



Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung im



Holz-Sonne-Kopplung und holzfaserbasierte transparente Wärmedämmung im Holzrahmenbau-Passivhaus

Teilbericht IV

Praxistauglichkeit des entwickelten Passivhauskonzeptes

Auftraggeber: Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz

Auftragnehmer: Innovations- und Transferinstitut Bingen GmbH

Leiter: Prof. Dr. Gunter Schaumann

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Matthias Schwanhäußner

Bingen, den 19. Januar 2004

.....
Prof. Dr. G. Schaumann

.....
Dipl.-Ing. (FH) M. Schwanhäußner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Soll / Ist Vergleich zur Wärmeversorgung	4
2.1	Aufzeichnung des Energieverbrauches	9
3	Entwicklung eines Messkonzeptes für das Objekt	10
4	Auswertung der Messwerterfassung	13
4.1	Temperaturverlauf 04. Februar 2003	14
4.2	Temperaturverlauf 15. Februar 2003	15
4.3	Temperaturverlauf 28. Februar 2003	16
4.4	Temperaturverlauf 01. August 2003	17
4.5	Temperaturverlauf 04. August 2003	18
4.6	Temperaturverlauf 06. August 2003	19
5	Soll / Ist Vergleich zur Transparenten Wärmedämmung	21
5.1	Berechnung des Wärmestromes	21
5.2	Ergebnisse der Wärmestrom Simulation	22
5.3	Berechnung des Wärmestromes	24
5.3.1	Wärmestrom Südfassade 4. Februar 12.00 Uhr	24
5.3.2	Wärmestrom Westfassade 4. Februar 12.00 Uhr	25
6	Aufnahme der Nutzerbeurteilung zum Bedienungskomfort	26
6.1	Regenwasser – Zisterne	26
6.2	Holzpelletssilo	26
6.3	Brauchwarmwasser.....	28
6.4	Holzpelletsofen	29
6.5	TWD – Fassade	31
6.6	Photovoltaikanlage.....	32
7	Abbildungsverzeichnis	33

1 Einleitung

Mit dem Projekt „Holz-Sonne-Kopplung und holzfaserbasierte transparente Wärmedämmung im Holzrahmenbau-Passivhaus“ sollen unterschiedliche Aspekte beim Bau und „Betrieb“ eines Einfamilienhauses in Passivhausbauweise untersucht werden. Schwerpunkte bei der Untersuchung sind dabei, inwieweit die Kombination einer Holzrahmenkonstruktion mit einer holzfaserbasierten transparenten Wärmedämmung (TWD) passivhaustauglich und praxistauglich ist. Darüber hinaus soll untersucht werden, inwieweit die Holz-Sonne-Kopplung mit einem Holzpelletofen und eine Vakuumröhrenkollektoranlage die Anforderungen an eine zeitgemäße, komfortable Wärmeversorgung und Warmwasserbereitung sicherstellt und für den Einsatz in einem Passivhaus geeignet ist.

In Teilbericht I zu diesem Vorhaben wurde unter anderem der zu erwartende Wärmebedarf des Gebäudes berechnet. Ziel der Betrachtung und Beobachtung ist es zu prüfen, inwieweit die vorab berechneten Verbrauchswerte durch Messung etc. verifiziert werden können. Darüber hinaus sollen insbesondere die Erfahrungen der Bewohner mit der dort eingesetzten Technik aufgenommen werden.

2 Soll / Ist Vergleich zur Wärmeversorgung

Beheizung - Holzpelletsverbrauch

Auf Grundlage der von dem Architekturbüro zur Verfügung gestellten Schnittzeichnungen und Angaben zu den Materialien wurde die Wärmebedarfsermittlung durchgeführt.

Bei der Berechnung des Wärmebedarfs wurde der statische u-Wert für die TWD-Fassade angesetzt. Die Berechnung wurde nach dem Passivhaus-Projektierungsprojektierung PHPP'99¹ durchgeführt.

	[kWh/a]	Bemerkung
Transmissionswärmeverluste Q_T	9.033	
Lüftungswärmeverluste Q_L	1.970	mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung (90 %)

¹ Das Passivhaus-Projektierungsprojekt ist ein Rechenverfahren zur Bestimmung des Heizwärmebedarfes von Gebäuden auf Basis einer Tabellenkalkulation. Eingangsgrößen dieses Rechenverfahren sind unter anderem die Außenmaße des Gebäudes, Fensterflächen (Rohbaumaße), interne Wärme Gewinne etc..

Interne Wärmegegewinne Q_i	3.058	durch Betrieb von elektrischen Geräten etc.
Solare Wärmegegewinne Q_s	5.049	Wärmegegewinne durch die Verglasung abhängig von der Ausrichtung der Fensterflächen
Jahres-Heizwärmebedarf Q_H	2.897	
Jahres-Heizwärmebedarf Q'_H (volumenbezogen)	3,9	
Jahres-Heizwärmebedarf Q''_H (flächenbezogen)	9,7	Passivhauskriterium 15 kWh/(m ² a)

Für die Deckung des Gesamtwärmebedarfes für die Raumheizung werden demnach ca. 2.900 kWh pro Jahr benötigt. Bezogen auf die beheizte Fläche ergibt sich ein spezifischer Kennwert von 9,7 kWh/m².

Neben dem Energiebedarf für die Beheizung des Gebäudes wird Energie zur Brauchwarmwasserbereitung benötigt. Der Brauchwarmwasserbedarf wird über das gesamte Jahr gesehen mit dem folgenden Ansatz ermittelt.

Für ein Gebäude dieser Art wurde der tägliche Warmwasserbedarf bei einer Temperatur von 45 °C auf 100 Liter pro Person² angesetzt. Die vorliegenden Daten über den Wasserverbrauch³ lassen allerdings den Schluss zu, den durchschnittlichen Bedarf im Wohnungsbau in Höhe von 65 Liter pro Person und Tag anzusetzen. Dieser Wert liegt im Bereich zwischen 55 und 100 Liter pro Person und Tag, welcher von der DIN für Luxus-Villen angegeben wird.

Die Belegung des Hauses wird mit durchschnittlich 2,8 Personen angesetzt.

Die jährliche Wärmemenge für das Brauchwarmwasser errechnet sich bei den geänderten Randbedingungen demnach wie folgt:

$$Q_{\text{Ges}} = \frac{\text{Verbrauch [l] pro Person und Tag} \times 365 \text{ Tage} \times \text{Belegungszahl} \times 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times 0,997 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 35 \text{ K}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_{\text{Ges}} = \frac{65 \frac{\text{l}}{\text{P d}} \times 365 \text{ d} \times 2,8 \text{ P} \times 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times 0,997 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 35 \text{ K}}{3600 \text{ s}} = 2.697,9 \text{ kWh pro Jahr}$$

² vgl. DIN 4708 Zentrale Wassererwärmungsanlagen in Wohnbauten; Verbrauch für Einfamilienhäuser

³ Aufschreibung des Gebäudeeigentümers

Der Brauchwarmwasserbedarf des Objektes wird mit ca. 2.700 kWh pro Jahr ermittelt.

Gesamtbedarf Wärme:

Für die Beheizung werden 2.900 kWh benötigt, für das Brauchwarmwasser 2.700 kWh, als Gesamtwärmebedarf 5.600 kWh

Im Betrachtungszeitraum wurden mindestens 750 kg, höchsten 1.500 kg Holzpellets verbraucht. Weil keine quantitative Füllstandsmessung möglich ist, kann der tatsächliche Verbrauch während des Betrachtungszeitraumes nur abgeschätzt werden. Der Pelletsbunker wurde einmal mit einem Silotankfahrzeug beladen. Die zweite Beladung erfolgte während der Heizperiode mit Sackware, da die Nachlieferung von Pellets nicht immer problemlos möglich war (dazu auch Kapitel Nutzerbeurteilung). Die Ofenstation ist mit einem Wärmemengenzähler⁴ ausgestattet. Seit Inbetriebnahme wurde 367,3 kWh gemessen. Dieser Messwert ist allerdings anzuzweifeln.

Da der tatsächliche Holzpelletsverbrauch nicht exakt festgestellt werden kann, wird für eine erste Näherung der Holzpelletseinkauf gemittelt. Insgesamt wurden 1.500 kg Pellets bezogen. Es wird angenommen, dass 1.000 kg in der von November bis März andauernde Heizperiode tatsächlich verbraucht wurden.

Nach den o.g. Randbedingungen können aus den Holzpellets mindestens 4.900 kWh Wärme erzeugt werden. Bei einem Wirkungsgrad des Pelletofen von 94,5 % verbleiben 4.630 kWh die unter optimalen Bedingungen zu 80 % über den Warmwasserwärmetauscher in den Speicher gelangen und zu 20 % in den Raum⁵ abgegeben werden. Der Wärmemengenzähler sollte nach den o.g. Bedienungen demnach ca. 3.700 kWh ermittelt haben. Die Differenz von ca. 3.330 kWh ist auf eine fehlerhafte Funktion bzw. Einstellung des Wärmemengenzählers zurückzuführen.

Auf eine fehlerhafte Einstellung kann geschlossen werden, da bei der Installation eines Wärmemengenzählers (WMZ) die Impulsrate des Wärmemengenzählers auf das Volumenmessteil eingestellt werden muss. Geht man weiterhin davon aus, dass die Aufteilung der Wärmeabgaben nicht zu 20/80 Prozent sondern 30/70 Prozent von dem Ofen erfolgt und damit vermutlich den realen Betriebsbedingungen ent-

⁴ vgl. dazu auch Kapitel 3 – Entwicklung des Messkonzeptes für das Objekt

⁵ vgl. Technische Daten Wodtke PE Kesselgerät; Leistungsverhältnis Luftleistung : Wasserleistung (20:80) bei einer max. Leistung von 10 kW_{th} und einem Wirkungsgrad von 91 %

spricht, werden ca. 3.300 kWh an den Speicher geliefert die von dem WMZ erfasst werden müssten. Tatsächlich werden 367,3 kWh angezeigt.

