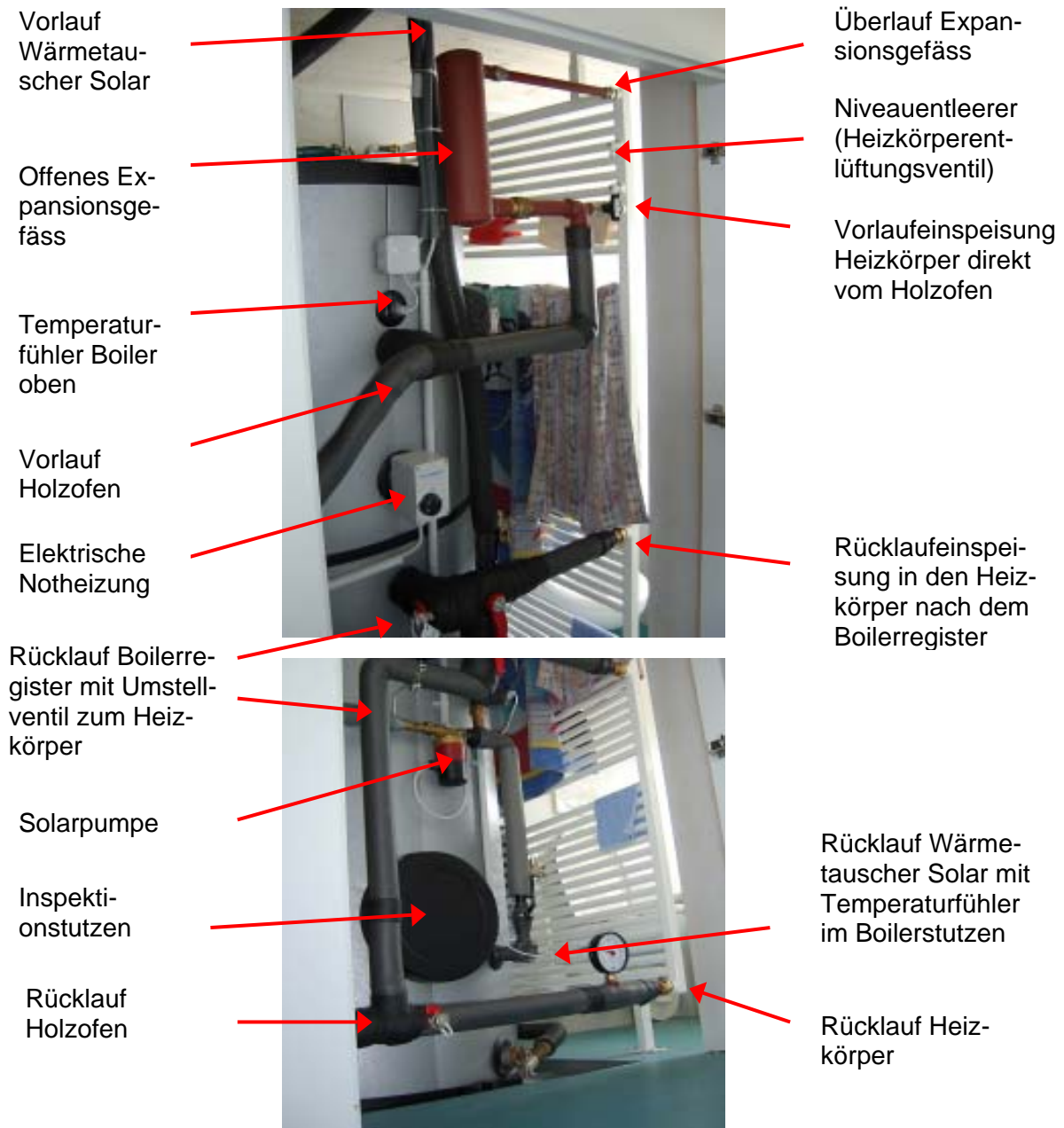


Abbildung 2-24: Solarboiler. Ansicht durch die geöffnete Servicetüre

Am rechten Rand des Solarboilers ist der raumhohe Handtuchradiator gegen das Badezimmer. Damit können neben dem Aufhängen und Trocknen der Handtücher folgende Funktionen wahrgenommen werden:

- Sichtschutz der Technik vom Badezimmer aus
- Abwärme des Solarboilers und der Technik gelangt trotzdem ins Badezimmer
- Beheizung des Badezimmers mit dem Holzofen

Letztere Funktion lässt sich auf unterschiedliche Weise einstellen:

- Direkteinspeisung des heißen Vorlaufes des Holzofens (oben)
- Einspeisung des warmen Rücklaufes nach dem Heizregister des Boilers durch Umstellen des 3-Weg-Ventiles in der Mitte des Heizkörpers, wobei die Thermik automatisch auch den oberen Teil des Heizkörpers erwärmt.
- Keine Einspeisung in den Heizkörper – der Rücklauf nach dem Heizregister des Boilers wird durch entsprechende Stellung des 3-Weg-Ventiles direkt wieder zum Holzofen geführt.



Abbildung 2-25
Solarboiler hinter dem Handtuchradiator, Ansicht aus dem Badezimmer

Jedes Badezimmer ist generell ein Ort mit erhöhten thermischen Komfortanforderungen (fehlende Bekleidung, Verdunstungskälte), sodass hier erst recht ein Temperaturniveau während der Benützung von mindestens 20 °C unbedingt nötig ist. Erschwerend kommt meistens hinzu, dass Badezimmer im Norden, Osten oder Westen eines Gebäudes platziert werden. Bei früheren Messprojekten hat sich dieser Umstand als kritisch erwiesen. Aus diesem Grunde wurde (neben der Öffnung des Badezimmers nach Süden) der Warmwasserboiler als einzige, trotz lückenloser und guter Isolation rund um die Uhr in Betrieb stehende 'Abwärmequelle', im Badezimmer platziert. Dies bedingt ein Um-

denken und 'sich daran gewöhnen' der Bauträgerschaft. Hier und bei allen anderen Bauträgerschaften, bei denen dieses 'Setup' realisiert wurde, hat man sich daran gewöhnt und ist mit dem thermischen Komfort im Badezimmer sehr zufrieden.

2.8.7. Zusatzheizung

Das ursprünglich als Passivhaus geplante Gebäude, sollte auch eine entsprechende Ergänzungsheizung erhalten. Im Passivhaus ist der maximale Heizleistungsbedarf auf 10 W/m^2 Nettowohnfläche begrenzt, was im vorliegenden Fall (150 m^2) eine Heizleistung von $1,5 \text{ kW}$ bei -10° Aussentemperatur ergibt.

Statt, wie im Passivhausbau weit verbreitet, eine Luftheizung einzubauen, wurde ein Holzofen gewählt der gerade die erforderliche Leistung erbringt und als Speicherofen konzipiert ist der auch die Warmwassererwärmung übernehmen kann, da das Warmwasser im Passivhaus 50 % des Wärmebedarfes ausmacht. Eingesetzt wurde ein Zimmerofen vom Typ Specolino der Firma Maissen, welcher alle Anforderungen erfüllte und gerade die erforderliche Leistung erbringt. Diese knappe Dimensionierung wurde bewusst gewählt, um im Rahmen des P&D-Projektes des Bundesamtes für Energie die Machbarkeit zu untersuchen. Verschieden Umstände führten dazu, dass der maximale Heizleistungsbedarf des Hauses in einer sehr kalten, bedeckten Klimaperiode schlussendlich etwa doppelt so hoch (3 kW) war:

- Fenster nicht ganz auf Passivhausniveau (Verglasungsrandverbund und Rahmen)
- Wärmebrücken (Fensterrahmen auskragend, grosse Rahmenverbreiterungen bei den Terrassentüren)
- Winddichtigkeit der Gebäudehülle konnte nicht auf Passivhausniveau gebracht werden.

Dass der Heizleistungsbedarf statt den geplanten 10 W/m^2 nach der Realisation im Betrieb dann tatsächlich etwa das Doppelte beträgt, ist im Passivhausbau durchaus (leider) die Regel, wie die Untersuchung (2004) "Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser" der Hochschule für Technik und Architektur (HTA) in Horw zeigte. Dieselbe Untersuchung bestätigt zudem, dass die geforderte Winddichtigkeit in allen untersuchten Objekten nicht erreicht werden konnte.....

Bei diesem P&D-Projekt kam erschwerend hinzu, dass zwar über die Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Materials (Gratec) Prüfstandwerte vorhanden waren, wie hoch die "verbauten" Werte sind war unbekannt und im Rahmen dieses Projektes wurde nur der Füllgrad und allfällige Setzbewegungen mithilfe der Infrarot-Thermographie überprüft.

Zusammen mit dem Wunsch den Ofen statt wie üblich in Speckstein in Sandstein zu realisieren (geringere Wärmespeicher und Wärmeleitfähigkeit) und ihn einseitig an den Kamin anzubauen (geringere Wärmeabstrahlfläche, mehr Wärmeverluste) führte dies zu einer doch unangenehmen Unterdeckung und es musste im Extremfall (wenige Male) elektrisch nachgeheizt werden.

Die Wärmeverteilung im Haus geschieht rein passiv. Der Treppenaufgang vom Erdgeschoss ins Obergeschoss dient der Steigwärme in die Schlafräume und ins Badezimmer.

Das Warmwasserregister, eine Wassertasche aus Chromnickelstahl in den Rauchgaszügen des Ofens, mit dem der obere Teil des Solarboilers nachgeladen und ein Handtuchradiator im Bad temperiert werden kann, arbeitet ausschliesslich mit thermischem Auftrieb.

Die raumunabhängige Verbrennungsluftzufuhr ist direkt nach unten ins Kellergeschoss geführt. Sie ist zwingend nötig um dem beheizten Volumen nicht Luft und Wärme zu entziehen und die Lüftungsanlage nicht aus dem Gleichgewicht zu bringen.



Abbildung 2-26: Holzspeicherofen. Das Wasserregister befindet sich im oberen Speicherteil.

Der obere Speicherteil hat zuerst einen Steigzug. Die Rauchgase werden dann 180° umgelenkt und verlassen nach einem Sturzzug den Ofen seitlich in das Kamin etwa auf halber Höhe. Die "Zwischenwand" bildet das Wasserregister, dessen Anschlüsse nach hinten geführt sind. Somit ist die direkte Umströmung mit heissem Rauchgas sichergestellt.

Der Ofen hat sich nur bedingt bewährt, "dank" den oben erwähnten Umständen:

- Unterdimensionierung (bzw. zu hoher Wärmeleistungsbedarf des Hauses)
- Einseitig angebaut
- Ofenmaterial (Sandstein) suboptimal gegenüber Speckstein.

Scheint ab und zu die Sonne sind auch Temperaturen um -10 °C kein Problem. Bei längeren sonnenlosen, kalten (-5 °C und weniger) Hochnebellagen wird es kritisch. Dann reichen auch 3 mal Einfeuern mit einer vollen Hartholzbeschickung nicht aus.

2.9. Warmwasserbereitung

Durch den Einbau eines Luft-Wasser-Wärmetauschers ([Abbildung 2-17](#)) unmittelbar am Ende des kurzen Vorlaufkanals im Dachgiebel konnte zusätzlich auf einfachste Weise eine sehr effiziente solare Wassererwärmung realisiert werden. Da der Wärmetauscher innerhalb des Dämmperimeters des Hauses liegt, besteht (im Mittelland) keine Frostgefahr und der Wärmetauscher kann direkt vom Trinkwasser des Boilers (ohne Glykolzwischenkreislauf!) betrieben werden. Für "höhere Lagen" ist die Solarsteuerung mit einer Frostschutzschaltung ausgerüstet, welche die Temperatur des Wärmetauschers immer knapp über dem Gefrierpunkt hält, indem die Pumpe für kurze Zeit in Betrieb geht.

Der Wärmetauscher muss folgenden Randbedingungen genügen:

- Maximale Hebung des Temperaturniveaus des Boilerwassers. Dies bedingt einen Gegenstromwärmetauscher. Minimaler Durchfluss (low flow), der aber auch nicht zu klein sein darf (das Umkippen in laminare Strömung wäre schlecht für den Wärmeübergang). Platzierung des Tauschers an der wärmsten Stelle im Solarkreis (kurz nach dem Kollektor).

Im Einfamilienhaus kommt ausschliesslich die rein serielle Verschaltung der Rohrreihen in Frage, wobei pro Lamellenpaket zwei (eine steigende und eine fallende), vier oder sechs möglich sind. Dies garantiert eine einfache, kostengünstige Anlage. Im ausgeführten Objekt wurden 4 Rohrreihen eingesetzt. 6 wären noch etwas besser, der wasserseitige Rohrreibungswiderstand jedoch so gross, dass die kleinsten am Markt erhältlichen Zirkulationspumpen (Trinkwasserqualität) überfordert sind.

- Minimaler luftseitiger Strömungswiderstand. Dieser nimmt quadratisch mit der Luftgeschwindigkeit und linear mit den Reibungsflächen zu. Beides sorgt aber im Gegenzug für eine hohe Wärmeübergangsleistung. Zu beachten ist auch der Sommerfall, wenn ohne Ventilatorhilfe nur mit dem thermischen Auftrieb gearbeitet werden soll. Eine heikle Optimierung. Im vorliegenden Fall wurde ein Gesamtquerschnitt von 85x 40cm (0.34 m²) und ein Lamellenabstand von 3 mm gewählt.

Grundlage für die Dimensionierung war die Auslegung des Herstellers (WT-Systemtechnik) welcher aufgrund der Auslegungsdaten:

	Luft	Wasser
Eintrittstemperatur	50 °C	15 °C
Volumenstrom	1500 m ³ /h	60 lt/h

Folgende "Leistungsdaten" ermittelte:

Abmessung mm	850x400x150
Anströmfläche m ²	0.34
Rohrreihen in Serie	4
Leistung kW	2.5
Druckverlust Luft Pa	14
Druckverlust Wasser kPa	10
Temperatur Luft Austritt	44
Temperatur Wasser Austritt	49

Tabelle 2-3: Wärmetauscherauslegung.

Die beim 4-Reiher resultierenden Wasseraustrittstemperaturen sind theoretisch schon sehr nahe an der Lufteintrittstemperatur. In der Praxis stellen sich hingegen etwas tiefere Temperaturen ein, dennoch ist die Gegenstromcharakteristik deutlich ausgeprägt.

Auch bei der Luftaustrittstemperatur stellen sich in der Praxis eher ca. 3 K tiefere Werte ein, was der prinzipiellen Eignung aber keinen Abbruch tut.

2.10. Betriebsarten

Grundsätzlich wird zwischen Winterbetrieb (Gebäudetemperierung und Warmwasservorwärmung) und dem Sommerbetrieb (ausschliesslich Warmwassererwärmung) unterschieden.

2.10.1. Winterbetrieb (geschlossener Kreislauf)

Normalbetrieb gemäss Funktionsbeschreibung (Kapitel [2.8.1](#)) Hier liegt die Priorität eindeutig auf der Gebäudetemperierung. Der Ventilator "saugt" die im Dachkollektor erwärmte Luft zuerst durch den Wärmetauscher, um das höchste Temperaturniveau für die Warmwasserbereitung nützen zu können. Leicht abgekühlt (ca. 10°K) passiert die Luft den Ventilator und wird in die Murokauste des Badezimmers und des darunter liegenden Wohnzimmers geführt. Danach wird ein Teil direkt südseitig durch die angrenzende Hypokauste geführt. Für den grössten Teil der nicht direkt angrenzenden Hypokauste wird die Luft zuerst nordseitig nach links und rechts in Verteilkanäle ([Abbildung 2-22](#)) geführt um von dort aus in die Hypokauste zu gelangen. Anschliessend wird die Luft gesammelt und gelangt durch zwei in die Südfassadenkonstruktion raumseitig ausgesparten Kanälen wieder in den Kollektor zurück.

2.10.2. Sommerbetrieb

Der Kreislauf muss kurzgeschlossen (Bypass) werden, damit auf jeden Fall vermieden wird, dass warme Luft durch das Gebäude zirkuliert. Dazu wird sowohl die Serviceklappe an der Unterseite des Übergangskonusses ([Abbildung 2-17](#)) geöffnet, als auch jene der Klappenverkleidungen bei Rücklauf in den Kollektor ([Abbildung 2-18](#)).

Die im Kollektor erwärmte Luft wird dann unmittelbar nach dem Wärmetauscher in den allseitig isolierten und jetzt als Bypasskanal funktionierenden Dachraum entlassen, von wo sie dann auf kurzem und direktem Weg via die offenen Klappenverkleidungen wieder in den Kollektor gelangt.

Auf diese Weise wird bei Sonnenbestrahlung "rein thermisch" genügend Auftrieb bzw. Luftumsatz generiert, um die Warmwasseraufbereitung via Wärmetauscher sicherzustellen. Der Ventilator muss allerdings am Stufenschalter ausser Betrieb genommen werden (Stufe 0) und nicht etwa an der Steuerung, da sonst die Rücklaufklappen nicht öffnen würden.

2.10.3. Regelung

Wie für ein 'übliches' solares Wassersystem genügt eine einfache 2-Punkt-Temperatur-differenz-Regelung für die Inbetriebnahme des Luftsystems (Ventilator) und eine eben solche für den Warmwasserladekreis. Obwohl beide Kreise voneinander abhängen, ist es sinnvoll, diese weitgehend unabhängig von einander zu steuern und mit den Einstellungen sicherzustellen, dass die Boilerladepumpe nur in Betrieb geht, wenn es beim Wärmetauscher "warm genug ist". Es handelt sich um eine klassische 2-Kreis Regelung vom Typ "2 Kollektorfelder - 2 Speicher", wobei das zweite "Kollektorfeld" der Luft-Wasser-Wärmetauscher ist. Die zum Einsatz gelangte Steuerung UVR 64 (6 Temperaturfühler – 4 Schaltkreise) bietet mehr als das unbedingt Notwendige zu einem annehmbaren Preis:

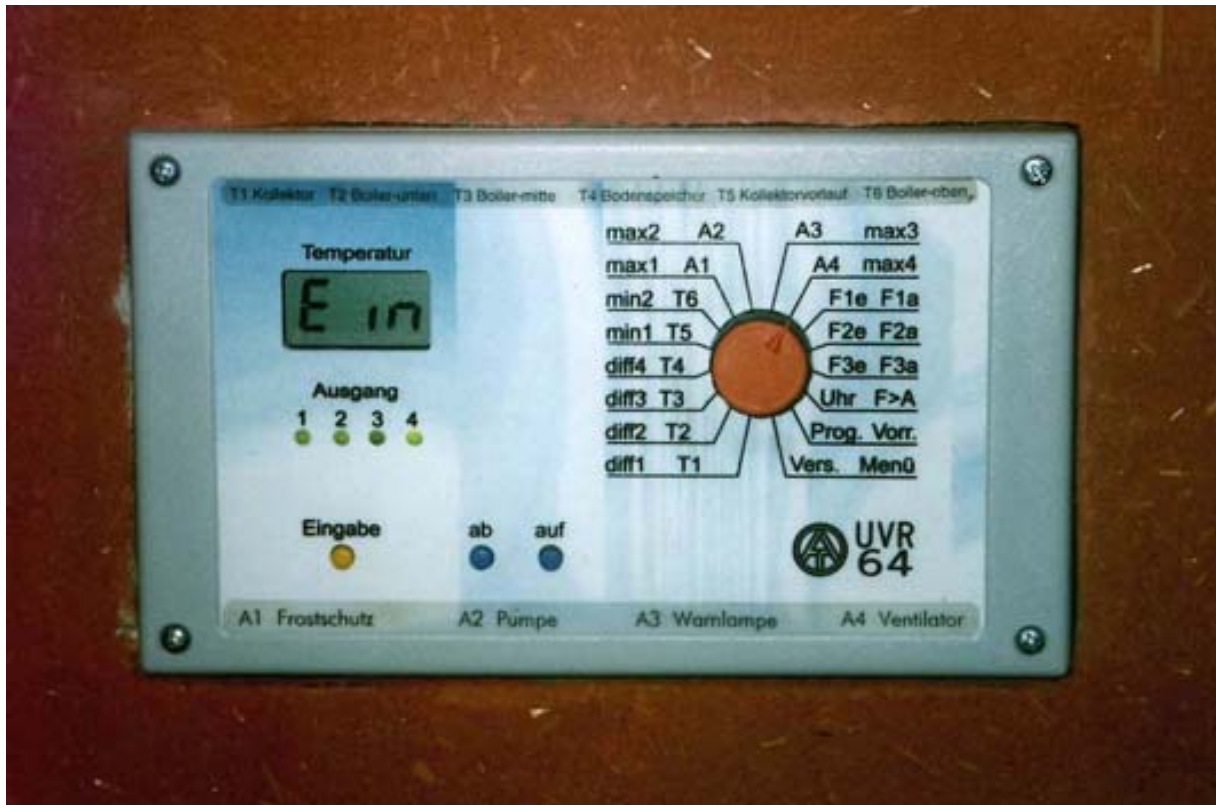


Abbildung 2-27: Die Steuerung (in die Rückwand der Murokauste eingelassen). Ausgang 4 (A4) ist "Ein". Über den Drehschalter sind sämtliche Ein- und Ausgänge abfragbar sowie alle Funktionen parametrierbar.

- Boilerübertemperaturwarnung
- Einstellbare Hysterese (Differenz zwischen Einschalt- und Ausschalttemperatur)
- Solarboilertemperaturen auf 3 Niveaus
- Datensicherung und –auslesen auf PC

Darüber hinaus kann die Programmierung sehr flexibel den Bedürfnissen angepasst werden.

Fühlerplatzierung zur Ansteuerung des Luftkreises:

Kollektorfühler: Der Kollektorfühler wurde am wärmsten Ort im Kollektor bei der Ansaugöffnung angebracht ([Abbildung 2-17](#)), so dass er während des Kollektorstillstandes die aufsteigende Wärme gut zu spüren bekommt, und so, dass er bei Kollektorbetrieb eine einigermaßen repräsentative Kollektorlufttemperatur misst. Wichtig ist dabei, dass er nicht der direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt ist.

Speicherfühler: Befindet sich in einem Elektroleerrohr aus Aluminium (gute Wärmeleitung),
Luftkreis welches auf die KS-Hypokaustensteine vor dem Einbringen des Unterlagsbodens aufgelegt wurde.

Fühlerplatzierung zur Ansteuerung des Wasserkreises:

Kollektorvor-: Der Vorlauffühler wurde im Luftkanal kollektorseitig direkt auf die Wärmetauscherlamellen montiert. So wird dort die nutzbare Lufttemperatur (Mischtemperatur) gemessen. Diese Temperatur entspricht nicht in jedem Fall der Kollektortemperatur (Fühlerposition, Kanalverluste, usw.) Die Messung direkt auf der Lammellenoberfläche ist zudem für die Realisation eines adäquaten Frostschutzes wichtig.

Speicherfühler: Boiler unten – direkt im Stutzen des Wärmetauscherrücklaufes. Misst den
Wasserkreis Rücklauf während des Betriebes und das Boilertemperaturniveau während des Stillstandes.

Fühlerplatzierung zur Betriebsüberwachung und -optimierung:

Speicherfühler: Boiler mitte - direkt im Stutzen des Wärmetauschervorlaufes. Misst den Vorlauf während des Betriebes und das Boilertemperaturniveau während des Stillstandes.

Boiler oben – Misst das Boilertemperaturniveau (keine Steuerfunktion, nur Übertemperaturwarnung).

(Fühlerplatzierungen siehe auch [Abbildung 2-16](#))

3. Beschreibung der Messdatenerfassung und -auswertung

Für eine Erfolgskontrolle im Rahmen eines P&D Projektes wurde ein kostengünstiger, pragmatischer Ansatz gewählt, der mit möglichst kleinem Aufwand eine möglichst gute Aussage zur Energiebilanz und zum Systemverhalten ermöglicht.

3.1. Klimadaten

Diese wurden nach Abschluss des Messprojektes von der nächstgelegenen ANETZ-Station (St. Gallen) bezogen. Erhältlich ist das Stundenmittel der Aussentemperatur und die Stundensumme der Globalstrahlung horizontal. Diese Daten werden in das Programm "Meteo-norm" übernommen und von diesem in ortspezifisch korrigierte Daten (Höhenlage für Aussentemperatur und Kollektorausrichtung für die Globalstrahlung) umgerechnet. Die Genauigkeit solcherart errechneter Daten ist nicht sehr hoch, erübrigt aber die separate Erfassung vor Ort und das Systemverhalten kann mit ausreichender Verlässlichkeit nachvollzogen werden.

3.2. Anlagedaten

Hier erweist es sich von grossem Vorteil, wenn die Daten der Steuerung übernommen werden können, was bei der verwendeten Steuerung auf sehr einfache und kostengünstige Weise realisiert werden konnte. Damit stehen zur Verfügung ([Abbildung 2-16](#)):

1. Kollektortemperatur
2. Kollektorvorlauftemperatur beim Wärmetauscher(WT)
3. Boden(Speicher)temperatur
4. Boilertemperaturen: unten – zugleich WT-Rücklauftemperatur
5. Boilertemperaturen: mitte – zugleich WT-Vorlauftemperatur
6. Boilertemperaturen: oben

Der Benutzer kann zudem entscheiden, ob die Daten in einem festen zeitlichen Rhythmus oder "Veränderungsabhängig" registriert werden. Letzteres kam zum Einsatz, da es die Datenmenge beschränkt, aber wenn etwas passiert (sich eine Temperatur um mehr als 3 °K verändert) in kurzen Abständen aufzeichnet. Dies ermöglicht eine sehr detaillierte und genaue Betriebsüberwachung.

Zudem werden alle Schaltvorgänge (Zustand der Steuerung) sekundengenau registriert, insbesondere:

1. Ein/Aus Ventilator
2. Ein/Aus Pumpe

Diese Zustandsänderungen lösen jedes mal die Registrierung eines kompletten Datensatzes (Zustände und Temperaturen) aus.

3.3. Raumtemperaturen

Dafür kamen 4 Mikrologger (Hobo) von der Grösse einer Zündholzschachtel zum Einsatz, welche die Aufzeichnung einer internen und einer externen Temperatur (Anschluss eines Fühlerkabels) ermöglichten. Von unten nach oben:

1. Keller
2. Wohnzimmer und Zulufttemperatur der kontrollierten Wohnungslüftung
3. Badezimmer und Kollektorstücklauf beim Eintritt in die Murokauste
4. Dachraum und Kollektorrücklauftemperatur

Aufgezeichnet wurde in einem festen 30 Minuten Rhythmus

3.4. Messgenauigkeit

- Mikrologger: Halbleiterfühler, Temperatur intern $\pm 0.7^{\circ}\text{K}$, extern $\pm 0.5^{\circ}\text{K}$
- Steuerung: Halbleiterfühler, Temperatur extern $\pm 1.0^{\circ}\text{K}$

Die absolute Genauigkeit des Zeitsignales ist von untergeordneter Bedeutung, da es nicht so wichtig ist wann genau ein Ereignis stattfand, sondern, dass die PC-Uhr beim Auslesen "genau" ist. Bei den relativen Zeitdauern (Zeitdifferenz zwischen zwei Ereignissen) kann von einer Genauigkeit von ± 1 sec ausgegangen werden.

Die geschätzte Genauigkeit weitere Parameter die per Handablesung (Zählerstände, Waage) ermittelt wurden und in Form von Protokollen vorliegen sind:

- Elektrizitätsverbrauch: $\pm 5 \%$
- Holzverbrauch: $\pm 10 \%$

3.5. Messdatenauswertung

Vorab die ereignisorientierte und daher zeitvariable Aufzeichnung der Steuerungsdaten machte es notwendig, die Daten in einem x/y-Diagramm darzustellen, da nicht nur der Wert, sondern eben auch die Zeit eine "Variable" ist. Dies ganz im Gegensatz zu einem Rubrikendiagramm, indem nur Daten mit identischen Zeitintervallen sinnvoll dargestellt werden können.

Nur die Klimadaten (Stundenintervall) und die Raumtemperaturen (Halbstundenintervall) lagen in Form solcher Rubriken vor. Da aber alle Daten gemeinsam dargestellt und ausgewertet werden müssen, ist dies nur in einem x/y-Diagramm möglich.

Als "Software" war Excel 97 im Einsatz, welches die Darstellungsmöglichkeit eines x/y-Diagramms bietet und auch die nötigen Rechenleistungen (Formeln) zur Auswertung bietet.

Für die Bestimmung von Energiewerten ist ein Zeitintegral zu bilden. Dieses muss daher im vorliegenden Falle auch mit den variablen Zeitintervallen zwischen zwei Messungen geschehen, was einfach zu realisieren war. Schwieriger ist das Übertragen von Fixintervalldaten in die zeitvariablen Tabellen zur Auswertung. Dies war für die Kollektorrücklauftemperatur nötig um den Energieertrag des Kollektors zu bestimmen. Die Lösung war ein sogenanntes "Makro", ein programmierter Ablauf welcher jeweils die am ehesten zeitlich passenden Halbstundenwerte in die entsprechenden Zeilen der zeitvariablen Steuerungsdatentabelle kopierte. Dieser Vorgang ist sehr zeitaufwändig (2h für einen Monat) kann aber vollautomatisch im Hintergrund ablaufen, während man in einem anderen Programm (z.B. Word) arbeitet (Excel selber ist während der Ausführung des Makros blockiert).

4. Energiebilanz

4.1. Klimavergleich

Kollektorerträge und Energieverbrauchswerte sind nur aussagekräftig und vergleichbar, wenn angegeben wird, unter welchen klimatischen Bedingungen sie zu Stande gekommen sind und ob diese dem langjährigen Mittel für die Standortregion etwa entsprechen.