Fazit:

Der Wärmemengenzähler muss überprüft und korrekt eingestellt werden. Zwischen dem Messwert und der Berechnung liegt ungefähr der Faktor 10. Bei der Überprüfung der Verbrauchswerte spielt ebenfalls eine Rolle, inwieweit Verlass auf die Herstellerangabe der Wärmeaufteilung von 20 zu 80 % ist. Zu vermuten ist, dass die tatsächliche Aufteilung im Bereich von 30 zu 70 Prozent liegt.

Dem vorab berechneten Heizwärmebedarf von 2.900 kWh/a steht ein tatsächlicher Wärmebedarf von 4.630 kWh gegenüber. Diese Differenz von 1.730 kWh beruht zum einen auf einem zunächst erhöhten Bedarf für die Bauaustrocknung und für den Bedarf an Brauchwarmwasser, der nicht über die Solaranlage abgedeckt wird.

Brauchwarmwasserbereitung - Solaranlage

Zur Brauchwarmwasserbereitung ist eine 4 m² Vakuumröhrenkollektoranlage der Firma Viessmann Vitasol 300 installiert.

Durch die Solaranlage wurde laut dem dort installierten Wärmemengenzähler eine gesamte Wärmemenge von 1.989,3 kWh seit Inbetriebnahme (Aufzeichnung über ein Jahr) an den Speicher abgegeben. Um diesen Messwert zu verifizieren, wird die gewonnene Wärmeenergie in das Verhältnis der Kollektorfläche von 4 m² gesetzt. Hieraus ergibt sich ein spezifischer Anlagenenertrag von 497,3 kWh/m². Bei einer durchschnittlichen Einstrahlung von ca. 1.000 kWh/m² und Jahr würde ein Anlagenwirkungsgrad von ca. 50 % erreicht werden. Daher kann der von dem Wärmemengenzähler ermittelte Wert als realistisch eingestuft werden.

Nach der o.g. Berechnung werden pro Jahr ca. 2.700 kWh Brauchwarmwasser benötigt. Aufgrund der unterschiedlichen Belegung des Gebäudes kann eine exakte Voraussage nicht getroffen werden.

In der folgenden Abbildung sind die solaren Gewinne abhängig von der Einstrahlung, sowie der über das ganze Jahr gleich bleibende Brauchwarmwasserbedarf dargestellt.

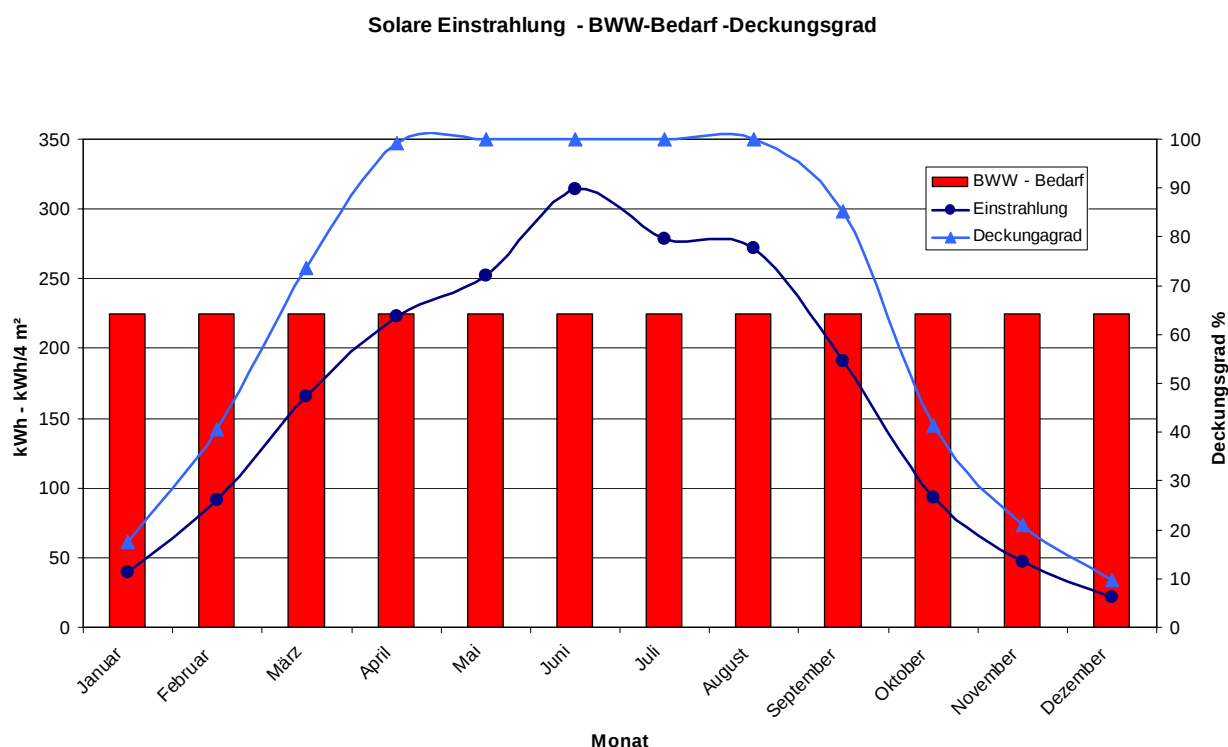


Abbildung 2-1 Brauchwarmwasserbedarf; Solarer Gewinn; Solarer Deckungsgrad

Die Grafik zeigt deutlich, dass in dem Beobachtungsjahr 2003 ab April bis September keine zusätzliche Nachheizung mittels Holzpellets für die Brauchwarmwasserbereitung notwendig war und in diesem Zeitraum eine 100 % Bedarfsdeckung durch die Solaranlage sichergestellt werden konnte. Der Systemnutzungsgrad lag in diesem Jahr bei 41 %. Bei der Auslegung einer Solaranlage wird von einer durchschnittlichen Einstrahlung von 1.000 kWh/m² ausgegangen. In dem vergangenen Sommer wurde in der Region eine durchschnittliche solare Einstrahlung von 1.200 kWh gemessen. Der Systemnutzungsgrad steigt, wenn die „Überschüsse“ im Sommer verringert werden. Dies geschieht dann, wenn auch die Einstrahlung sich im langjährigen Mittel befindet. Für die nächsten Jahre ist davon auszugehen, dass ein Systemnutzungsgrad von ca. 60 % erreichen wird.

2.1 Aufzeichnung des Energieverbrauches

Für die Prüfung des Energieverbrauches werden die Messdaten der Ofenstation und der Solaranlage ausgelesen. Wie bereits beschrieben hat sich gezeigt, dass die Ofenstation einen fehlerhaften Wert anzeigt. Vor der nächsten Heizperiode wird dieser Fehler behoben. Geplant war, die Messwerte der Ofenstation mit dem Holzpelletsverbrauch / Einkauf, sowie den vorausgerechneten Verbrauchswerten zu vergleichen.

Ofenstation – Auszug der abgelesenen Messwerte Ofenstation

Ablesedatum	Q [Wh]	Q [kWh]	Q [MWh]
10.10.02	191	0	0
12.12.02	375	114	0
13.01.03	280	181	0
04.02.03	967	238	0
21.08.03	260	313	0
04.12.03	331	367	0

Solarstation – Auszug der abgelesenen Messwerte Solarstation

Ablesedatum	Q [Wh]	Q [kWh]	Q [MWh]
10.10.02	562	192	0
12.12.02	956	240	0
13.01.03	558	244	0
04.02.03	312	260	0
21.08.03	26	587	01
04.12.03	299	989	01

3 Entwicklung eines Messkonzeptes für das Objekt

Ziel des Messkonzeptes ist es, zu prüfen, inwieweit der Wandaufbau geeignet ist, solare Wärmegevinne der Außenwände im Gebäudeinneren nutzbar zu machen. Dazu soll der Wärmestrom durch die Wand berechnet werden. Die für die Berechnung notwendigen Temperaturen in den unterschiedlichen Wandschichten werden mit Hilfe von Temperaturfühlern ermittelt. Auf die Berechnung dieses Wärmestroms wird in Kapitel 6 eingegangen.

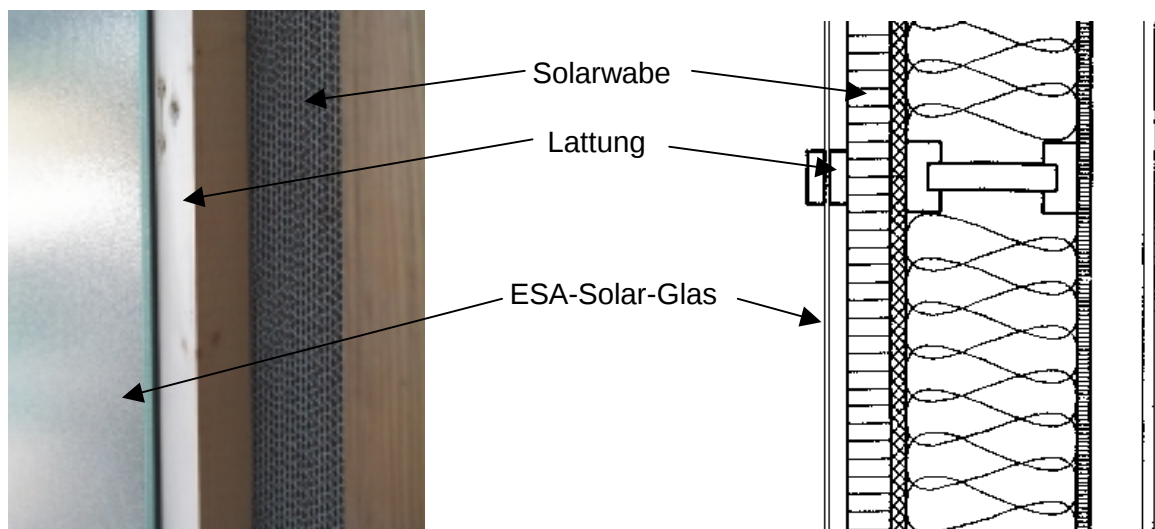


Abbildung 3-1 Wandaufbau (Foto: TSB; Zeichnung: Architekturbüro Müller&Mizera)

Abbildung 3-1 zeigt den Wandaufbau als Fotografie während der Bauphase und als Zeichnung. Um den Temperaturverlaufes in der Wand mit der Transparenten Wärmedämmung zu ermitteln, wurden Temperaturfühler in den verschiedenen Wandschichten der Süd- und Westwand installiert. An jeder Schichtgrenze findet ein Wärmeübergang statt. Um den messtechnischen Aufwand in vertretbarem Rahmen zu halten wurden die Messfühler nicht an jeder Schichtgrenze sondern nur an bzw. in jeder Schicht installiert.