Im untenstehenden Diagramm sind die für ein stark auf die Solarenergiegewinnung ausgerichteten Niedrigenergiehaus wesentlichen Klimaparameter, Solarstrahlung "Global Kollektor" (entspricht der Einstrahlung auf die Kollektorebene) sowie die Aussentemperatur, mit den Standardwerten aus "Meteonorm" ([Lit. 1](#)) verglichen. Es wurden die Messdaten der nahen ANETZ-Station St. Gallen verwendet.

Dank der erhöhten Hanglage mit freier Sicht musste keine Beschattung berücksichtigt werden.

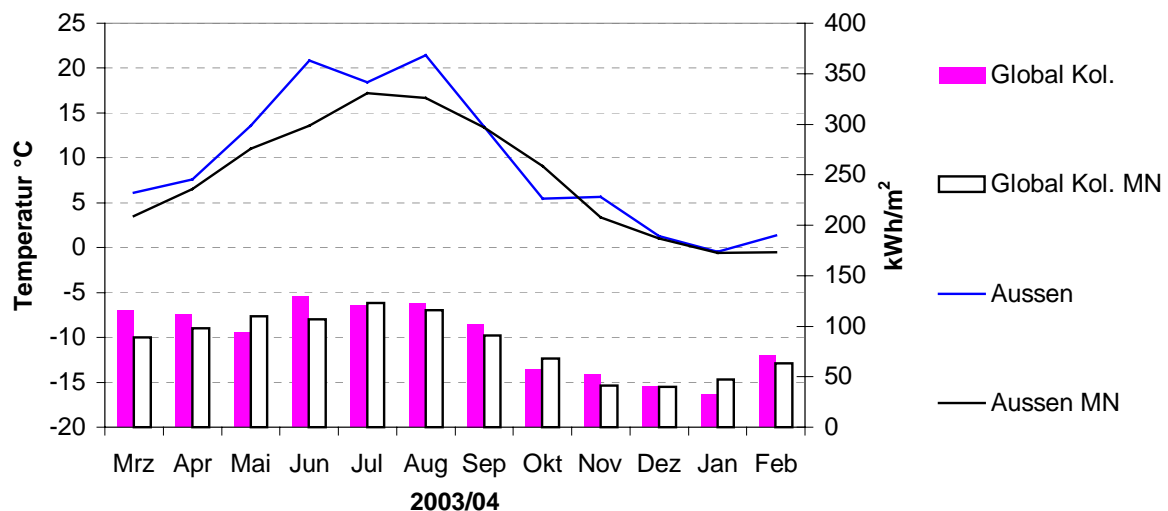


Diagramm 4-1: Vergleich der gemessenen Klimawerte Sonnenbestrahlung und der Aussentemperatur mit den langjährigen Mittelwerten nach Meteonorm (MN)
[Dh-monatsauswertung.xls, Klima]

März	sehr sonnig
Juni	sehr sonnig und sehr warm
August	sehr warm und sonnig
Oktober	zu kalt und eher wenig Sonne
Januar	wenig Sonne

Die Heizsaison (für konventionelle Bauten) reicht von Oktober bis April. Die Aussentemperaturen als auch das Strahlungsangebot waren in der Heizsaison durchschnittlich. Als aussergewöhnliche Monate fallen der Oktober negativ und der März positiv auf.

Fazit: Die Klimawerte zeigen eine durchschnittlich kalte und und durchschnittlich besonnte Heizperiode.. Dies bedeutet, dass der gemessene Heizenergieverbrauch (Holz) als repräsentativ gelten kann. Der Sommer 2003 gilt als "Hitzesommer" und die Sommertauglichkeit des Objekts konnte daher eindeutig belegt werden.

4.2. Beheizungs- bzw. Raumtemperaturniveau

Ebenfalls eine wichtige Randbedingung ist das sogenannte 'Beheizungslevel' des Hauses, bedeutet doch eine Senkung der Raumtemperaturen im Winter um 1 K eine Reduktion des Heizenergiebedarfes um 6 %.

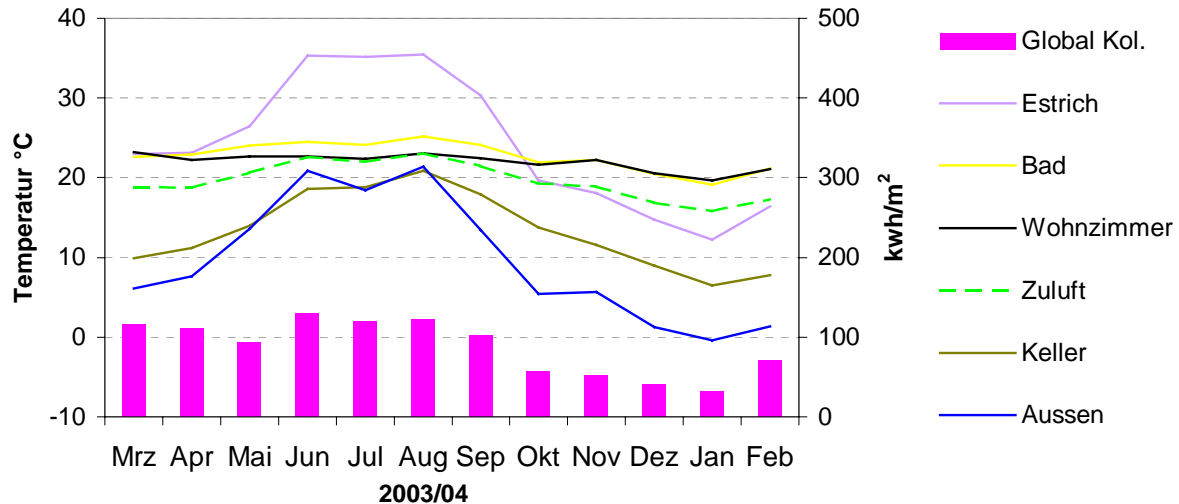


Diagramm 4-2: Raumtemperaturen (Monatsmittel) und die bestimmenden Klimaparameter.
[Dh-monatsauswertung.xls, Raum-Klima]

Generell kann von einer ausreichenden Beheizung des Hauses ausgegangen werden. Selbst im kältesten und sonnenärmsten Monat Januar konnte das Komfortniveau (20 °C) im Durchschnitt gehalten werden. Im Keller (Aussenwände unisoliert, Decke gegen das Erdgeschoss 30 cm Isolation) ist es mit 7 °C erwartungsgemäss sehr kalt.

Im Dezember und vor allem im Januar offenbart sich ein grundsätzliches "Problem" der kontrollierten Lüftung. Die Zulufttemperatur im Januar beträgt nur 16°C. Dies führt in Passivhäusern ohne Zuluftnacherwärmung und ohne eine in jedem Raum wirksame Heizung zu kalten peripheren Zimmern, was für Schlafzimmer angehen mag nicht aber für ein Arbeitszimmer.

4.2.1. Raumtemperaturniveau im Sommer

- Trotz Rekordhitzesommer bleibt die Wohnraumtemperatur unbeeindruckt auf komfortablem Niveau (23°C) und die täglichen Temperaturspitzen sind trotz der grosszügigen Südfensterpartien moderat. (5.4).
- Der Estrich wird als Bypass für die Solarluftanlage benutzt, demzufolge steigen die Temperaturen auf 35 °C. Dies ist dank 20 cm Isolation des Estrichbodens für die darunterliegenden Räume kein Problem. Das die Temperaturen (Bad) trotzdem durchschnittlich 2 K höher sind als im Wohnzimmer liegt an der natürlichen Temperaturschichtung und am fehlen jeder Speichermasse, was die Wirksamkeit einer Auskühlung per "Nachtlüftung" stark einschränkt.
- Der Keller mit seiner grossen, trägen und direkt ans Erdreich gekoppelten Betonmasse erwärmt sich nicht so schnell und im Juni sind die Durchschnittstemperaturen deutlich (3 K) tiefer als Aussen.

4.3. Jahres und Monatsenergiebilanzen

Das Messprojekt wurde Frühjahr 2004 abgeschlossen und die Daten eines ganzen Jahres standen für die Auswertung zur Verfügung. In Diagramm 1-1 (unten) sind die Energieeinträge monatsweise (und aufsummiert für die Heizsaison) dargestellt.

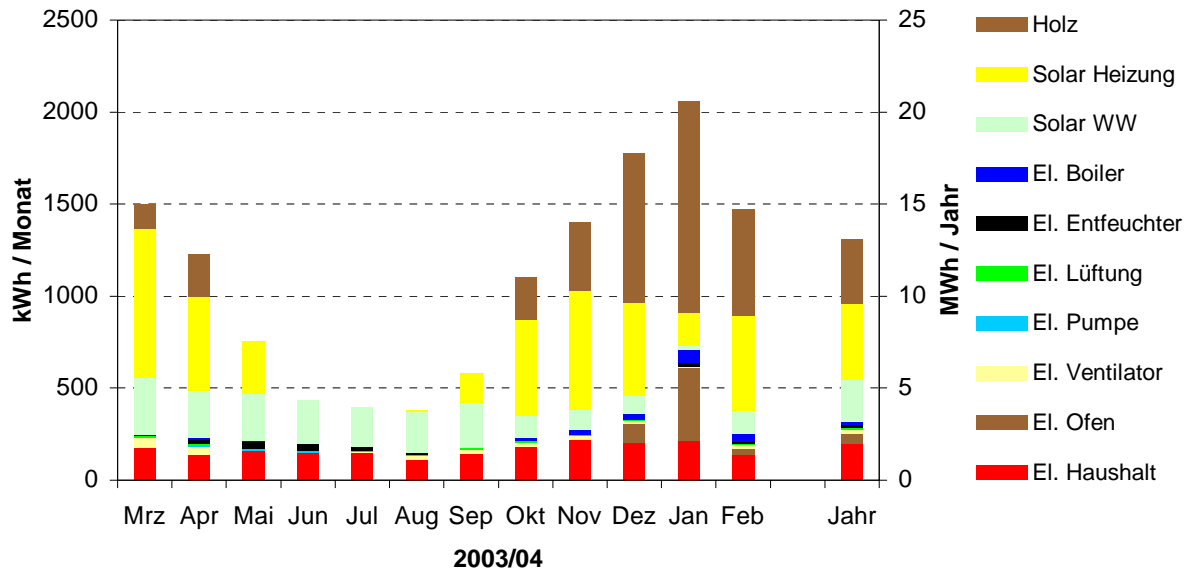


Diagramm 4-3: Energieeinträge [Dh-Monatsauswertung.xls, Energieeintrag]

Um Diagramm 4-3 richtig interpretieren zu können muss [Diagramm 4-2](#) zu Hilfe genommen werden, damit Klima und Beheizungssituation mit einfließen:

- In der Heizperiode sind wiederum die Monate Januar und März bemerkenswert. Im Januar mit minimalen Solarerträgen muss neben dem grossen Holzverbrauch auch noch mit einem kleinen Elektroofen nachgeholfen werden. Auch für das Warmwasser muss zum Teil der Elektroertrag bemüht werden, was aber mehr auf Probleme mit der Thermozyklisation (inzwischen behoben) zurückzuführen ist. Im März hingegen deckt die Sonne praktisch den ganzen Wärmebedarf (Heizung und Warmwasser) ab.
- Von März bis September wird 100% des Warmwasserbedarfes gedeckt.
- In der Jahresbilanz haben die Stromverbräuche von Ventilator (7%), Pumpe (1%), Boiler (7%), Entfeuchter im Keller (5 %) und die kontrollierte Wohnungslüftung (2%) je nur einen kleinen Anteil. Auch der mobile Elektroofen (16%) fällt nicht übermässig ins Gewicht. 2/3 des Stromverbrauches ist "normaler" Haushaltsstrom. Der Gesamtstromverbrauch liegt mit 3200 kWh weit unterhalb des schweizerischen Haushaltsdurchschnittes (5000 kWh).
- In der Jahresbilanz wird 4200 kWh solare Heizwärme und 2200 kWh solares Warmwasser geerntet. Dem gegenüber stehen 3500 kWh Holzenergie (1,6 Ster Laubholz), 500 kWh Elektrisch (Elektroofen) und 200 kWh Elektroertrag (Boiler). Vom Gesamtwärmebedarf (10'600 kWh) werden 60 % Solar, 33% mit Holz und nur 7 % Elektrisch gedeckt.
- Gesamthaft gehen 2/3 der Solarenergie in die Beheizung des Gebäudes und 1/3 ins Warmwasser (Ganzjahresnutzung). Während der Kern-Wintermonate November bis Februar ist dieses Verhältnis 84 % Solarheizung zu 16 % Solarwarmwasser.
- Der solare Deckungsgrad (Heizung und Warmwasser) beträgt 58 %, und der spezifische Kollektorertrag ist mit 210 kWh/m² für einen selektiven Luftkollektor in einem mässig sonnigen Klima ein guter Wert.
- Die Leistung des Luft-Wasser-Wärmetauscher ist ausreichend und in Schönwetterperioden beträgt der solare Deckungsgrad für das Warmwasser 100 %.

4.3.1. Energiekennzahlen

Holzverbrauch

Der Holzverbrauch wurde in kg ermittelt (815 kg). Als Brennwert H_u wurde der übliche Wert von 4.3 kWh/kg eingesetzt (stark vom unbekannten Feuchtigkeitsgehalt abhängig), was einen Energieinhalt von **3500 kWh** ergibt.

Elektrizität zur Wärmeerzeugung

Der Stromverbrauch zur Wärmeerzeugung (Raumnachheizung (520 kWh), Boilernachheizung (220 kWh), Ventilator (240 kWh) und Pumpe (35 kWh) beträgt gesamthaft **1015 kWh**.

Gewichtete Energiekennzahl Wärme

Der einzige Standard, der die "gewichtete Energiekennzahl Wärme" für die dem Gebäude zugeführte hochwertige Endenergie (Holz, Strom) kennt, ist der Minergiestandard. Dabei ist der Elektrizitätsbedarf zur Wärmeerzeugung *doppelt zu gewichten*, Biomasse (Holz) jedoch *nur zur Hälfte*.

3500 kWh Holzenergie zur Hälfte gewichtet und 1015 kWh Elektrizität zur Wärmeerzeugung doppelt gewichtet, ergibt ein Total von 5530 kWh und bei einer Energiebezugsfläche von 171 m² resultiert eine **gewichtete Energiekennzahl Wärme** von **22 kWh/m²**. Der Minergie-P-Standard (30 kWh/m²) wird um 25 % unterboten.

Minergie-P ist, wie alle Gebäudestandards, ein Planungswert, der in diesem Falle in der Praxis grosszügig unterboten werden konnte. Dies ist gemäss der vergleichenden Studie über Passivhäuser der ZTL in Horw (2004) alles andere als selbstverständlich. Im vorliegenden Fall kann dies darauf zurückgeführt werden, dass trotz der z.T. mangelhaften Gebäudehülle (Luftdichtigkeit, Fenster, Wärmebrücken) und dem daraus folgenden doppelt so hohen Wärmeleistungsbedarf (20 W/m² statt 10 W/m²), dank dem grossen Energieertrag des solaren Luftsystems und dank der Deckung des kleinen Restwärmebedarfes vorwiegend aus Biomasse (Holz) der Grenzwerte von Minergie-P bezüglich des Wärmeenergieverbrauches problemlos eingehalten werden.