Die Nord- und Ostwand wird nicht mit Messtechnik ausgestattet, da hier davon ausgegangen werden kann, dass der Effekt der solaren Gewinne durch die Wand gering ist. Zum anderen sind die zur Verfügung gestellten Mittel für die Ausstattung mit Messtechnik begrenzt.

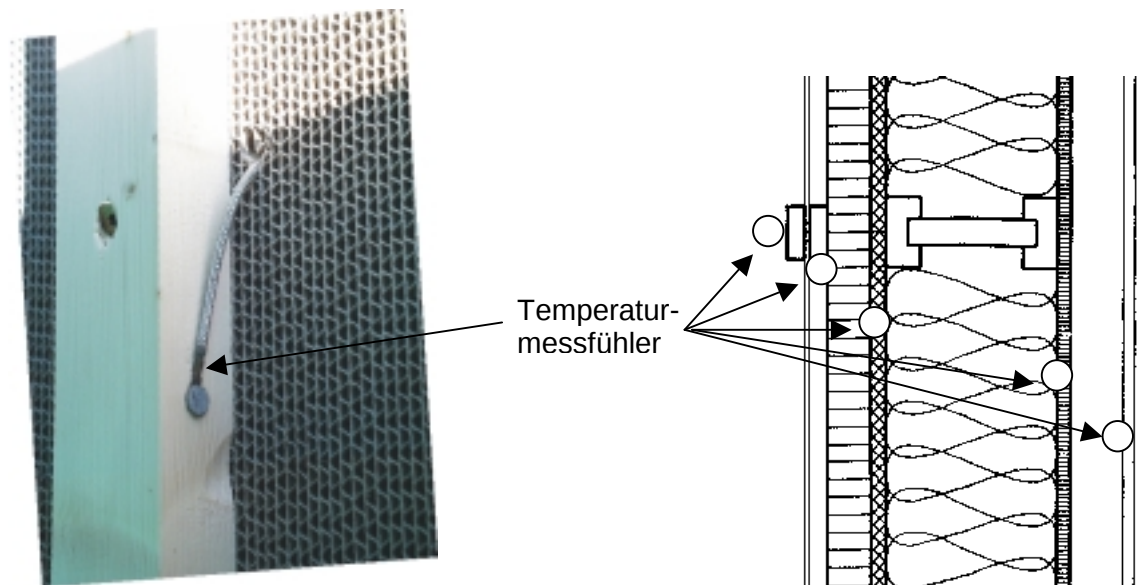


Abbildung 3-2 Temperaturmessstellen (Foto: TSB; Zeichnung: Architekturbüro Müller&Mizera)

Die Abbildung 3-2 zeigt die Photographie eines Temperaturfühlers der auf die Lattung zwischen dem Solarglas und der Solarwabe befestigt ist. Die Zeichnung zeigt die Lage der restlichen Temperaturfühler in der Wand. Die Messkabel der Temperaturfühler sind zentral im Technikraum zusammengeführt.

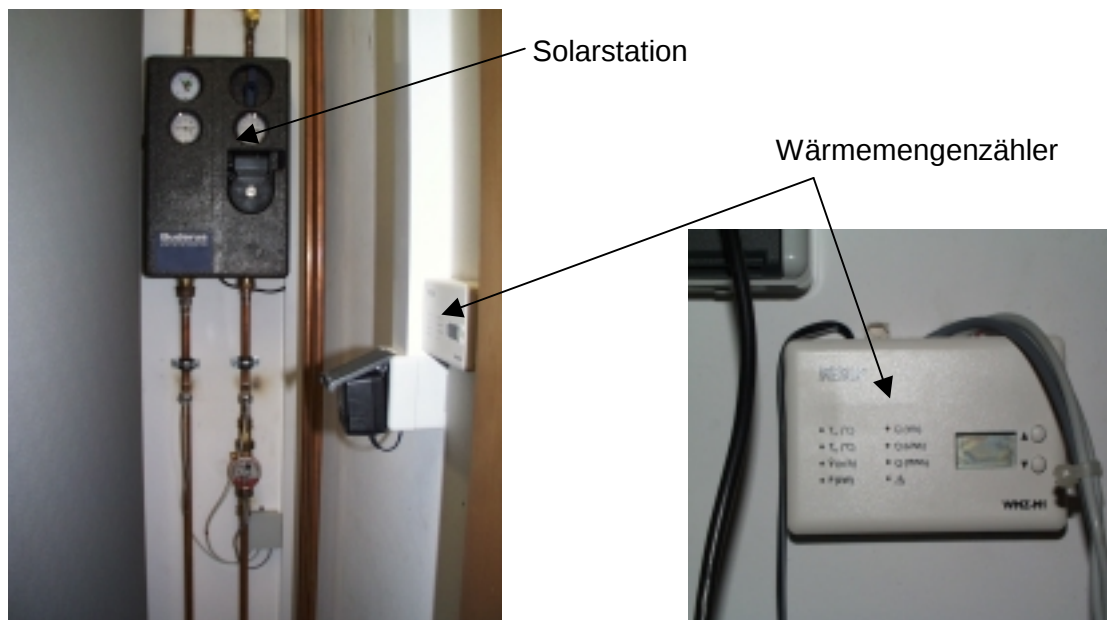


Abbildung 3-3 Solarstation und Wärmemengenzähler (Foto: TSB)

In Abbildung 3-3 ist die Solarstation und der Wärmemengenzähler (WMZ) der Solaranlage zu sehen. Zur Erfassung der Energiebeiträge des Pelletofen ist ein baugleicher WMZ an der Ofenstation montiert.

Die Wärmemengenzähler erfassen jeweils die Vor- und Rücklauftemperaturen (T_{VL} und T_{RL}) in °C, den momentanen Volumenstrom (V) in m^3/h , die momentane Leistung in kW sowie die insgesamt eingespeiste Wärmemenge in kWh.

Daneben werden die in der Süd- und Westfassade montierten Temperaturmessfühler im Technikraum zusammengeführt und die Temperaturen in einem Messdatenlogger erfasst.

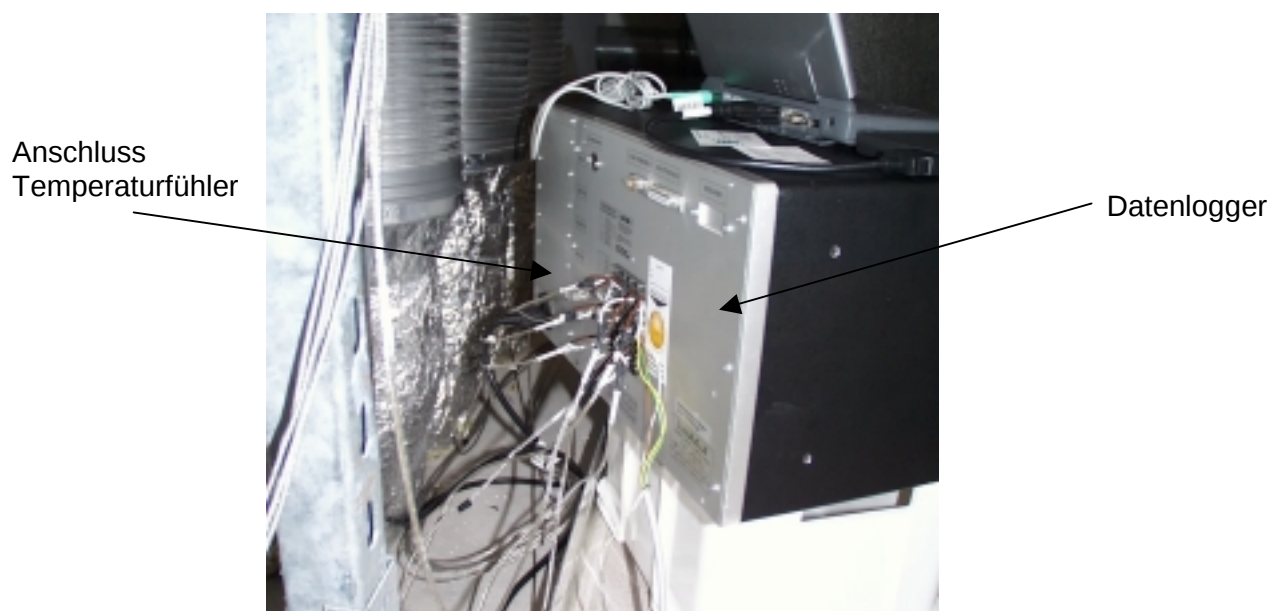


Abbildung 3-4 Anschluss der Temperaturmessfühler an den Datenlogger (Foto: TSB)

Die Temperaturen in den Wänden werden alle 15 Minuten gemessen und auf einer Diskette gespeichert.

In einer ersten Testmessung wurden über den Zeitraum von 26. September bis zum 10. Oktober Daten erfasst. Zu dieser Zeit war das Haus noch nicht bewohnt. Neben den Wandtemperaturen wurde die Temperatur im Technikraum aufgezeichnet. Mit der hier durchgeführten Versuchsmessung konnte überprüft werden, ob alle installierten Messaufnehmer funktionsfähig sind.