Beim Minergie-Standard werden auch Anforderungen an den Haushaltsstrombedarf (Fremdbezug) gemacht:

	kWh	kWh/m ² a	Minergie	unterschritten um
Gesamt	3215	19		
abz. "für Wärme"	1015			
Haushaltsstrom	2200	13	17	24 %

Tabelle 4-1: Haushaltsstrom und Minergie (Vergleich)

Nachdem bereits der gesamte Stromverbrauch etwa 35 % unter jenem einer vergleichbaren schweizerischen Durchschnittsfamilie (5000 kWh) liegt, unterbietet auch der Haushaltsstrombedarf den Minergie-Grenzwert um 24%.

5. Gebäude- und Systemverhalten als Reaktion auf das Klima

5.1. Verhalten im Winter

5.1.1. Luftkreislauf

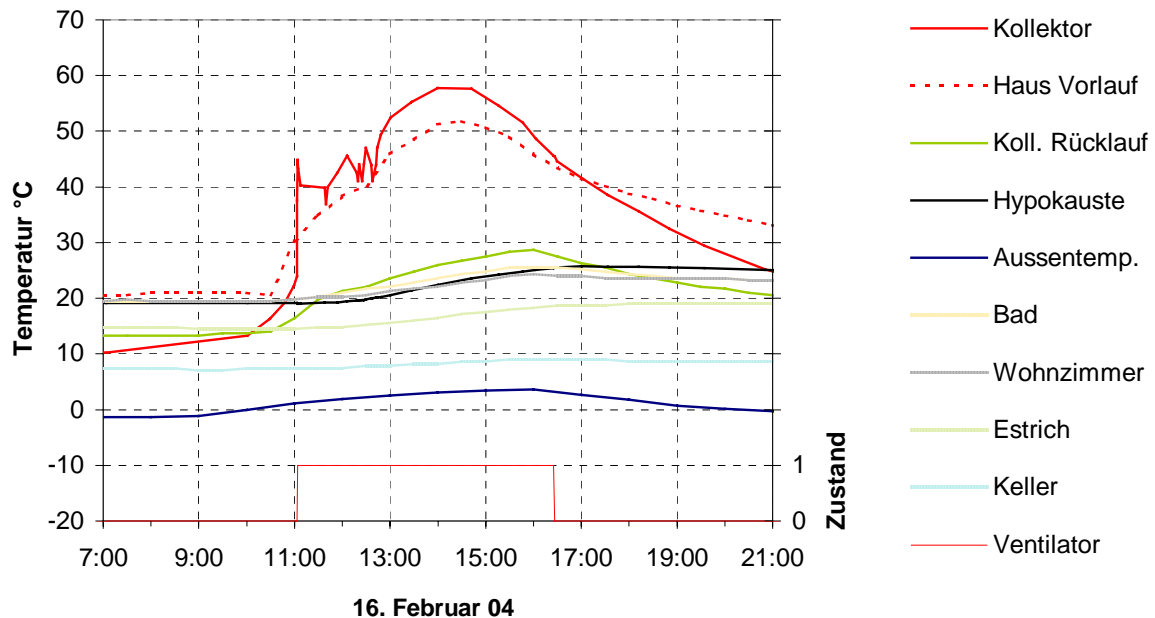


Diagramm 5-1: Verhalten des Luftkreislaufes an einem sonnigen Wintertag

- **11:00.** Durch die SW-Orientierung, die bewusst relativ gross eingestellte Schaltdifferenz zwischen Kollektor und Speicher (10K), sowie die relativ grosse Trägheit der selektiven Aluminiumbleche des Kollektors, wird das System erst spät in Betrieb genommen, liefert dann aber sofort 40°C .
- **12:00.** Einige vorüberziehende Wolkenfelder mögen den Dauerbetrieb des Kollektors auf hohem Niveau nicht zu gefährden. Die Temperaturen im Haus, im Hypokaustenspeicher sowie der Kollektorrücklauf liegen bei 20 °C.
- **14:00.** Das Maximum der Kollektortemperaturen (58°C) ist bei einem inzwischen wieder wolkenlosen Himmel erreicht. Die Hypokauste 22°C konnte bereits geladen werden und infolge der angewärmten Hypokauste steigen auch die Kollektorrücklauftemperaturen (26°C) an. Wohnzimmer und Bad mit ihren grosszügigen Südverglasungen liegen bei 22°C.
- **16:00.** Das Maximum der Kollektorrücklauftemperaturen (29°C), des Bades (26°C) und des Wohnzimmers 24°C ist erreicht.
- **16:30.** (Sonnenuntergang). Der Kollektor stellt seinen Betrieb ein. Die Hypokauste ist mit 26°C gut geladen. Der Estrich-Pufferaum hat sich während des Tages durch die Abwärme der Installationen des Solaren Luftsystems leicht von 15 °C auf 19°C erhöht, der Wärmeverlust des Obergeschosses durch das Dach ist in den Folgestunden praktisch 0. Der massive unisolierte Keller hat erwartungsgemäss ganztags praktisch dieselben (kalten) Temperaturen (9°C).
- **19:00.** Das Badezimmer hat sich von 26 °C auf 23 °C abgekühlt, während die Wohnzimmertemperatur nur von 24 auf 23 °C zurückging und auch in der Folge praktisch konstant bleibt. Hier zeigt sich der Einfluss der Hypokauste, welche die Temperatur auf diesem Niveau zu halten vermag.

5.1.2. Wasserkreislauf

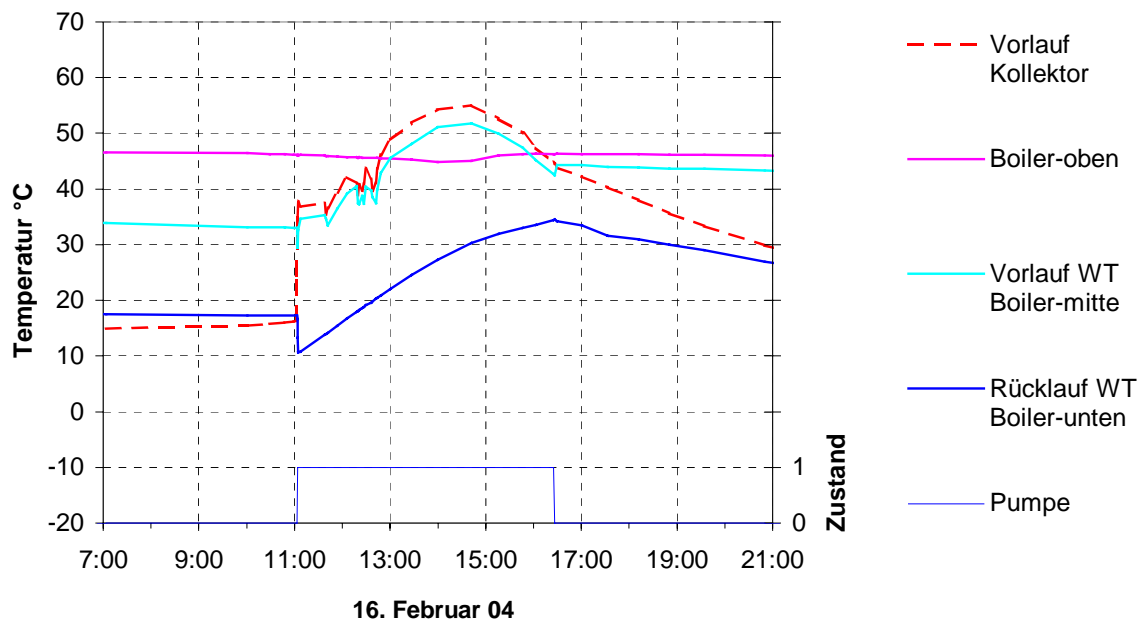


Diagramm 5-2: Verhalten des Wasserkreislaufes an einem sonnigen Wintertag

- **11:00.** Die Pumpe geht (gesteuert durch die Temperaturdifferenz (7 K) zwischen Kollektor-vorlauf und Boiler unten) praktisch zur gleichen Zeit wie der Ventilator in Betrieb. Sofort kann der Boiler in der unteren Hälfte kräftig geladen werden, wie sich am Anstieg der Temperaturen Boiler-mitte und –unten ablesen lässt.
- **12:00.** Die vorüberziehenden Wolkenfelder mögen auch hier den Dauerbetrieb nicht zu gefährden.
- **13:00.** Die Temperatur des eingespiesenen, solar erwärmten Wassers übersteigt die Temperatur im Boiler-oben.
- **14:00.** Das Maximum der Vorlauftemperatur Boiler-mitte (52°C) ist erreicht und liegt 7K über der Temperatur Boiler-oben. Somit kann in Folge auch diese Temperatur angehoben werden.
- **15:30.** Infolge sinkender Einstrahlungsintensität unterschreitet die Vorlauftemperatur wieder die Temperatur Boiler-oben, der untere Teil des Boilers wird aber nach wie vor geladen wie die steigenden Temperaturen Boiler-unten zeigen.
- **16:30.** Die Pumpe stellt ihren Betrieb ein. Der Boiler konnte nicht nur sein Temperaturniveau Boiler oben halten, sondern wurde vor allem im mittleren und unteren Teil kräftig geladen. Der gleichmässige Anstieg der Temperatur Boiler-unten zeigt, dass während der Betriebszeit keine grösseren Zapfvorgänge stattgefunden haben.

Fazit: Der Winterbetrieb dauert gut 5 Stunden (SW-Orientierung) und kann sowohl luft- als auch wasserseitig als sehr erfolgreich eingestuft werden. Während das Luftsystem eine echte Beheizung des Hauses ermöglicht, entspricht der Wasserkreislauf einer effizienten Warmwasservorwärmung.

5.2. Verhalten in der Übergangszeit

5.2.1. Luftkreislauf

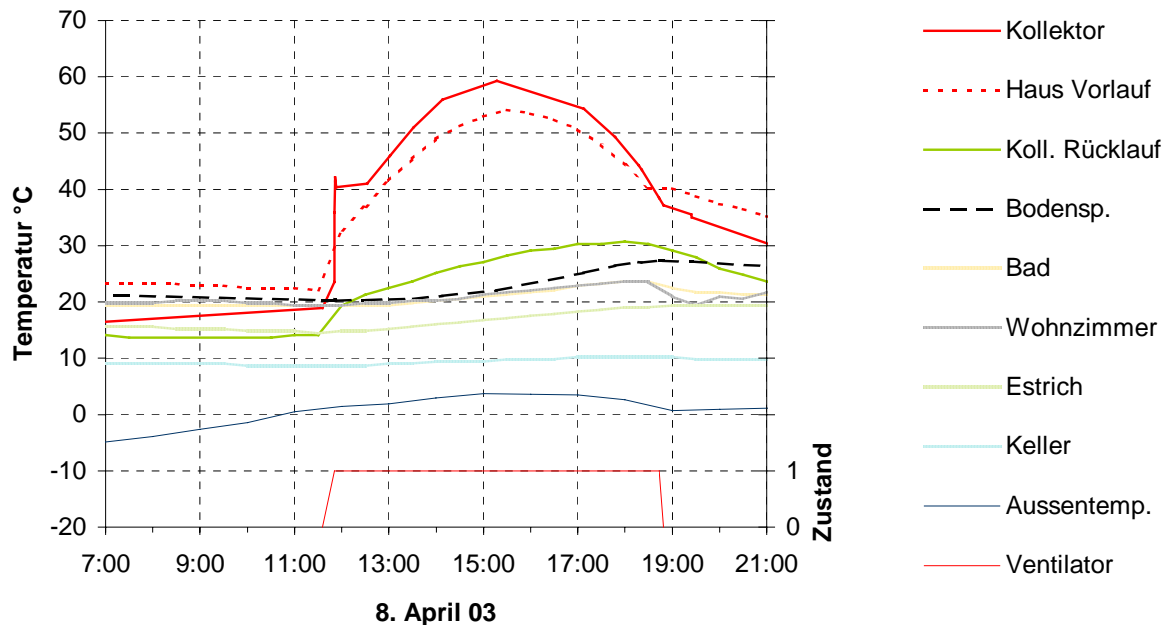


Diagramm 5-3: Verhalten des Luftkreislaufes an einem sonnigen Frühlingstag

Durch die steile Kollektorneigung (70°C) welche auch im Winter guter Leistungen erbringt besteht der Hauptunterschied darin, dass die Betriebszeiten durch den späteren Sonnenuntergang wesentlich länger sind.

- **11:30.** Durch die SW-Orientierung und den steilen Kollektor erreicht die Sonne den Kollektor erst gegen Mittag und das System wird sogar noch eine halbe Stunde später in Betrieb genommen als im Winter, liefert dann aber wiederum sofort 40°C .
- **15:00.** Das Maximum der Kollektortemperaturen (59°C) ist erreicht. Die Hypokauste 22°C konnte bereits geladen werden und infolge der angewärmten Hypokauste steigen auch die Kollektorrücklauftemperaturen (26°C) an. Wohnzimmer und Bad mit ihren grosszügigen Südverglasungen liegen bei 22°C .
- **18:00.** Das Maximum der Kollektorrücklauftemperaturen (31°C), des Bades (24°C) und des Wohnzimmers 24°C ist erreicht. Das Bad und Wohnzimmer nicht noch höher ansteigen ist auf aktive Beschattungsmassnahmen der Bewohner zurückzuführen.
- **18:45.** (Sonnenuntergang). Der Kollektor stellt seinen Betrieb ein. Die Hypokauste ist mit 27°C sehr gut geladen. Den Bewohnern sind die warmen Füsse bei 24°C aber zuviel und es wird in der Folge kräftig gelüftet. Der Estrich-Pufferaum hat sich während des Tages durch die Abwärme der Installationen des Solaren Luftsystems leicht von 15°C auf 20°C erhöht, der Wärmeverlust des Obergeschosses durch das Dach ist in den Folgestunden 0. Der unisolierte Keller hat (wie im Winter) ganztags praktisch dieselben (kalten) Temperaturen (10°C).
- **19:30.** Das Badezimmer hat sich von 24°C auf 22°C abgekühlt. Die Wohnzimmertemperatur steigt nach kräftigem Durchlüften schon wieder leicht an, was auf den Einfluss der Hypokauste zurückzuführen ist.

5.2.2. Wasserkreislauf

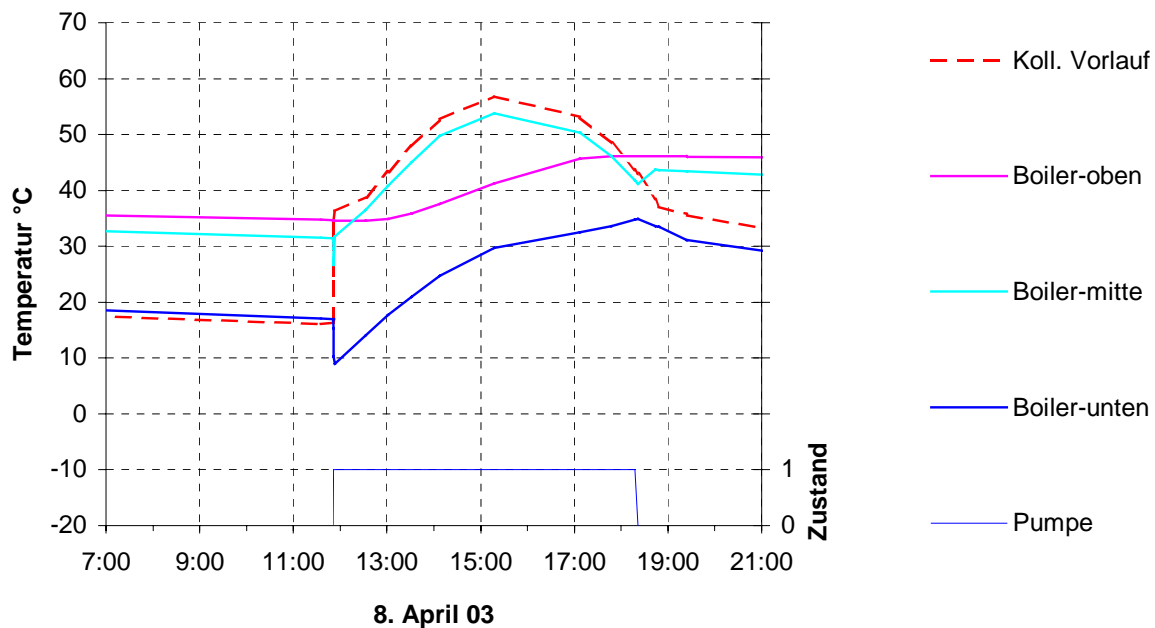


Diagramm 5-4: Verhalten des Wasserkreislaufes an einem sonnigen Frühlingstag

- **11:30.** Die Pumpe geht in Betrieb. Sofort kann der Boiler in der unteren Hälfte kräftig geladen werden, wie sich am Anstieg der Temperaturen Boiler-mitte und –unten ablesen lässt.
- **13:00.** Die Temperatur des eingespiesenen, solar erwärmten Wassers übersteigt die Temperatur im Boiler-oben bereits um 6K, so dass, dank dem der Boiler am Vorabend entladen wurde (Boiler oben 35 °C), jetzt auch die Temperatur Boiler oben zu steigen beginnt und daher das ganze Boilervolumen in den Ladevorgang einbezogen wird.
- **15:00.** Das Maximum der Vorlauftemperatur Boiler-mitte (54°C) ist erreicht, 2K mehr als im vorgängig erläuterten Wintertag.
- **17:45.** Infolge sinkender Einstrahlungsintensität unterschreitet die Vorlauftemperatur wieder die Temperatur Boiler-oben, der untere Teil des Boilers wird aber nach wie vor geladen wie die steigenden Temperaturen Boiler-unten zeigen.
- **18:15.** Eine halbe Stunde vor dem Kollektor stellt die Pumpe ihren Betrieb ein. Der Boiler wurde vor allem im mittleren und unteren Teil wiederum kräftig geladen (wie im Winter). Ausserdem konnte das Temperaturniveau Boiler oben (47°C) um 12 °C gegenüber dem Morgen gesteigert werden. Der gleichmässige Anstieg der Temperatur Boiler-unten zeigt wiederum, dass während der Betriebszeit keine grösseren Zapfvorgänge stattgefunden haben.

Fazit: In der Übergangszeit sind die Temperaturverläufe dank dem 70° geneigten Kollektor praktisch identisch. Dank der längeren Betriebszeit (+ 2h) kann aber einiges mehr an Energie geerntet werden.

5.3. Kollektorwirkungsgrad

Anhand der Auswertung der vorgestellten Tage im Winter und in der Übergangszeit konnte folgende Systemleistung ermittelt werden

	16.2.04	8. 4. 03
Aussentemperatur (Ø)	+ 2.9°C	+2.9 °C
Betriebsdauer Ventilator:	5 h	7 h
Solarstrahlung Kollektorebene	97.2 kWh	130 kWh
Systemertrag	53.5 kWh*	68.4 kWh**
Max. Leistung (14 ⁰⁰)	12.4 kW	11.6 kW
Wirkungsgrad (Ø)	55 %	52 %

* davon Warmwasser 7.8 kWh (15 %); ** davon Warmwasser 10 kWh (15 %)

Tabelle 5-1: Kollektorwirkungsgrad

Die maximale Leistung des Solarsystems liegt mit 12 kW im Durchschnitt früherer Projekte, allerdings konnte diese Leistung mit wesentlich kleinerer Kollektorfläche erbracht werden, was sich im deutlich höheren Wirkungsgrad (55 % statt 35 %) äussert. Dies dank dem Einsatz der umströmten selektiven Bleche.

Der Warmwasseranteil an der Wärmeleistung entspricht mit 15 % ebenfalls der Erfahrung.

Fazit: Der Einsatz selektiver, umströmter Absorberbleche anstelle von nichtselektiven, nur überströmten Absorbern steigert den Wirkungsgrad des Kollektors um 60 %.

5.4. Sommerliches Temperaturverhalten

Analog zu den vorangegangenen Kapiteln, in denen das Verhalten im Winter und in der Übergangszeit dargestellt wurden, soll hier wiederum eine extreme Sommerperiode herangezogen werden. Im Messjahr war gerade diese Schönwetterperiode die wärmste, mit Aussentemperaturen die jeden Tag 30 °C erreichten oder überstiegen und deren Nachttemperaturen nie unter 20 °C sanken (Mitteltemperatur 25,4°C), was für diese Höhenlage (800 M.ü.M.) ausserordentlich warm ist (der Sommer 2003 gilt als eigentlicher Hitzesommer). Es ist in dieser Periode daher gut möglich, den Sommerkomfort zu beurteilen, zumal der August auch wegen des schon wieder flacheren Sonnenstandes als "kritisch" bezüglich der grossen Südverglasung gilt.

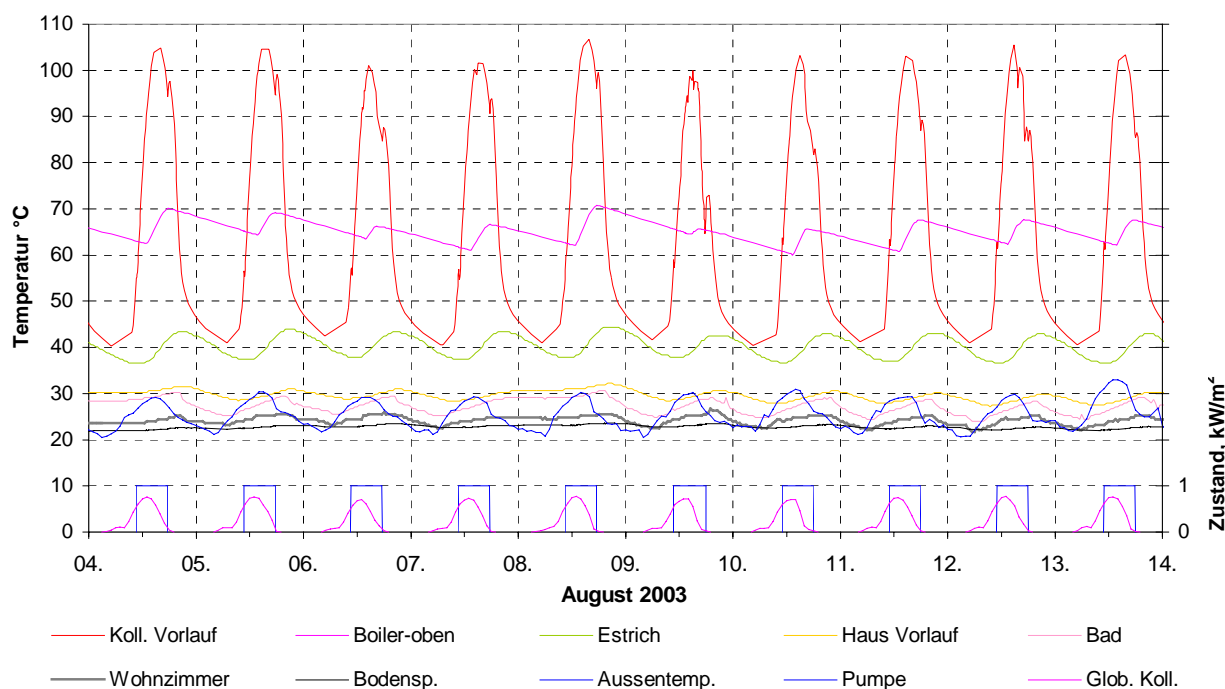


Diagramm 5-5: Temperaturverläufe der wichtigsten Messgrössen während einer 10 Tage Periode im Sommer 2003 [H0308.xls, Woche 2-3].

Das solare Luftsystem befand sich im Sommerbetrieb (Kapitel 2.10.2). Da die Luft nicht durchs Gebäude zirkuliert, ist die Kollektorrücklauftemperatur und der Ventilator (ausser Betrieb) nicht dargestellt. Der Vergleich mit der Winterperiode (5.1) und der Übergangszeit (5.2) ergibt Folgendes:

- **Kollektorvorlauf.** Erreicht täglich 100 - 105 °C, was bei 30 °C Aussentemperatur doch einen Temperaturunterschied von 70 °C entspricht, 30 °C mehr als in der Übergangszeit. Der sich rein durch thermischen Auftrieb einstellende Luftdurchsatz wurde nicht ermittelt, analoge Situationen (Lit. 3) ergaben etwa 350 m³/h, was immerhin ¼ des Ventilatorbetriebes ist. Im vorliegenden Fall ist jedoch eher mit ca. 200 m³/h zu rechnen, da der thermische Auftrieb durch den über den Dachraum geschlossenen Kollektorkreislauf sehr viel geringer ist, als in offenen Systemen.
- **Boiler-oben.** Liegt diese Temperatur im Winter und in der Übergangszeit bei etwa 45 °C, so beträgt diese in der sommerlichen Schönwetterperiode 60 – 70 °C. Damit ist das System richtig ausgelegt, da höhere Temperaturen ein (unnötiges) Verkalkungs- und Verbrühungs-

risiko darstellen. Der Boiler ist in dieser Periode jeweils "durchgeladen" Boiler-mitte (60°C) und Boiler-unten (43 °C) Mitteltemperatur (in Diagramm 5-1 nicht dargestellt).

- *Bodenspeicher.* Dieser hat auch im Sommer eine wichtige Funktion als thermische Ausgleichsmasse (praktisch konstant auf 23 °C). Durch die direkte Raumankopplung (Steinplattenbelag) werden die Temperaturschwankungen vor allem im Wohnzimmer minimiert und die Hypokauste lässt sich gut zur "Nachtauskühlung" verwenden, was besonders für ein "Holzhaus" von ausschlaggebender Bedeutung ist.
- *Wohnzimmer.* Diese Temperatur schwankt dank der "Masse" nur minim und in angenehmem Rahmen (22 – 26 °C). Die Mitteltemperatur im Wohnzimmer betrug 24,2 °C - 1,2 K unter der mittleren Aussentemperatur. Es lässt sich am Verlauf der Wohnzimmertemperatur gut ablesen, dass sowohl die Beschattung der Südfenster stattfand, als auch eine Nacht-(Fenster) -Lüftung (diese unterblieb nur bei Abwesenheit – 7./8. August). Damit ist erwiesen, dass trotz intensiver Sonneneinstrahlung und grosser Südverglasung durch Beschattungs- und Nachtauskühlungsmassnahmen und dank des massiven Erdgeschossbodens auch in einem Holzhaus ein "Kühleffekt" erzeugt werden kann.
- *Bad.* Das Bad hat während Hitzeperioden folgende Nachteile: 1. produziert der durchgeladene Boiler Abwärme. 2. verfügt das OG über keine massiven Bauteile, welche eine Nachtauskühlung mit "Speichereffekt" ermöglichen würde. 3. "Wärme steigt" und daher sind OG's tendenziell kritischer. 4. Im Estrich (siehe unten) ist es 40 °C warm, was trotz guter Isolation (20 cm) etwas "durchdrückt"; dieser Effekt ist allerdings sehr klein und entspricht einer dauernd eingeschalteten 20 Watt-Leuchte. Die Mitteltemperatur (27.3 °C) des Bades liegt 3 K über jener des Wohnzimmers, dies ist für ein Badezimmer aber kein Problem.
- *Estrich.* Dieser wird als geschlossener Rücklaufkanal genutzt und hat entsprechend hohe Temperaturen (40 °C). Obwohl dank der guten Isolation praktisch keine Abwärme in die Wohnräume gelangt, wäre ein Belüftungsmöglichkeit über die Stirnseiten vorteilhaft.
- *Haus Vorlauf.* Dieser moderate Temperaturverlauf verdeutlicht die Wichtigkeit der Klappen, welche erfolgreich die hohen Kollektortemperaturen vom Haus fernhalten.

Bei Abwesenheit der Bewohner (7./8. August) ist das Haus ohne Nachtauskühlung und das Solarsystem sich selbst überlassen. Während die Wohnzimmertemperatur bei 25 °C gehalten wird, legt das Badezimmer noch 2 K zu. Die Boilertemperatur erreicht aber mit 70 °C ähnliche Spitzenwerte wie zu bewohnten Zeiten, was soviel bedeutet, dass bei 70 bis 75 °C Boilertemperatur ein Gleichgewicht zwischen Gewinnen und Verlusten herrscht. Somit besteht (auch im Wärmetauscher) kein Verdampfungsrisiko.

Fazit: Das sommerliche Temperaturverhalten ist geprägt durch den ventilatorlosen Betrieb, welcher trotz geschlossenem Kreislauf und vorwiegend horizontaler Luftführung gut funktioniert und hohe Vorlauftemperaturen zur Folge hat. Damit ist bei Schönwetterperioden mehr als genug Warmwasser vorhanden.

Das Gebäude selber besitzt dank der Masse des Erdgeschossbodens (Hypokauste) und der direkten Raumankopplung des Steinplattenbelages ein sehr gutes "Hitzeverhalten" was für eine Leichtbauweise (Holzhaus) eine ausserordentlich positive Eigenschaft ist.