Temperaturverlauf TWD Wand (Beispiel)

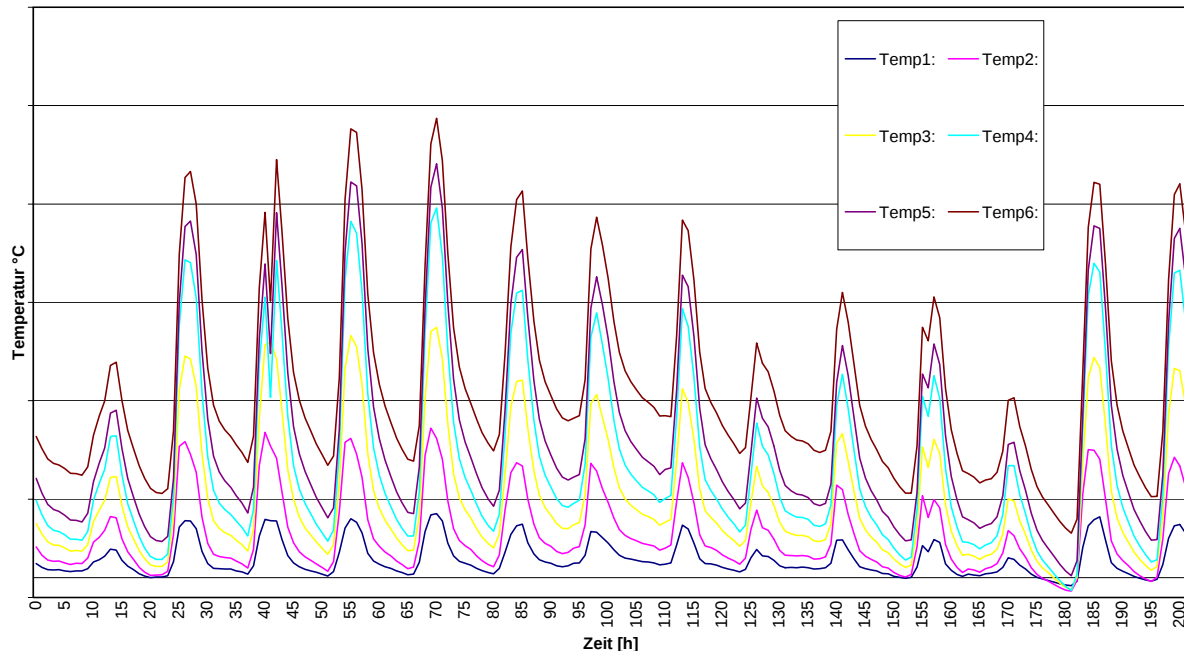


Abbildung 3-5 Temperaturverlauf TWD Wand (Beispiel)

In Abbildung 16 ist beispielhaft eine mögliche grafische Auswertung der gewonnenen Daten dargestellt. Bei den noch unbearbeiteten Rohdaten sind die jeweils höheren Temperaturen zur Mittagszeit zu erkennen.

4 Auswertung der Messwerterfassung

In der Auswertung wird der Temperaturverlauf der Süd- bzw. Westwand mittags, nachmittags und nachts während der Messperiode abgebildet. Dabei werden jeweils drei Tage ausgewählt um den Verlauf darzustellen.

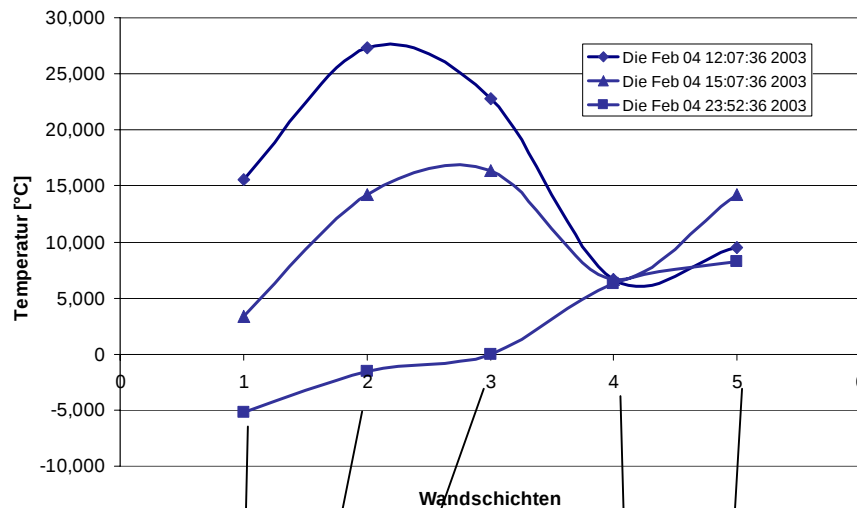
Bei der Darstellung des Temperaturverlaufes durch die Wandschichten werden an den folgenden Positionen⁶ Temperaturen gemessen:

- 1 – Außentemperatur
- 2 – Temperatur nach der TWD Glasschicht
- 3 – Temperatur nach der TWD Wabenschicht
- 4 – Temperatur nach der Wärmedämmung
- 5 – Temperatur nach der Installationsebene

⁶ vgl. hierzu auch Kapitel 4

4.1 Temperaturverlauf 04. Februar 2003

Temperaturverlauf Südwand 4. Februar 2003



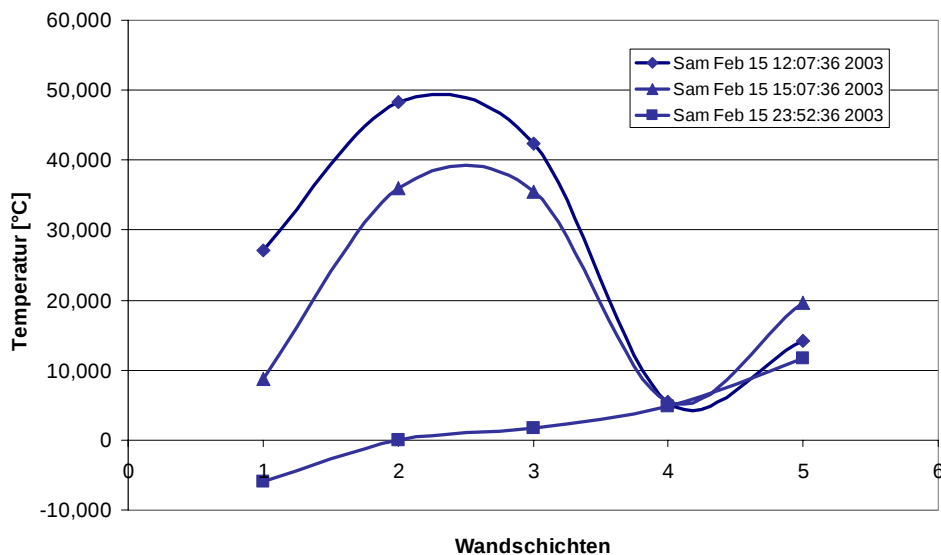
Temperaturverlauf Westwand 04. Februar 2003



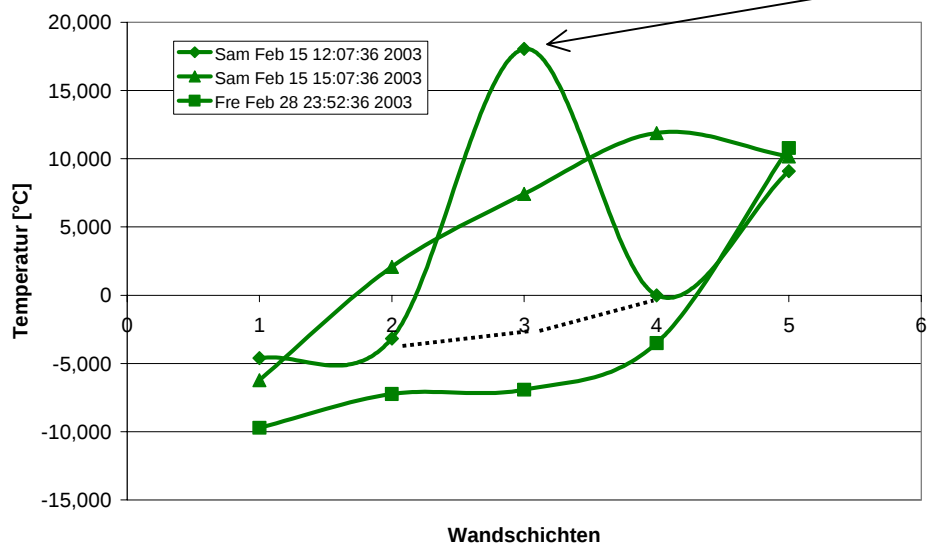
Dargestellt ist hier der Temperaturverlauf für die Süd und die Westfassade am 4. Februar jeweils um ca. 12.00, 15.00 und 24.00 Uhr. Deutlich zu sehen ist, dass der Temperaturgradient nachts wie zu erwarten bei beiden Wänden annähernd gleich verläuft. Die nach Süden ausgerichtete Wand erreicht in den Mittagsstunden sehr hohe Temperaturen die in den dahinter liegenden Wandschichten stetig abnehmen. In der Westfassade ist der Temperaturverlauf deutlich gleichmäßiger.

4.2 Temperaturverlauf 15. Februar 2003

Temperaturverlauf Südwand 15. Februar 2003



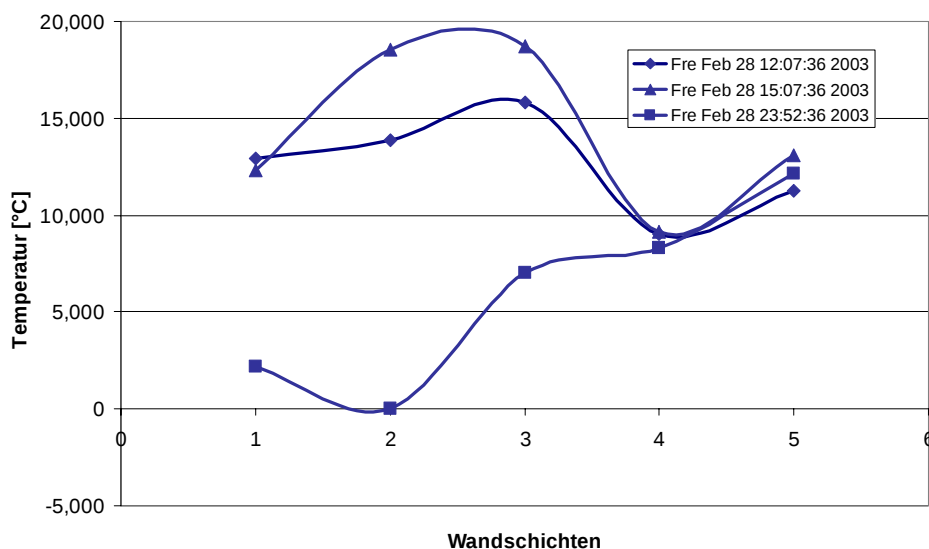
Temperaturverlauf Westwand 15. Februar 2003