5.4.1. Warmwasser

Um den Vergleich mit dem Winterbetrieb (5.1.2) und der Übergangszeit (5.2.2) zu ermöglichen wurde ein sonniger Tag aus einer durchschnittlichen Sommerperiode mit hohem Sonnenstand gewählt:

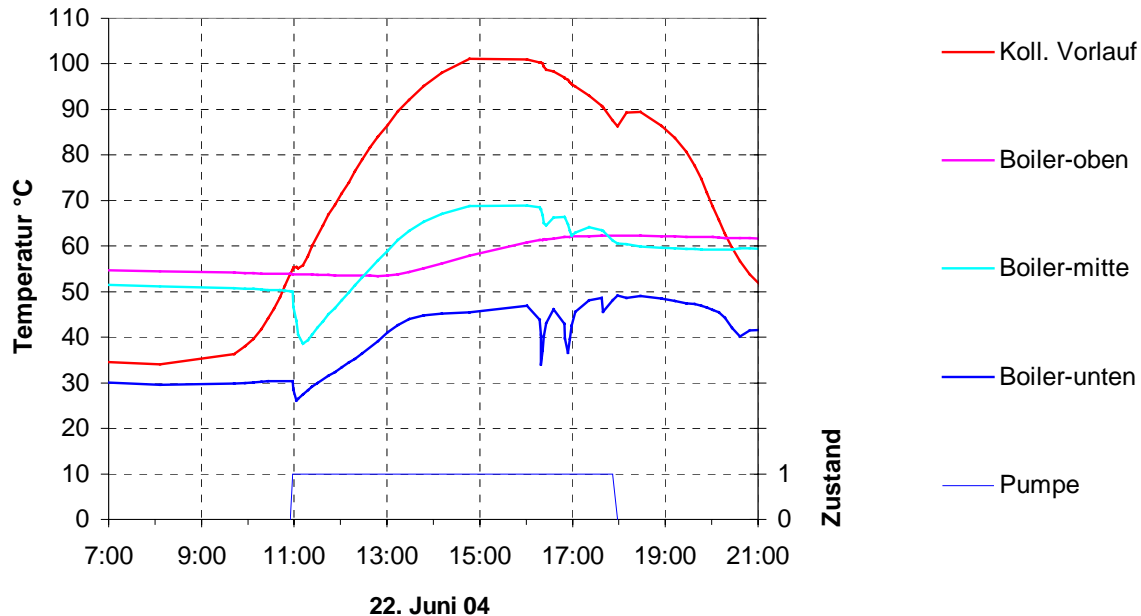


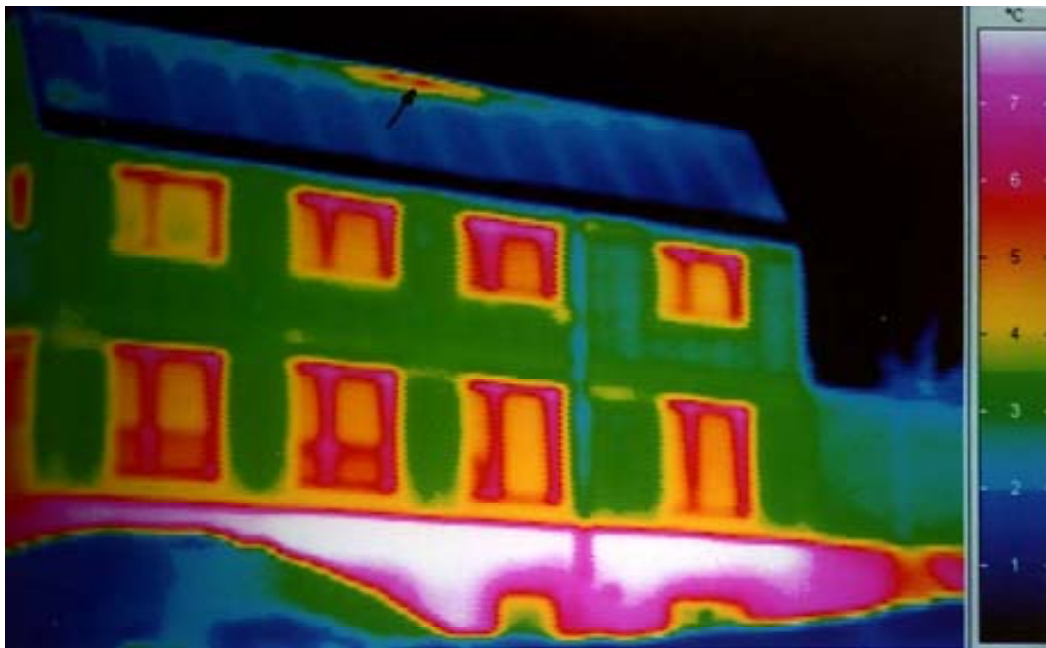
Diagramm 5-6: Temperaturen am Luft-/ Wasser – Wärmetauscher im Sommer
[H030622.xls; 22.6. WW]

Die Kollektorvorlauftemperatur steigt auf hohe Werte (100 °C), da bei dem ventilatorlosen Betrieb nur ca. 200 m³/h Luft zirkulieren werden. Die Vorlauftemperatur des Solarboilers ("Boiler-mitte") bleibt daher 30 K unter der Kollektorvorlauftemperatur, da der Wasserdurchsatz (Pumpe) nach wie vor derselbe ist (1 lt/min). Die Betriebszeit der Pumpe beträgt wie in der Übergangszeit 7h.

- **11:00** Relativ spät, "dank" der SW-Orientierung (und zur selben Zeit wie im Winter und Übergangszeit) geht die Ladepumpe in Betrieb. Der untere und mittlere Teil des Boilers (Solarbereich) wird kräftig geladen.
- **13:00** Da "Boiler-oben" noch vom Vortag recht warm ist (54 °C), übersteigt die Vorlauftemperatur ("Boiler-mitte") diesen Wert erst jetzt deutlich und der Ladevorgang beginnt auch "nach oben" zu wirken.
- **15:00** Die Maxima der Vorlauftemperaturen (100 °C Luft und 70 °C Wasser) sind erreicht. Der Solarboiler wird auf allen Ebenen geladen.
- **16:15** Durch kräftige Zapfvorgänge (vermutlich für ein Vollbad für das Kind) wird kaltes Wasser nachgespiesen, was sich vor allem auf die Temperatur Boiler-unten auswirkt.
- **18:00** Nach dem Abstellen der Pumpe messen sowohl "Boiler-mitte" als auch "Boiler-unten" die entsprechende Schichttemperatur. In der oberen Hälfte (bis unter die Mitte) 60 °C, unten 50 °C. Der Boiler ist durchgeladen.

Fazit: Der Vorgang der Warmwassererzeugung durch das solare Luftsystem im passiven Betrieb ohne Ventilator (nur thermischen Auftrieb) verläuft sehr gut, mit hoher Effizienz und Wirksamkeit.

6. Überprüfung der GRATEC-Isolation mittels Infrarotaufnahmen



Wie schon in der Zusammenfassung erwähnt musste sich die Überprüfung der Isolationsgüte auf das Aufspüren von sogenannten Wärmelöchern beschränken. Dabei zeigen die Erstaufnahmen im Februar 03 neben den rein konstruktiven Wärmebrücken gegebenenfalls Probleme, welche durch lückenhaftes Ausblasen entstehen. Die Zweitaufnahmen nach 2 Jahren im Dezember 04 zeigen dann an, welche konstruktiven Wärmebrücken entschärft werden konnten und ob Setzungsbewegungen der Isolation zusätzliche oder grössere Wärmelöcher verursachen. Berücksichtigt werden muss die Tatsache, dass bei hochisolierten Gebäuden Wärmebrücken einen relativ viel grösseren Einfluss haben, und daher bei der Infrarotaufnahme auch krasser sichtbar sind, als bei wenig- oder gar unisolierten Gebäuden.

Zur "richtigen" Interpretation der Wärmebilder muss folgendes beachtet werden:

- Beide Aufnahmen wurden zwar morgens um 07:00 getätigt, aber bei unterschiedlichen Aussentemperaturen (+2°C, - 6°C).
- Die Temperaturspreizung der Skala ist unterschiedlich, weshalb mit Vorteil auf die relativen Unterschiede geachtet wird. Auch sind vor allem die deutlichen Temperaturunterschiede massgebend, da kleine Unterschiede ($\pm 1^\circ\text{C}$) zwar bereits einen Farbwechsel provozieren können der aber so viele und unterschiedliche Gründe haben kann, dass gerne "überinterpretiert" wird.
- Die atmosphärischen Bedingungen in der Nacht davor sind unterschiedlich. (Erstaufnahme: Hochnebelartige Bewölkung; Zweitaufnahme: klar). Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre kann selbst zwischen zwei sogenannten "klaren" Nächten sehr unterschiedlich sein was unterschiedliche Wärmeabstrahlung zur Folge hat. Nebel- bzw. Hochnebellagen oder Bewölkung reduzieren die Abstrahlung stark. Je nach diesen "Bedingungen" kann eine Gebäudefläche selbst bei gleicher Aussentemperatur unterschiedliche Oberflächentemperaturen aufweisen.

Auf den folgenden Seiten ist jeweils der Fassadenausschnitt als Tageslichtaufnahme im sichtbaren Bereich und die zwei Infrarotaufnahmen Februar 03 und Dezember 04 untereinander dargestellt.

6.1. Nordfassade Westteil



Beurteilung:

Die grossflächigen Fassadentemperaturen sind sehr regelmässig. Bemerkenswert ist, dass sowohl die Terrasse (ganz rechts und unbeheizt) die gleichen Oberflächentemperaturen aufweist wie der beheizte Teil. Da die Fassade nicht hinterlüftet ist, lässt dies auf eine sehr gute Isolationswirkung des Gratec schliessen.

Im Bereich der Deckenaufleger ist die Isolationsstärke konstruktiv bedingt schwächer, der Effekt aber gering.

Die punktförmige Wärmebrücke (Pfeil) ist 2 Jahre später verschwunden. Da die Konstruktion während des Aufrichtens einmal einem Gewitterregen ausgesetzt war, handelt es sich um eine (erfolgreiche) Austrocknung.

Die linienförmigen Wärmebrücken des Glasrandverbundes des Fensterrahmens, und der Fensterfutterbretter sind dominant.

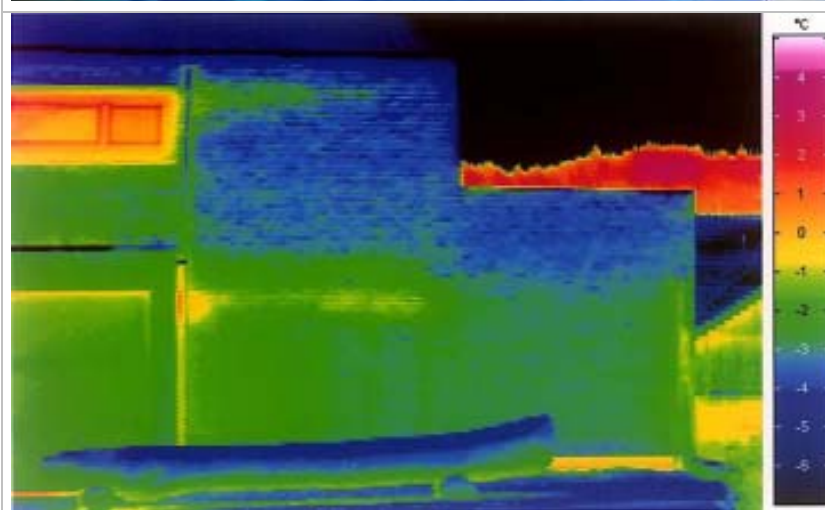
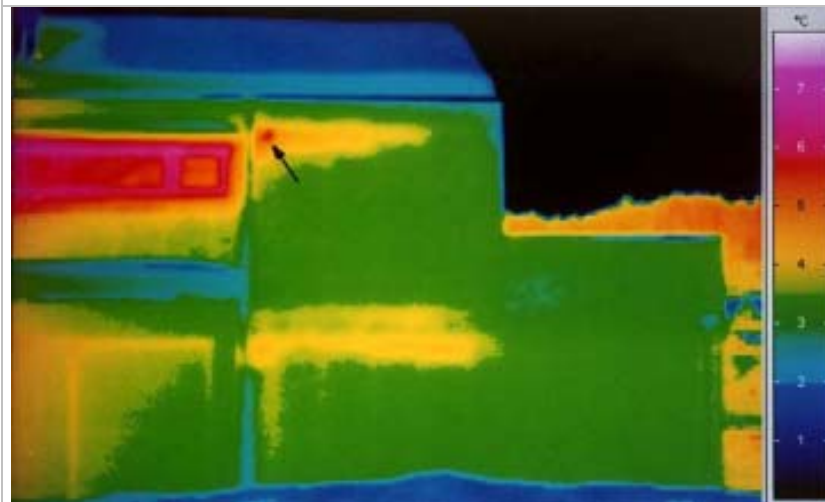


Abbildung 6-1: Thermographie Nordfassade Westteil

6.2. Nordfassade Ostteil-Eingang



Beurteilung:

In Ergänzung zu den Bemerkungen zur Nordfassade Westteil soll hier im Speziellen auf die Eingangstüre eingegangen werden:

Bei den ersten Aufnahmen wurden noch grosse Leckagen im oberen Bereich festgestellt, wo offensichtlich warme Luft austreten kann. Nach einsetzen der eigentlich bestellten, aber nicht montierten 3-Punkt-Anzug-Schliessarmatur und weiteren Dichtungsmassnahmen ist diese Leckage wesentlich kleiner, jedoch immer noch vorhanden.

Der ganze Türbereich stellt eine thermische Schwachstelle dar.

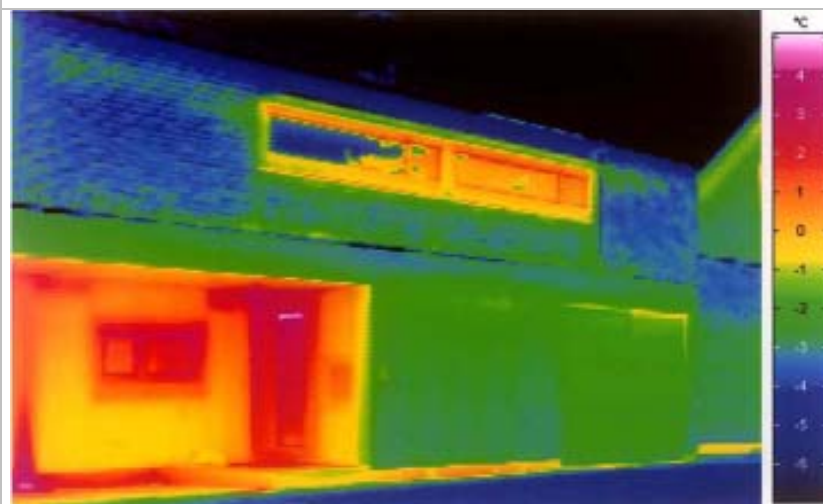
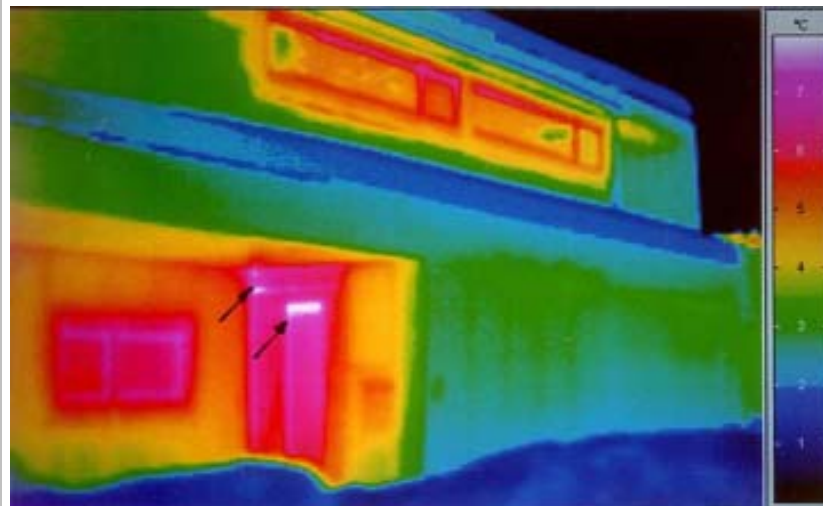


Abbildung 6-2: Thermographie Nordfassade Ostteil und Eingangsbereich.