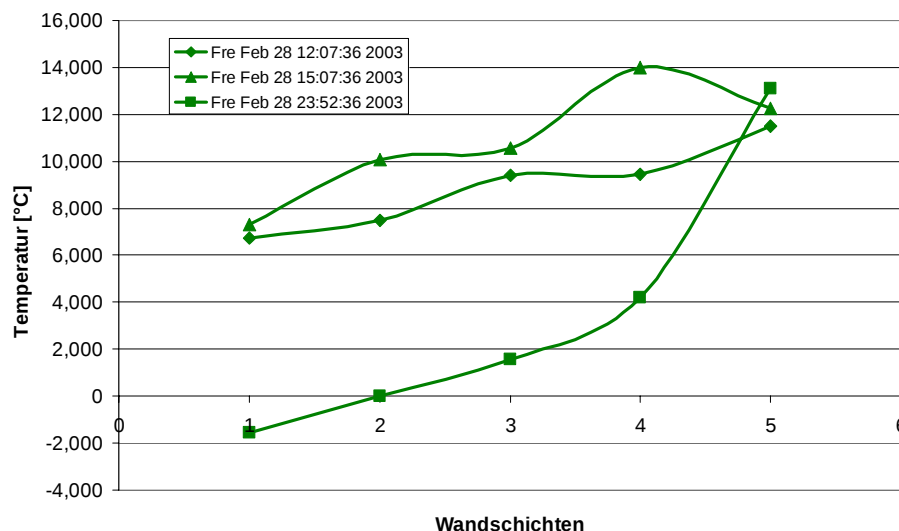
Der Temperaturverlauf in der Südfassade verläuft hier erwartungsgemäß. Hinter der Glasfassade ist die Temperatur deutlich höher als die Außentemperatur (Solarkollektoreffekt), und das Temperaturniveau der dann folgenden Wärmedämmung wird dadurch angehoben. Bei der Westfassade ist ein vergleichbares Verhalten zu sehen. Der Temperaturpeak in der Wandschicht 3 (Uhrzeit ca. 12.00 Uhr) ist wahrscheinlich auf einen Messfehler zurückzuführen.

4.3 Temperaturverlauf 28. Februar 2003

Temperaturverlauf Südwand 28. Februar 2003



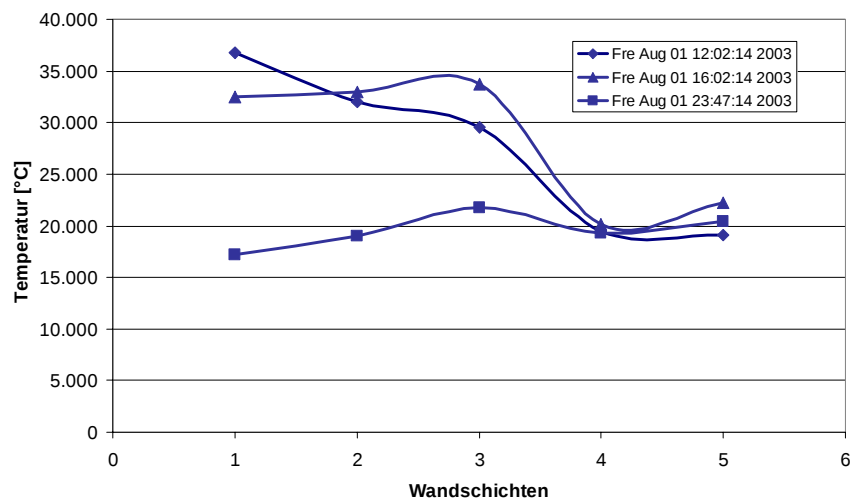
Temperaturverlauf Westwand 28. Februar 2003



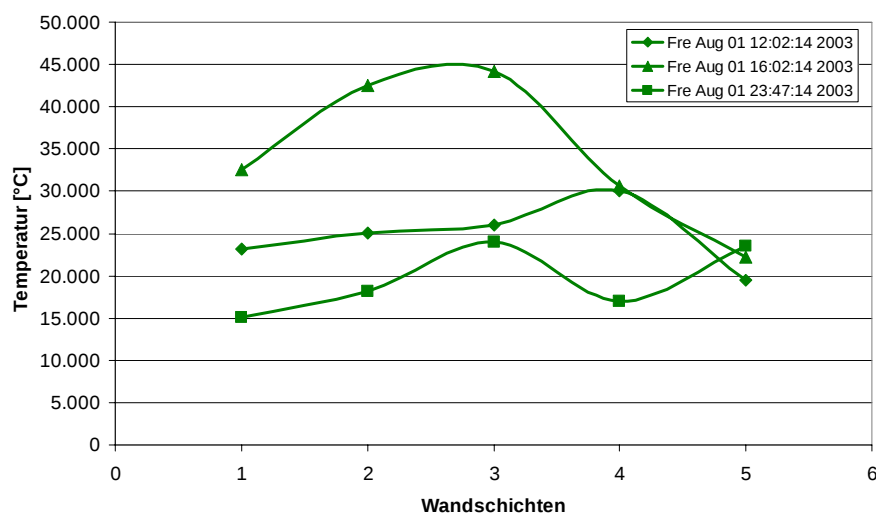
Die Aufzeichnungen vom 28. Februar zeigen den zu erwartenden Verlauf. Bemerkenswert ist, dass die Nachmittagskurven bei beiden Fassaden ein höheres Temperaturniveau aufweisen. Es kann angenommen werden, dass die Wetterbedingungen in den Vormittagsstunden bezüglich der solaren Gewinne ungünstig waren.

4.4 Temperaturverlauf 01. August 2003

Temperaturverlauf Südwall 01. August 2003



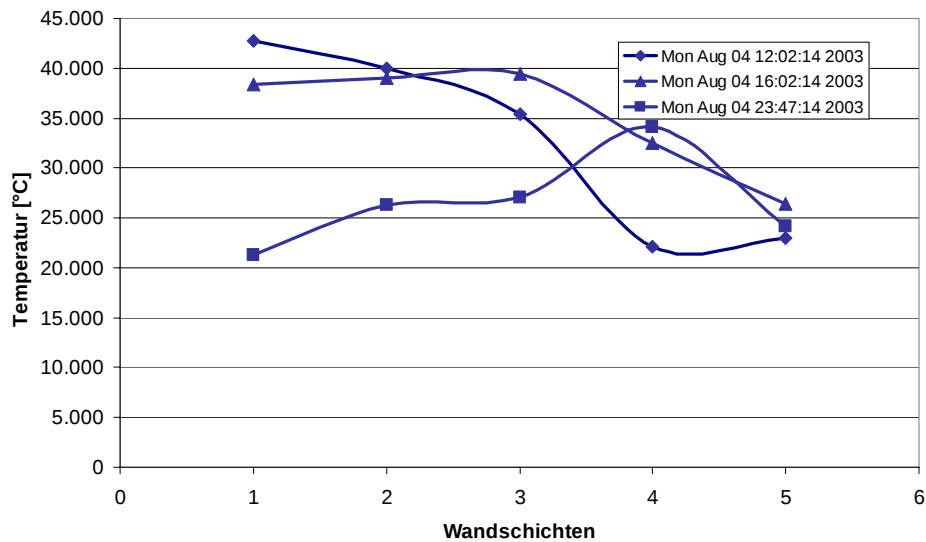
Temperaturverlauf Westwall 01. August 2003



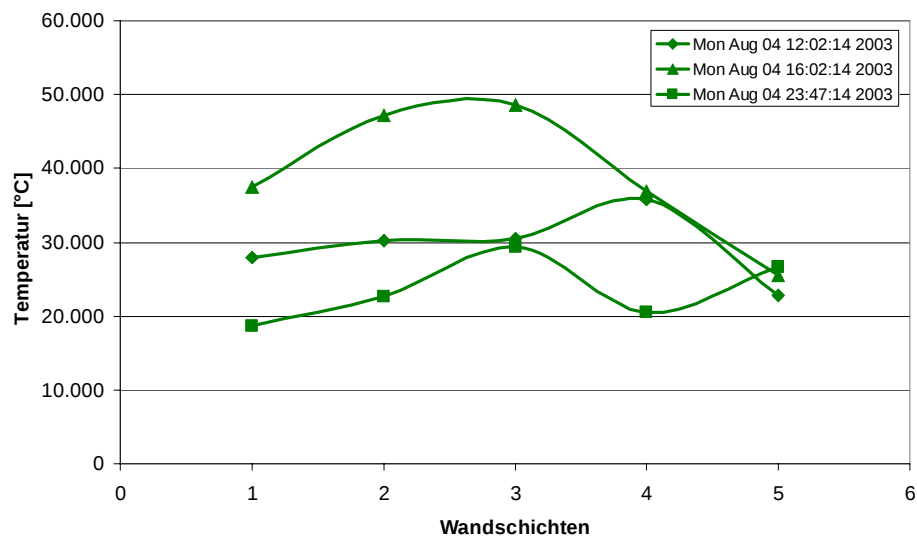
Gut nachzuvollziehen ist bei den Diagrammen der Verlauf der Erwärmung der Wandkonstruktion. Die „Kerntemperatur“ liegt im Bereich zwischen 20 und 25 °C für die Süd- und die Westwand unabhängig von den in der Wand auftretenden Temperaturen von über 40 °C.