6.3. Ostfassade



Beurteilung:

Die Situation an der Ostfassade ist unverändert. Beides Mal zeichnet sich die reduzierte Isolationsstärke bei den Deckenauflagern ab. Nur durch die Farbgebung nimmt man subjektiv diese Wärmebrücken in der ersten Aufnahme deutlicher wahr.

Die unveränderte Situation bedeutet jedoch, dass keine Setzbewegungen der Gratec Fasern stattgefunden haben.

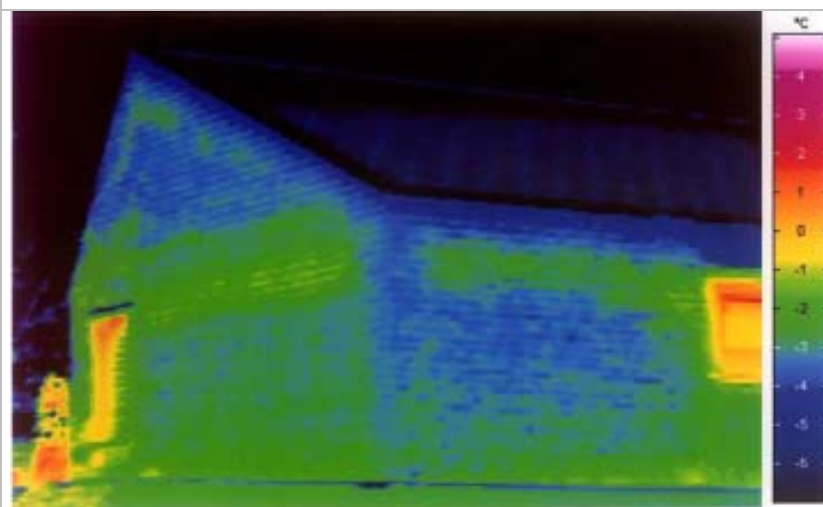
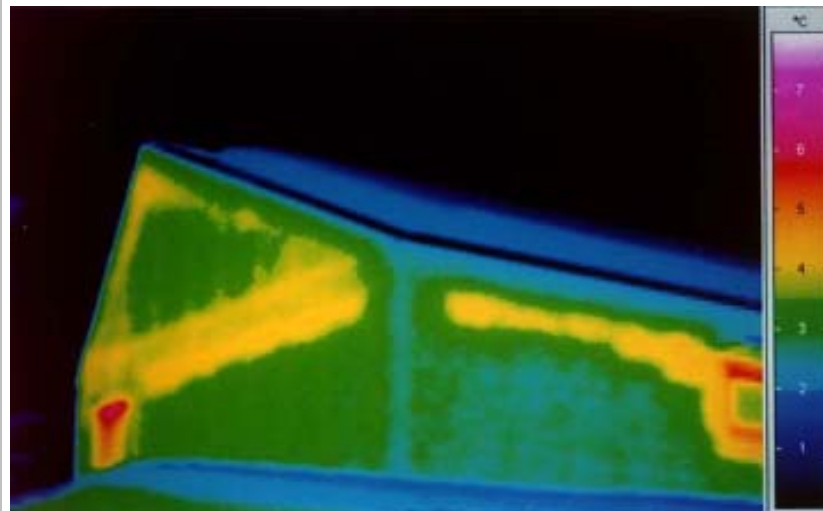


Abbildung 6-3: Thermographie Ostfassade

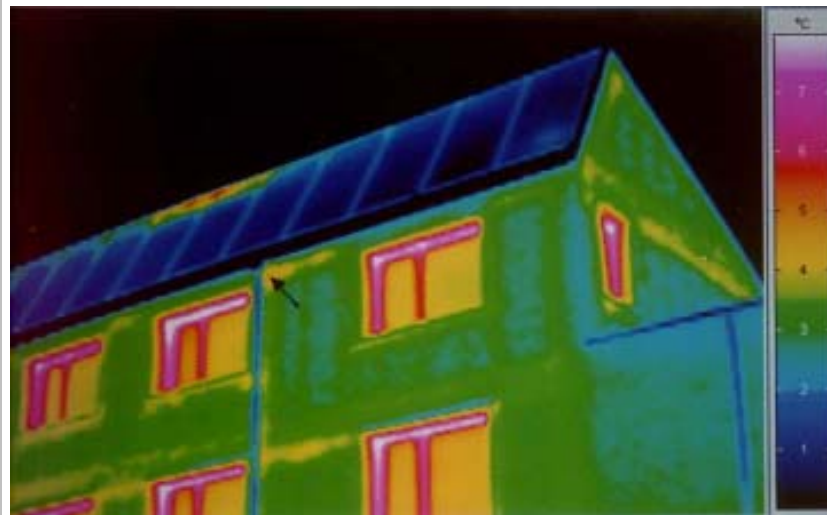
6.4. Südfassade Ostteil



Beurteilung

Auch hier wiederum gut sichtbar ist der relativ homogene Verlauf in der Fläche

Auffallend sind die sehr warmen Randpartien beim Übergang Flügelrahmen – Anschlagrahmen-Fassade, wobei nicht deutlich ist, ob hier die Fensterdichtung oder die Dichtung zwischen Rahmen und Fassade verantwortlich ist



Aus dieser Perspektive konnte keine brauchbare Zweitaufnahme gemacht werden wegen des hohen Bewuchses durch Sträucher.

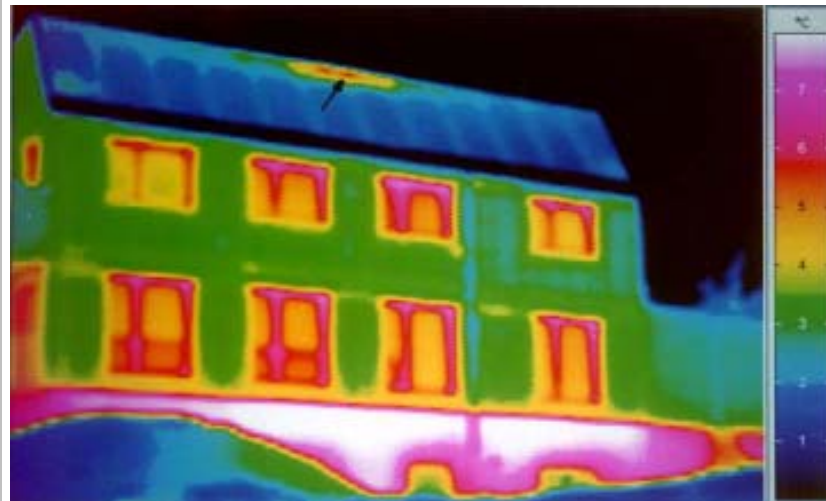
Abbildung 6-4: Thermographie Südfassade Ostteil

6.5. Südfassade



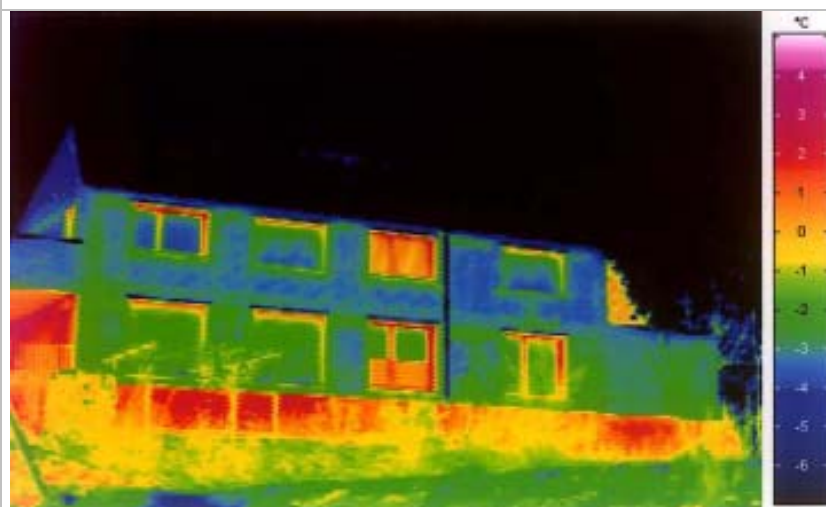
Beurteilung

Der Kollektor ist auf der ersten Thermographieaufnahme zwar kalt, aber deutlich wärmer als auf der zweiten Aufnahme. Dies liegt an der unterschiedlichen Abstrahlung an den Nachthimmel. Bei der ersten Aufnahme waren nicht nur die Aussentemperaturen milder, sondern auch der Himmel hochnebelartig bewölkt, wie auf der Photo im sichtbaren Bereich deutlich erkennbar.



Dass der Dachdurchbruch des Kollektorsturzes deutlich wärmer ist, zwei Jahre später jedoch kaum (mehr) auffällt, ist nicht erklärbar, jedenfalls wird anhand der zweiten Aufnahme deutlich, dass die Klappen ihren Zweck erfüllen, der Kollektor also kalt bleibt und keine unerwünschte Rückkühlung stattfindet.

Wie schon in den vorangegangenen Bildern sind die mit Gratec gedämmten Flächen recht homogen und kühl.



Die Verglasung ($U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$) ist erwartungsgemäss zwar etwas wärmer, wirklich warm sind aber die Wärmebrücken im Rahmenbereich. Die Situation ist 2 Jahre später dieselbe, allerdings bei (ausser im Bad) geschlossenen Lamellenstoren.

Sehr viel wärmer ist erwartungsgemäss der ungedämmte Sockelbereich.

Abbildung 6-5: Thermographie Südfassade

6.6. Westfassade Terrasse



Beurteilung

Auf den Infrarotaufnahmen besser sichtbar als auf der Photo ist die Giebelseite über der Terrasse. Auch hier dasselbe Bild wie an allen Fassaden: Die Flächenisolation mit Gratec ist gut und gleichmässig.

Zusätzlich zu den üblichen Wärmebrücken an den Glas-türen auf die gedeckte Ter-rasse im EG, lassen sich an den ansonsten baugleichen Türen folgende Unterschiede erkennen:

Die hintere Tür und deren obere Rahmenverbreiterung sind generell wärmer als die vordere. Dieser Effekt kann auch auf eine kleinere Wind-exposition und geringere Wärmestrahlungsaus-tauschmöglichkeit im ge-schützteren hinteren Teil der Terrasse zurückzuführen sein. Innenaufnahmen zum gleichen Zeitpunkt der Erst-aufnahme zeigen jedoch deutlich, dass dort auch starke Undichtigkeiten vor-handen sind, welche auch zwei Jahre danach (mindestens zum grossen Teil) noch bestehen.

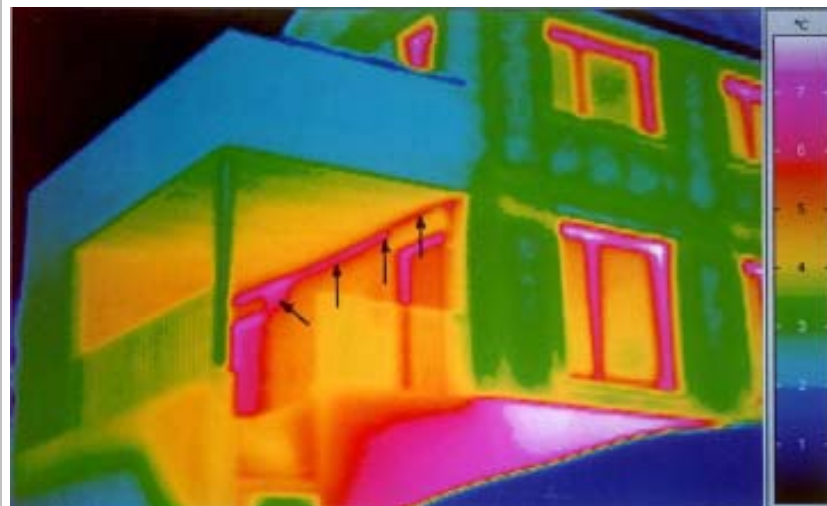


Abbildung 6-6: Thermographie Westfassade-Terrasse

7. Wirtschaftlichkeit

Erstellungskosten Degersheim			
in sFr. ohne Mwst.	Material	Arbeit	Total
Kollektor			10000
Kanäle			4150
Hypokauste			
Konstruktion	65m2 KS		4500
Luftführungs"einlagen"			3500
Subtotal			8000
Ventilation			
Ventilator	3570	2230	5800
Verdrahtung inkl.Steuerung			1600
Subtotal			7400
Warmwasser			
Boiler			4360
Pumpe/Verrohrung Wärmet. ²			1500
Subtotal			5860
Holzheizung			
Holzofen			10830
Verrohrung Boiler			1730
Subtotal			12560
Planung			
Fachplaner			13000
Architekt (Anteil)			8600
Subtotal			21600
Total			69570
davon Solarsystem (60% Planung)			48370
davon Holzheizung (40% Planung)			21200
Ersparnis = konv. Kosten			
Dach-oder Fassadenaufbau			2070
konventioneller Boiler			1500
konventionelle Heizung			27000
konventionelle Fachplanung			2700
Architekt (Anteil)			5500
Total			38770
davon Solarsystem (60% Planung und konv. Heizung)			24690
davon Holzheizung (40% Planung und konv. Heizung)			14080
Mehrkosten			30800
davon Mehrkosten Solarsystem			23680
davon Mehrkosten Holzheizung			7120
¹ inkl. Klappen, Schalldämpfer, usw.			
² Inkl. Ventile, Durchflussmesser, usw.			

Tabelle 7-1: Investitionskosten Heizung und Warmwasser (Solar + Holz). Die Posten "Material" und Arbeit konnten nur in einem Fall aufgeschlüsselt werden, da vorwiegend pauschal offeriert und vergeben wurde. Quelle: H.R. Stutz

Es ist bei solchen Objekten eigentlich wenig sinnvoll, die Holzheizung mit zentralem Einzelofen und die solare Beheizung bezüglich Wirtschaftlichkeit auseinander zu dividieren, da das eine das andere bedingt oder ergänzt. So wird z.B. die Beheizung des Badezimmers primär durch die Abwärme des Solarboilers und die Beheizung des Wohnzimmers erfolgt entweder solar oder mit dem Holzofen. Für die Eigentümer/Bewohner ist es auch unerheblich, hier einen Unterschied zu machen, da sie ja einen Gesamtkostenvergleich machen, und die gewählte Variante auch finanzieren müssen. Das Ziel ist möglichst wenig Holz zu verfeuern (= Kosten und Arbeit), möglichst wenig Fremdstrom zu beziehen (Kosten, Ökologie), also möglichst viel von der Sonne geliefert zu bekommen.