4.5 Temperaturverlauf 04. August 2003

Temperaturverlauf Südwand 04. August 2003



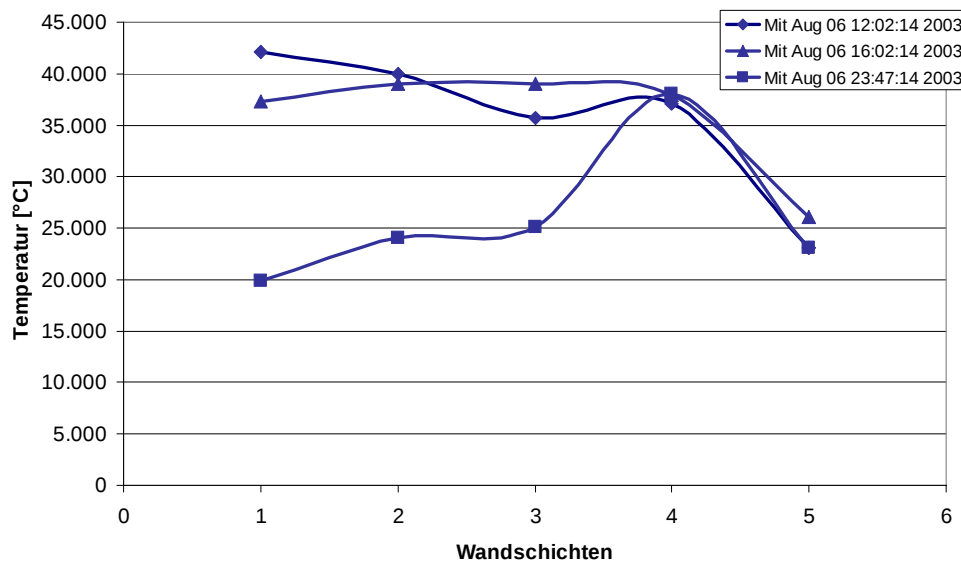
Temperaturverlauf Westwand 04. August 2003



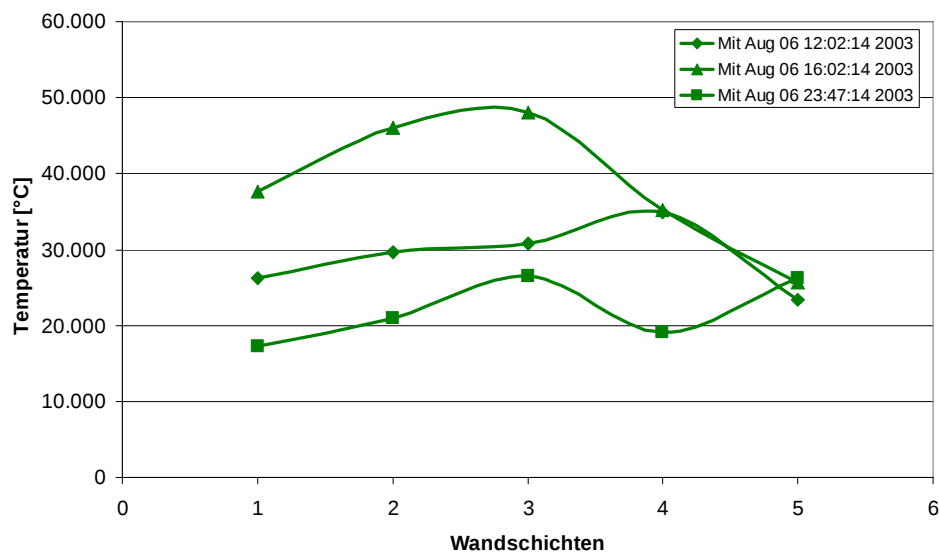
Auch bei dem deutlichen Anstieg der Außentemperaturen auf über 40 °C kann die Temperatur im Gebäude bei ca. 25 °C gehalten werden.

4.6 Temperaturverlauf 06. August 2003

Temperaturverlauf Südwand 06. August 2003



Temperaturverlauf Westwand 06. August 2003



Der Einfluss des Sonnenstandes auf der Westseite ist sehr gut zu erkennen. Die Nachmittagskurve liegt deutlich über der „Mittags“-Aufzeichnung. Die Nachtabkühlung hat insbesondere bei der Südseite nur geringere Auswirkungen.

Fazit:

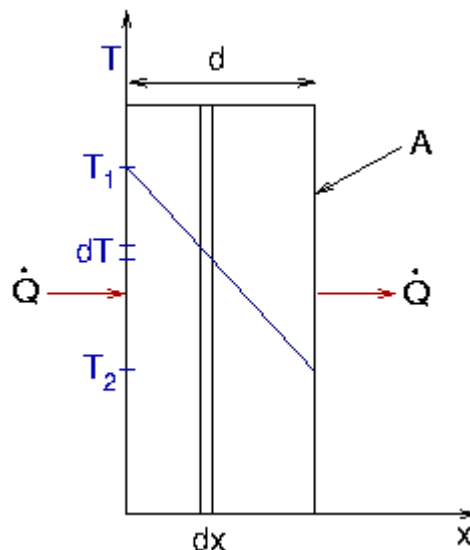
Ziel der Messung war es festzustellen, inwieweit die TWD geeignet ist, Transmissionsverluste insbesondere im Winter zu verringern.

Die Temperaturen der TWD-Messstellen 2 und 3 in der Südwand sind im Winter wesentlich höher als an der Messstelle 4 die in der Hauptdämmung liegt. Daraus kann geschlossen werden, dass der Wärmestrom von außen nach innen, von der höheren zur niedrigeren Temperatur, verläuft. Dieser Umstand wird im nachfolgenden Kapitel rechnerisch nachvollzogen.

5 Soll / Ist Vergleich zur Transparenten Wärmedämmung

5.1 Berechnung des Wärmestromes

Die Berechnung wird auf eine Fläche A [m²] von einem Quadratmeter bezogen. Die Dicke d [m] gibt die jeweilige Schichtdicke an. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Temperaturverteilung zeitlich konstant ist. Auf das Passivhaus Eder bezogen wird die Berechnung für eine festgelegte Uhrzeit durchgeführt. Der Wärmestrom Q wird für die jeweilige Schicht berechnet.



- x = Schichtdicke (Bezeichnung der x-Achse des Diagramms)
- T = Temperatur (Bezeichnung der y-Achse des Diagramms)
- T_1 = Temperatur an der Schichtgrenze 1
- T_2 = Temperatur an der Schichtgrenze 2
- dT = Temperaturdifferenz zwischen T_1 und T_2
- d = Gesamtdicke der Wand
- dx = Schichtdicke
- A = Wandfläche
- Q = Wärmestrom

Für die jeweils anliegenden Temperaturen an den Wandschichten werden, soweit vorhanden, die Messwerte herangezogen. Die Schichtdicke wird aus den Bauplänen entnommen.

Der durch die Wand hindurch tretende Wärmestrom nach der Formel:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \times A \times \Delta T}{d} \quad \dot{Q} = \left[\frac{W \times m^2 \times K}{m \times K \times m} \right] = W$$

Q = Wärmestrom

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/m K]

A = Wandfläche [m²]

ΔT = Temperaturdifferenz [K]

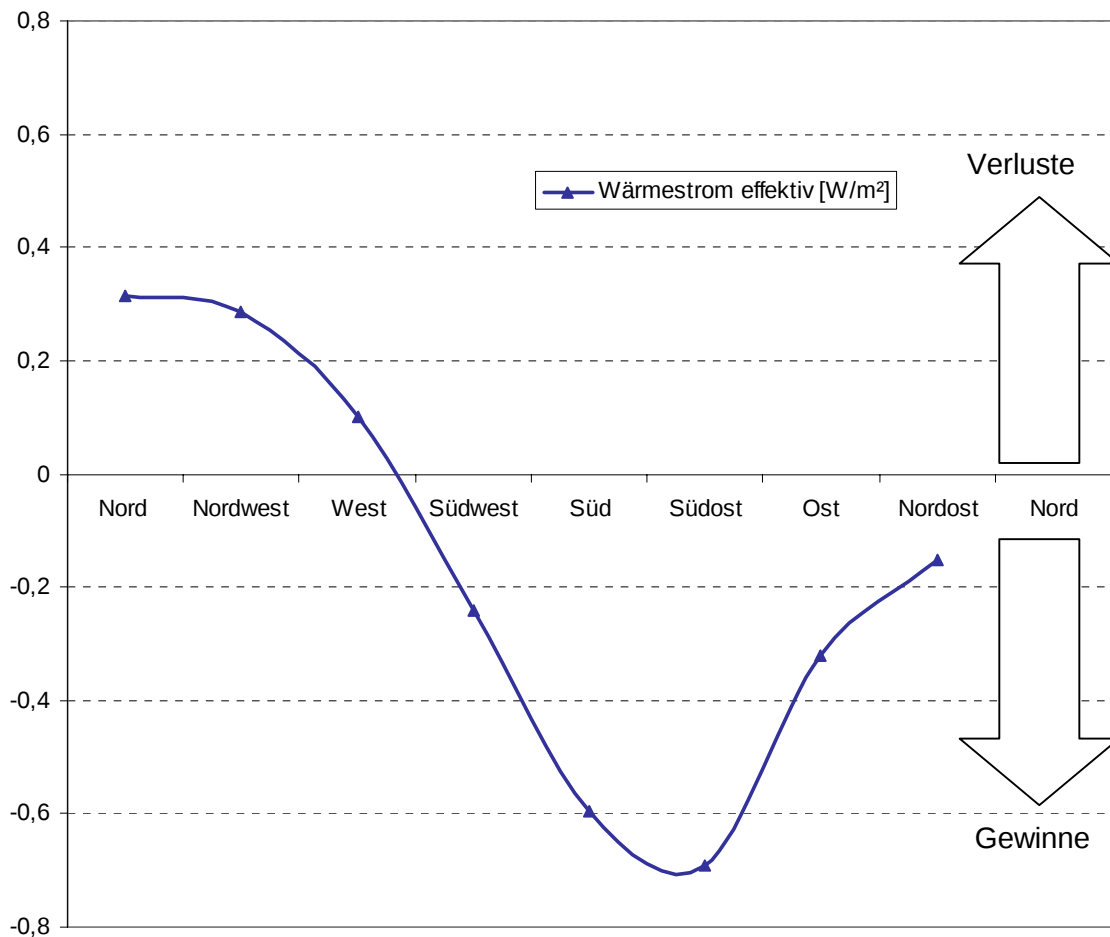
d = Schichtdicke [m]

Die Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von dem Material der Schicht und wird aus den Angaben der Hersteller entnommen.

Der Wärmestrom Q wird in der Einheit Watt [W] angegeben.

5.2 Ergebnisse der Wärmestrom Simulation

Während der Planungsphase wurde der zu erwartende Wärmestrom durch den geplanten Wandaufbau anhand einer Simulation berechnet. Diese Simulation wurde von dem Hersteller der TWD-Fassade durchgeführt. Der Hersteller gibt dabei den effektiven Wärmestrom in Abhängigkeit der Himmelsrichtung an.

Wärmestrom effektiv über die Heizperiode [W/m²]


	Nord	Nord-west	West	Süd-west	Süd	Süd-ost	Ost	Nord-ost
Mittlerer Wärmestrom effektiv [W/m ²]	0,314	0,286	0,101	-0,242	-0,596	-0,691	-0,320	0,153
Mittlerer Wärmestrom statisch [W/m ²]	2,222	2,222	2,222	2,222	2,222	2,222	2,222	2,222

Für die nach Süden ausgerichteten Wandflächen ergibt sich nach der theoretischen Betrachtung ein mittlerer effektiver Wärmestrom $Q = -0,596 \text{ [W/m}^2\text{]}$ der dem Gebäude Wärmegewinne zuführt. Bei der vergleichenden statischen Betrachtung des Wärmestromes errechnet sich ein Wert von $Q = 2,222 \text{ [W/m}^2\text{]}$ für alle Himmelsrichtungen. Für die nach Süden ausgerichteten Wandflächen kann demnach in der Bilanz ein Wärmegewinn durch die TWD-Fassade erreicht werden. Bei den nach Norden ausgerichteten Flächen wird der Wärme-„verlust“-strom deutlich verringert.

Die Ausrichtung des Wärmestromes von der Fassade in den Wandaufbau und die damit verbundenen Wärmegewinne innerhalb des Hauses können mit den durchgeführten Messungen nachgewiesen werden. In die Fassade wurden in die nach Süden sowie nach Westen ausgerichteten Wände Temperaturfühler eingebaut⁷. Der rechnerische Nachweis auf Basis der Messwerte kann demnach nur für diese beiden Himmelsrichtungen geführt werden.

5.3 Berechnung des Wärmestromes

Für die Temperaturverläufe am 04.02, 15.02 und 28.02 wird der rechnerische Nachweis anhand der gemessenen Temperaturen in den Wandschichten geführt, dass der Wärmestrom der Prognose entspricht.

5.3.1 Wärmestrom Südfassade 4. Februar 12.00 Uhr

	Schichtdicke [mm]	Lambda [W/m K]	Temperatur- differenz dT [K]	Wärmestrom [W/m²]
Solarwabe	50	0,080	5,0	0,80
Holzfaserweichplatte	18	0,055	4,0	1,22
Zellulosedämmung	200	0,049	11,4	0,28
OSB – Platte	15	0,130	1,9	-1,65
Zellulosedämmung	60	0,058	1,0	-0,09
Agepan Platte	24	0,100	2,5	-1,04
Summe Wärmestrom:				-0,48

Die Simulation hat für die nach Süden ausgerichteten Flächen einen mittleren Wärmestrom zwischen -0,242 und -0,691 ergeben. Für die Berechnung mit den gemessenen Temperaturen wird ein Wärmestrom von -0,48 W/m² festgestellt.

⁷ vgl. hierzu auch Kapitel 3 – Entwicklung eines Messkonzeptes für das Objekt

5.3.2 Wärmestrom Westfassade 4. Februar 12.00 Uhr

	Schichtdicke [mm]	Lambda [W/m K]	Temperatur- differenz dT [K]	Wärmestrom [W/m²]
Solarwabe	50	0,080	11,95	-1,91
Holzfaserweichplatte	18	0,055	2,21	0,67
Zellulosedämmung	200	0,049	7,65	0,19
OSB – Platte	15	0,130	-0,15	-0,13
Zellulosedämmung	60	0,058	-8,27	-0,80
Agepan Platte	24	0,100	3,23	-1,35
Summe Wärmestrom:				-3,32

Die Messung an der Westfassade trifft hier die Simulation nicht. Nach den Ergebnissen der Simulation sollte der mittlere Wärmestrom zwischen 0,101 (effektiv) und 2,222 (statische) liegen. Verursacht werden können diese Differenzen unter anderem auch dadurch, dass nicht an jeder Wandschicht ein Thermoelement angebracht werden konnte. Zur Berechnung des Wärmestromes sind jedoch die Temperaturen an den jeweiligen Grenzflächen erforderlich. Für die hier durchgeführten Berechnungen wurden die fehlenden Temperaturen teilweise geschätzt.

Fazit:

Durch die Messung des Wärmestromes durch die TWD-Fassade an den nach Süden ausgerichteten Flächen können die simulierten Ergebnisse bestätigt werden. Die TWD-Fassade trägt zu einer Verringerung der Transmissionsverluste bei, bzw. kann an klaren Wintertagen mit niedrigen Außentemperaturen bei hoher solarer Einstrahlung Wärmegewinne realisieren.

6 Aufnahme der Nutzerbeurteilung zum Bedienungskomfort

Mit der Inbetriebnahme des Passivhauses traten verschiedene Schwierigkeiten auf, die unter anderem auch mit der dort eingesetzten Haustechnik zur Wärmeversorgung und Brauchwarmwasserbereitung in Verbindung stehen.

6.1 Regenwasser – Zisterne

Um dem ganzheitlichen Konzept des Passivhauses gerecht zu werden, wurde eine Regenwassernutzungsanlage mit einer 7 m³ Zisterne installiert. Die Zisterne wird von den Gründachflächen des Gebäudes gespeist. Das so aufgefangene Regenwasser sollte vorrangig zur Bewässerung des Nutzgartens sowie der WC-Spülung dienen. Festgestellt wurde, dass die Zisterne bereits im April des Beobachtungsjahres vollständig geleert war und aufgrund des außergewöhnlich regenarmen Sommers keine Nachfüllung mit Regenwasser erfolgte. Die Zisterne wird in diesem Fall mit Wasser aus dem öffentlichen Netz nachgespeist. Dennoch verbleiben die Nachteile bei der Nutzung als Spülwasser. Die Sarnafil-Schicht im Gründach färbt das in der Zisterne befindliche Wasser und damit auch die angeschlossenen sanitären Einrichtungen. Die Bewohner bewerteten die Investition und Einrichtung einer Regenwassernutzungsanlage negativ.

Fazit:

Eine endgültige Bewertung dieses Systemteiles kann erst dann getroffen werden, wenn ein Jahr mit einer repräsentativen Niederschlagsmenge beobachtet wird.

6.2 Holzpelletssilo

In der ursprünglichen Planung war das Holzpelletssilo als Vorratsbehälter in dem Abstellraum außerhalb der Gebäudehülle vorgesehen. Dieser Vorratsbehälter wurde zunächst mit einer Grundfläche von 2,4 x 2,4 m geplant und könnte bei einer Raumhöhe von 2,5 Meter bis zu 10 m³ Holzpellets fassen. Für die Deckung des Wärmebedarfes sind pro Jahr lediglich ca. 1,5 m³ Holzpellets notwendig. Eine Auslegung des Speichers für den Bedarf von zwei Jahren sowie einer Sicherheitsreserve ist an dieser Stelle ohne weiteres möglich.

Im Zuge der weiteren Planung und Umsetzung wurde das Pelletslager als Schachtsilo innerhalb der Gebäudehülle ausgeführt. Das Lager liegt nun direkt über dem Holzpelletsofen und fasst insgesamt 750 kg bzw. ca. 1,2 m³ Holzpellets.



Abbildung 6-1 Holzpelletsofen im Rohbau (Foto: TSB)

Auch dieses Lager kann wie der zunächst vorgesehene Vorratsbehälter im Abstellraum über ein Silotankfahrzeug mit Holzpellets beladen werden.

Problem bei der hier realisierten Ausführung ist, dass der Behälter nur ca. 750 kg Holzpellets fasst. Der Brennstofflieferant liefert allerdings erst ab einer Abnahmemenge von 1 Tonne Pellets mit einem Silotankfahrzeug an. Trotz dieser geringen Abnahmemenge hat sich der Lieferant bereit erklärt, das Schachtsilo zu befüllen.



Abbildung 6-2 Befüllanschlüsse Holzpelletslager (Foto: TSB)

Bei der Befüllung wurde von dem Lieferant bemängelt, dass der Pelletsbefüllstutzen nur über eine Leiter zu erreichen ist.

In der Phase der Bauaustrocknung erschöpfte sich der Holzpelletsvorrat während der Heizperiode früher als erwartet. Eine Pelletsnachlieferung mit dem Silofahrzeug war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, da die Witterungsverhältnisse die Anfahrt eines LKW nicht zuließen. Die Holzpellets wurden daher als Sackware mit einem kleineren Fahrzeug angefahren und von Hand über eine Revisionsöffnung in den Vorratsschacht gefüllt.

Fazit:

Bei der Planung eines Holzpelletssilos muss bedacht werden, wie die Pellets angeliefert werden sollen und welche Anforderungen der Lieferant an die Befüllanlage stellt. Das Pelletssilo muss ausreichend groß bemessen sein, um die Mindestabnahmemenge aufnehmen zu können. Der Befüllstutzen sollte so angebracht sein, dass er ebenerdig zu erreichen ist.

Das Silo sollte mindestens den Bedarf einer Heizperiode aufnehmen können.

6.3 Brauchwarmwasser

Mit „Inbetriebnahme“ des Wohnhauses wurde bemerkt, dass die Brauchwassererwärmung nur mangelhaft funktioniert. Zentrales Bauteil für das Wärmemanagement ist ein 1.200 Liter Pufferspeicher mit Schichtenladesystem, der im Technikraum im Obergeschoss aufgestellt ist. Der Speicher wird über die Solaranlage und den Holzpelletsofen mit Wärme versorgt. Als Sicherheitsreserve ist ein Elektroheizstab mit 6 kW_{el} eingebaut. Das Brauchwarmwasser wird über eine „Frischwasserstation“, einem internen Wärmetauscher, bereitet. Um die Brauchwarmwassertemperatur in jedem Fall auf über 45 °C zu halten, ist eine „Thermo Fix“-Einheit eingebaut. Diese Einheit drosselt den Durchfluss des Brauchwassers für den Fall, dass die Zapftemperatur auf unter 45 °C sinkt. Bedingung für das funktionieren der Anlage ist, dass der Speicher eine Mindesttemperatur von 50 °C aufweist.