Trotzdem bringt eine detaillierte Analyse einige Erkenntnisse. Vom gesamten Investitionsvolumen "Solar+Holz" (ohne Planung) von 57'000 sFr. entfallen 12'500.-- (22 %) auf die Holzheizung, welche aber rund 33 % der Energie produziert. Das heisst: Die Holzenergie ist in diesem Fall günstiger als die Solarenergie, allerdings nur, wenn man den Aufwand für die Lagerung des Holzes, das Beschicken des Ofens, die Abbrandüberwachung und die Brennstoffkosten ausser acht lässt.

Bei einem gesamten Investitionsaufwand für diesen Gebäude von sFr.800'000.- betrugen die ausgewiesenen Mehrkosten sFr. 31'000.- (4 %) gegenüber einem konventionellen Neubau. Verglichen mit anderen Objekten mit solaren Luftsystemen (5 – 7 %) ist dies günstig.

Der Wärmebedarf beträgt 10'600 kWh/Jahr, die zu 60 % Solar (6'600 kWh/a), zu 33 % mit Holz (3'500 kWh/a) und zu 7 % elektrisch gedeckt werden. Ohne Solaranlage, müsste die dreifache Menge Holz verfeuert und rund 1500 kWh mehr Elektrisch für das Warmwasser aufgewendet werden, da der Ofen nicht nur wegen des Warmwassers eingefeuert würde (Sommer).

	Investitions- kosten	Amortisations- kosten	Hilfsenergie elektrisch kWh	Hilfs- energie Kosten	Service + Unterhalt Kosten	Betriebs- energie kWh	Betriebs- energie Kosten	Total laufende Kosten	Gesamt- kosten	produzierte Energie kWh	Kosten pro kWh
Solar	23'700	921	500	100	20			120	1'041	6'600	0.16
Holz	7'100	276	500	100	70	4'900	240	410	686	3'500	0.20
Solar+Holz	30'800	1'197	1000	200	90	4'900	240	530	1'727	10'100	0.17
Vergleich											
konv. Heizung	27'000	1'551	100	20	200	12'000	605	825	2'376	10'100	0.24
nur Holz	7'100	276	200	40	100	15'000	1'012	1'152	1'428	8'600	0.17
+ Elektro WW						1'500	300	300	300	1'500	0.20
Holz+Elektro											0.17
	Lebens- dauer	Zins	Annuitäts- faktor								
Solar	50	3.00%	0.039				Hilfsenergie	0.2 Fr./kWh			
Holz	50	3.00%	0.039				Holz (Laub)	1.6 Ster	150 Fr./Ster		
								0.3 Fr./kg	0.07 Fr./kWh Hu		
Vergleich								4.3 kWh/kg _{Hu}			
konv. Heizung	25	3.00%	0.057				Öl	0.6 Fr./kg	0.05 Fr./kWh Hu		
								11.9 kWh/kg _{Hu}			

Tabelle 7-2: Wirtschaftlichkeit der Energieträger. Wo nicht anders erwähnt sind die Werte auf ein Jahr bezogen [Energiekosten_Hehli 3.xls].

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hängt stark von der Lebensdauer der Anlageteile ab. Das vorliegende, ortsgebaute Luftkollektorsystem weist problemlos eine Lebensdauer von 50 Jahren auf. Selbst der Ventilator mit nur rund 1'000 Betriebsstunden pro Jahr und der Solarboiler aus Chromnickelstahl liegen dort. Ausserdem liegt ja gerade beim problemlosen Wärmeträger Luft der Unterschied, haben doch wasserbasierende Solarsysteme Lebensdauern von bestenfalls 25 Jahren. Holzöfen (vom Hafner gemauert) erreichen ebenfalls hohe Lebensdauern (> 50 Jahre). Bei industriell hergestellten Heizkessel/Brenner-Kombinationen ist das anders. Dort liegen die Lebensdauern markant tiefer, nicht zuletzt wegen der immer ausgereizteren und diffizileren Technik, trotzdem wurde mit 25 Jahren eine grosszügige Lebensdauer angesetzt.

Tabelle 7-2 zeigt:

- Die Solaranlage liefert (im Vergleich zu ähnlichen Anlagen) mit 16 Rp/kWh sehr preiswert.
- Der Holzofen liegt mit 20 Rp/kWh schon deutlich höher.

Solar und Holz zusammen (17 Rp/kWh) produzieren gleich teuer wie wenn ausschliesslich eine Holzheizung betrieben würde allerdings um den "Preis" des höheren Elektrizitätsverbrauches vor allem für das Warmwasser. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass statt des Kleinst-Ofens ohne Unterstützung des Solarsystems wohl aus Komfortgründen (Beschickungshäufigkeit) ein grösseres (= teureres) Modell eingesetzt werden müsste, was den kWh-Preis um 2 Rp erhöhen würde.

Fazit: Die Kombination "Solaranlage + Kleinst-Holzofen" ist wirtschaftlich vorteilhaft. Sie produziert die kWh 15% günstiger wie eine alleinige Holzheizung mit einem grösseren Einzelofen und 40 % günstiger wie eine konventionelle Zentralheizung mit Wärmeverteilsystem.

Die Kombination Solaranlage + Kleinst-Holzofen ist für ein Niedrigstenergiehaus (Minergie-P oder Passivhaus) ein wirtschaftliches und ökologisches Optimum, selbst dann noch, wenn ein kleiner Anteil elektrische Hilfsenergie dabei ist.

8. Schlussfolgerungen

Das solare Luftsystem erfüllt die Erwartungen vollumfänglich. Mit dem umströmten selektiven Absorber konnte auf relativ kleiner Fläche ein hoher solarer Deckungsgrad (60 %) bezüglich des Wärmebedarfes des Gebäudes erreicht werden. Der Flächenenertrag liegt um 60 - 80 % höher als bei einer einfachen, nichtselektiven, nur überströmten Konstruktion, ist aber auch entsprechend teurer, so dass jedes System je nach Flächenangebot seine Berechtigung hat.

Die bewusst gewählte Dachneigung (70°) hat sich als optimal für die Wärmenutzung erwiesen. Im Winter und in der Übergangszeit sind die Erträge bei schönem Wetter auf hohem Niveau. Im Sommer hat sich der Betrieb ohne Ventilator trotz geschlossenem Kreislauf und wenig "Auftriebshöhe" als machbar erwiesen und deckt den Warmwasserbedarf zu 100 % ohne in Schönwetterperioden zu mehr als 70 °C im Solarboiler zu führen (keine Überhitzungsgefahr).

Die Hypokauste aus grossflächigen, aufgelegten, gelochten Kalksandsteinelementen, sogenannten "Elektrosteinen" hat sich sehr bewährt und wurde bereits an einem weiteren Objekt erfolgreich eingesetzt. Die Luftverteilung und –sammlung kann einfach realisiert werden, und der Druckverlust lässt sich durch entsprechende Parallelschaltung im für ein solares Luftsystem üblichen Rahmen halten.

Besonders bewährt hat sich die direkte Ankopplung der Speichermasse durch den Plattenbelag an das Raumklima dieses Leichtbau-Holzelement-Hauses. Dies ist im Winterhalbjahr sowohl für das solare Luftsystem als auch für die passive Sonnenenergienutzung durch die grosszügige Südverglasung vorteilhaft, wenn (wie im vorliegenden Fall) eine entsprechend (ca. 10 cm) starke Überdeckung der Luftkanäle gewährleistet ist. Im Sommer hat die direkt ans Raumklima gekoppelte Speichermasse eine sehr positive, temperatenausgleichende Wirkung, welche eine effiziente Nachtauskühlung via Fensterlüftung ermöglicht. Leichtbauten ohne direkt ans Raumklima gekoppelte Masse haben in Hitzeperioden deutlich (3-5°C) höhere Raumtemperaturen.

Das Badezimmer (OG) hat dank dem integrierten Solarboiler ein hohes Komfortniveau. Dieses Konzept hat sich jetzt schon mehrmals bewährt und kann generell für Niedrigenergiebauten (Minergie-P und Passivhaus) empfohlen werden.

Der kleine zentrale Holzofen als einzige Zusatzwärmequelle (inkl. Warmwasser) wäre zwar theoretisch für ein Minergie-P EFH ausreichend, aber nur, wenn das Gebäude wirklich in allen Punkten streng dem Standard entspricht, was auch bei zertifizierten Objekten selten der Fall ist. Höherer Luftwechsel infolge Undichtigkeiten und Wärmebrücken sind meistens (und auch hier) der Grund, dass der maximale Wärmeleistungsbedarf weit über dem Standard liegt, obwohl im vorliegenden Fall dank des Solarsystems und der Holzfeuerung die gewichtete Energiekennzahl Wärme um 30% unterboten wurde. Es muss daher empfohlen werden, bei Objekten mit derart niederem Zusatzwärmbedarf, die Ergänzungswärmequelle 2-fach zu dimensionieren, da bei solch geringem Wärmebedarfniveau, sich auch nur kleine Abweichungen in der Planung und Bauausführung stark auswirken.

Die Thermographieaufnahmen belegen eindeutig, dass der Füllgrad (Ausblasverfahren) der Gratec-Isolation hoch und dauerhaft ist. Die Wärmedämmwirkung kann qualitativ als relativ gut beurteilt werden im Vergleich zu den "üblichen" Schwachstellen eines Gebäudes wie Fensterrahmen, Rahmenverbreiterungen, Aussentüren und im vorliegenden Fall auch ein Elementstoss im Terrassenbereich.

9. Anhänge

9.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Südwest, Nordwest und Nordostansicht des Hauses	8
Abbildung 1-2: Infrarotaufnahmen der Südfassade.	12
Abbildung 2-1: Südwestansicht	13
Abbildung 2-2: Nordost und Nordwestansicht	13
Abbildung 2-3: Grundrisse mit Wärmezonen	14
Abbildung 2-4: Gratec und zwei Einbringungsvarianten (Prospektauszug)	17
Abbildung 2-5: Eigenschaften von Gratec (Prospektauszug)	17
Abbildung 2-8: Durchströmung des Kollektors.	19
Abbildung 2-9: Unterdach mit Auflage und Luftführungsstruktur	20
Abbildung 2-9: Fertig montierte selektive Absorberbleche.	20
Abbildung 2-9: Montage der Kollektorabdeckung	21
Abbildung 2-12: Glashalteprofil	21
Abbildung 2-13: Durchströmungsmuster des Kollektordaches.	22
Abbildung 2-14: Nordwestseite mit angedeuteter, schematischer Luftführung.	22
Abbildung 2-15: Anschauliches Prinzipschema. Alle Isolationen: Gratec.	23
Abbildung 2-16: Schematische Darstellung des solaren Luftkreislaufes	24
Abbildung 2-17: Der Dachraum mit der gesamten Technik	25
Abbildung 2-18: Federbelastete Rückschlagklappe im Vorlauf nach dem Ventilator und Verkleidung des Rücklaufdurchbruches in den Kollektor.	25
Abbildung 2-19: Der mit schwarzem Schiefer belegte Speicherboden (Hypokauste) und der kleine Holzspeicherofen.	26
Abbildung 2-20: Zusammenfügen der Hohlsteine zu einer Hypokauste.	27
Abbildung 2-21: Querschnitt durch den Hypokaustenboden und Einzelelement	27
Abbildung 2-22: Ausschnitte aus den Sammel- und Verteilkanälen der Hypokauste.	28
Abbildung 2-23: Ventilator Kennlinien	29
Abbildung 2-24: Solarboiler. Ansicht durch die geöffnete Servicetüre	30
Abbildung 2-25: Solarboiler hinter dem Handtuchradiator, Ansicht aus dem Badezimmer	31
Abbildung 2-26: Holzspeicherofen.	33
Abbildung 2-27: Steuerung	36
Abbildung 6-1: Thermographie Nordfassade Westteil	53
Abbildung 6-2: Thermographie Nordfassade Ostteil und Eingangsbereich.	54
Abbildung 6-3: Thermographie Ostfassade	55
Abbildung 6-4: Thermographie Südfassade Ostteil	56
Abbildung 6-5: Thermographie Südfassade	57
Abbildung 6-6: Thermographie Westfassade-Terrasse	58

9.2. Diagrammverzeichnis

Diagramm 1-1: Energieeinträge [Dh-Monatsauswertung.xls, Energieeintrag]	9
Diagramm 1-2: Systemtemperaturen eines schönen, kalten Frühlingstag	10
Diagramm 1-3: Temperaturverläufe der solaren Warmwassererzeugung	11
Diagramm 4-1: Vergleich der gemessenen Klimawerte mit Meteonorm	40
Diagramm 4-2: Raumtemperaturen (Monatsmittel) und die Klimaparameter.	41
Diagramm 4-3: Energieeinträge [Dh-Monatsauswertung.xls, Energieeintrag]	42
Diagramm 5-1: Verhalten des Luftkreislaufes an einem sonnigen Wintertag	44
Diagramm 5-2: Verhalten des Wasserkreislaufes an einem sonnigen Wintertag	45
Diagramm 5-3: Verhalten des Luftkreislaufes an einem sonnigen Frühlingstag	46
Diagramm 5-4: Verhalten des Wasserkreislaufes an einem sonnigen Frühlingstag	47
Diagramm 5-5: Temperaturverläufe der wichtigsten Messgrössen im Sommer	49
Diagramm 5-6: Temperaturen am Luft-/ Wasser – Wärmetauscher im Sommer	51

9.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ventilatordaten bei Auslegung	28
Tabelle 2-2: Ventilatordaten gemessen	28
Tabelle 2-3: Wärmetauscherauslegung.	34
Tabelle 4-1: Haushaltsstrom und Minergie (Vergleich)	43
Tabelle 5-1: Kollektorstromwirkungsgrad	48
Tabelle 7-1: Investitionskosten Heizung und Warmwasser (Solar + Holz	59
Tabelle 7-2: Wirtschaftlichkeit der Energieträger.	60

9.4. Literaturverzeichnis

Lit. 1	Meteonorm ; Daten für den Solarplaner, Bundesamt für Energie, 1995
Lit. 2	Solarhaus Tambornino, Trun : Wirtschaftliche und gesamtökologische Optimierung eines konvektiven Solarsystems; A. Gütermann, Bundesamt für Energie, 1998
Lit. 3	Kollektorfassade und Kollektordach als Luftsystem bei einer Gebäudesanierung : Technische, energetische und kostenmässige Optimierung für Heizung und Warmwasser am Beispiel des Solarhauses Stecher-Wyden in Horw; A. Gütermann, Bundesamt für Energie, 2000
Lit. 4	Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem : Lüftung/Luftheizung/WRG kombiniert mit Solarfassade an der Rychenbergstrasse, Winterthur; A. Gütermann, Bundesamt für Energie, 2002
Lit. 5	Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt : Bau-technische und energetische Optimierung für Heizung und Warmwasser am Beispiel des Solarhauses "am Berg" in Herisau; A. Gütermann, Bundesamt für Energie, 2003
Lit. 6	Vollflächige Integration eines solaren Luftsystems und Photovoltaik bei einer Gebäudesanierung : Umbau Haus "Lärche, Braunwald, Gütermann, Bundesamt für Energie, 2003