In den Sommermonaten soll das Brauchwarmwasser zu 100 % über die Solaranlage gewonnen werden. Im Winter soll der Holzpelletskessel für ausreichend Brauchwarmwasser und die Beheizung bzw. Nachheizung der Lüftungsanlage sorgen.

Während der ersten Wochen wurde die Betriebsdauer des Pelletskessels zu kurz gewählt. Durch die kurze Betriebszeit kann lediglich ein für die Nachheizung der Lüftungsanlage ausreichendes Temperaturniveau von ca. 30 °C erzielt werden. Die Koordination der Nachheizung über die Lüftungsanlage, der Pumpenlaufzeiten der Heizungspumpe, der Laufzeiten der Brauchwarmwasserpumpe sowie die Einschaltzeit

und Brenndauer der Holzpelletsofen kann über das in dem Haus installierte BUS-System eingestellt werden.

Zur Optimierung wurden daher die Pumpenlaufzeiten der Heizungspumpe sowie der Brauchwarmwasserpumpe angepasst. Die Heizungspumpe wird abhängig von den Wochentagen zwischen 4.30 und 7.00 sowie 20.00 und 22.00 Uhr betrieben. Die Brauchwarmwasserpumpe wird unter der Woche zwischen 5.30 und 8.30 sowie zwischen 19.00 und 22.00 Uhr betrieben. Die Einschaltzeit und Brenndauer (variabel zwischen 2 bis 3 Stunden) des Pelletsofen wurde in die frühen Morgenstunden (3.00 Uhr) verlegt, um zu den Nutzungszeiten ausreichend Brauchwarmwasser zur Verfügung zu haben. Für den Fall, dass die geforderte Mindesttemperatur von 50 °C im Speicher nicht erreicht wird, kann in diesen Ausnahmefällen mit der Elektroheizpatrone die Brauchwarmwassertemperatur auf den Sollwert gehoben werden.

Fazit:

Mit dieser veränderten Einstellung konnte das Problem des zu kalten Brauchwarmwassers sowie die Nachheizung des Gebäudes deutlich verbessert bzw. eliminiert werden. Mit den geänderten Einstellungen wird der Wärmebedarf für die Beheizung und die Brauchwarmwasserbereitung mit Holzpellets abgedeckt. Die installierte Elektroheizpatrone wird lediglich als Sicherheitsreserve vorgehalten.

6.4 Holzpelletsofen

Eine wesentliche Quelle für beständig auftretende Fehler, die zu großer Unzufriedenheit bei den Bewohnern führte, war der Holzpelletsofen der Firma „Wodtke“ vom Typ PE Kesselgerät mit einer Leistung von bis zu 10 kW_{th}. Laut Hersteller können bis zu 80 % der Wärme über einen Wärmetauscher in einen Speicher abgeführt werden, 20 % der Wärme werden während des Betriebes als Strahlungswärme an den Raum abgegeben⁸.

• Reinigung des Brennerraumes und Ascheentsorgung

Laut den Herstellerangaben muss „... ein Wodtke Primärofen im Gegensatz zu konventionellen Holzbefeuerungsanlagen nur hin und wieder von der Restasche gereinigt werden. ...“. Demgegenüber haben die ersten Betriebserfahrungen gezeigt, dass die Brennerschale des Ofens spätestens alle drei Tage gelehrt, ausgekratzt und gereinigt werden muss.

⁸ vgl. Technische Daten Wodtke PE Kesselgerät; Leistungsverhältnis Luftleistung : Wasserleistung (20:80) bei einer max. Leistung von 10 kW_{th} und einem Wirkungsgrad von 91 %

Der Eigentümer beschreibt seine Beobachtungen bei dem Betrieb des Ofens wie folgt:

Während des Betriebes werden halbverbrannte Pellets aus der Brennerschale hochgeschleudert und liegen im Bereich der Entaschung. Nach spätestens drei Tagen ist die Brennerschale am Boden mit fester Schlacke zugesetzt, sodass der Ofen nicht mehr zieht. Diese Schlacke kann nur mit einem Hilfsmittel aus der Brennerschale entfernt werden. Spätestens dann muss auch die Asche entfernt werden.

Auch die Sichtscheibe muss dann von Ruß befreit werden. Diese Reinigungsintervalle, die in der Heizperiode spätestens jeden dritten Tag durchgeführt werden, entsprechen nicht den Angaben des Herstellers. Der Betreiber berichtet:

Zwischen den Beschreibungen der Firma Wodtke und der Realität während des Betriebes bestehen unvermeidbare Abweichungen. Dies sollte dringend angesprochen werden, um andere Interessenten vor falschen Vorstellungen zu bewahren. Für uns bedeutet die augenblickliche Situation, dass es uns nicht möglich ist, bei winterlichen Temperaturen Haus und Ofen allein zu lassen.

- **Störung der Ofensteuerung**

Im Zuge der Auffälligkeiten bei dem Betrieb des Pelletsofen wurde ein Ortstermin mit dem Gebietsvertreter und einem Servicetechniker der Firma Wodtke sowie dem Installateur der Heizungsanlage und der BUS-Anlage anberaumt. Gemeinsam wurden mögliche Fehlerquellen diskutiert und Veränderungen diverser Einstellungen an dem Ofen und der Steuerung durchgeführt. Im Zuge dieser Arbeiten konnte festgestellt werden, dass ein Bauteil der Ofensteuerung fehlerhaft arbeitet. Dieses Bauteil wurde ausgetauscht. Nach den Änderungen und Ersatz der Steuerung funktioniert die Kommunikation der Ofensteuerung mit dem Bussystem des Wohnhauses zufrieden stellend.

- **Fehlzündung des Ofens**

Während des Betriebes des Pelletsofen kam es zu einer bedenklichen Betriebsstörung, deren Ursache wahrscheinlich auf die o.g. genannten Probleme im Bezug auf die Reinigung der Brennerschale und der fehlerhaften Ofensteuerung zurückzuführen sind. Das Ereignis wurde von dem Nutzer wie folgt beschrieben:

Bei der Inbetriebnahme des Ofens füllte sich die Brennerschale fast bis zum Rand mit Holzpellets. Kurze Zeit später war ein Zündfunken sichtbar. Unmittelbar danach konnte eine starke Rauchentwicklung und dann das explosionsartige Zünden einer Flamme im Brennraum des Ofens beobachtet werden. Diese „Explosion“ war so stark, dass Ruß und Rauch aus der geschlossenen Ofentür austraten und das ganze Haus wie bei einem schlecht ziehenden Kamin danach roch. Es bestehen unsererseits erhebliche Bedenken, inwieweit nicht auch CO neben dem zweifellos austretenden CO₂ emittiert wurde.

Denkbar ist, dass aufgrund von Ascheresten in der Brennerschale der Ofen während der Zündung nicht mit ausreichend Sauerstoff versorgt wurde. Nachdem ein erster Zündversuch fehlgeschlagen ist, startet die Brennersteuerung das Zündprogramm erneut. Damit werden auch weitere Holzpellets in die Brennerschale gefördert.

Fazit:

Der Holzpelletsofen arbeitet auch nach diversen Optimierungen nur dann zuverlässig, wenn regelmäßig Asche und Schlackereste aus der Brennerschale entfernt werden. Eine längere Betriebsphase ohne regelmäßige manuelle Aschereinigung in kürzesten Abständen ist definitiv nicht möglich. In näherer Zukunft ist kein vergleichbares Gerät auf dem Markt, dass eine automatische Reinigung des Rostes ermöglicht.

6.5 TWD – Fassade

Auf den nach Süden und Westen orientierten Fassadenflächen ist ein TWD-System angebracht. Die Beschreibung der Fassadentechnologie sowie deren messtechnische Auswertung ist dem vorangegangenen Kapitel bzw. den bereits vorliegenden Berichten zu entnehmen.

Die Bewohner konnten beobachten, dass die Raumtemperatur, im Gegensatz zu einer relative trägen Änderung beim Betrieb des Pelletofens, sehr schnell auf ca. 22 °C ansteigt, auch wenn die Außentemperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt liegen. Dieser Effekt lässt sich nicht nur auf die TWD-Fassade, sondern auch auf die Großen Fensterflächen zurückführen.

Fazit:

Die Bewohner beurteilen die TWD-Fassade positiv. Zu bedenken ist, dass die Effekte „große Fensterflächen“ und „TWD-Fassade“ sowie „Passivhaus“ insgesamt zu dem erlebten Eindruck führen und nicht zwingend differenziert werden können.

6.6 Photovoltaikanlage

Auch wenn die Photovoltaikanlage nicht zwingend als integrativer Bestandteil der Haustechnikanlage anzusehen ist, erfüllt sie neben der Funktion der Stromerzeugung eine weitere wichtige Aufgabe. Die Module sind vor die nach Süden ausgerichtete Fassade montiert und dienen auch als Verschattungselemente.

Seit Inbetriebnahme wurden insgesamt 3.965,2 kWh in das Netz gespeist. Die Anlage hat eine Peak-Leistung von 2,99 kW_{peak}, pro Jahr werden ca. 1.000 kWh/kW_{peak} erzeugt.

Bei einer jährlichen Eigenstromerzeugung von ca. 3.000 kWh wird das Gebäude in der Bilanz unabhängig von anderen Stromquellen betrieben. Das öffentliche Netz wird quasi als Puffer genutzt.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Brauchwarmwasserbedarf; Solarer Gewinn; Solarer Deckungsgrad.....	8
Abbildung 3-1 Wandaufbau (Foto: TSB; Zeichnung: Architekturbüro Müller&Mizera).....	10
Abbildung 3-2 Temperaturmessstellen (Foto: TSB; Zeichnung: Architekturbüro Müller&Mizera).....	11
Abbildung 3-3 Solarstation und Wärmemengenzähler (Foto: TSB)	11
Abbildung 3-4 Anschluss der Temperaturmessfühler an den Datenlogger (Foto: TSB)	12
Abbildung 3-5 Temperaturverlauf TWD Wand (Beispiel)	13
Abbildung 6-1 Holzpelletsofen im Rohbau (Foto: TSB).....	27
Abbildung 6-2 Befüllanschlüsse Holzpelletslager (Foto: TSB)	27