

Forschungsprogramm "Solararchitektur"

Mehrfamilienhaus Holinger, Oberdorf BL

Messungen und Simulationen

Max Blatter, Münchenstein
Daniel Brühwiler, Fällanden

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2000

INHALTSVERZEICHNIS

<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	3
<u>HAUPTTEIL</u>	4
<u>1. Projektziele</u>	4
<u>2. Beschreibung des Objekts</u>	6
<u>2.1 Allgemeines</u>	6
<u>2.2 Fensterkollektorsystem</u>	7
<u>2.3 Wärmerückgewinnung</u>	10
<u>3. Messkonzept</u>	10
<u>4. Resultate</u>	13
<u>4.1 Meteorologische Daten während der Messperiode</u>	13
<u>4.2 Raumkomfort</u>	14
<u>4.3 Jährliche Energiebilanz</u>	15
<u>4.4 Monatliche Energiebilanzen</u>	17
<u>4.5 Typischer Betrieb der Luftkollektoren</u>	19
<u>4.6 Bewirtschaftung des Speicherbodens</u>	20
<u>5. Ergebnisse der Computersimulation (Verfasser: Daniel Brühwiler, Fällanden)</u>	25
<u>5.1 Fragestellung</u>	25
<u>5.2 Randbedingungen und Modelle</u>	25
<u>5.3 Vergleich von Messung und Simulation</u>	27
<u>5.4 Systemoptimierung und Strömungsumkehr</u>	33
<u>5.5 Kollektorkombination</u>	35
<u>5.6 Mechanische Lüftung mit Erdregister und WRG</u>	38
<u>5.7 Klimaregionen</u>	40
<u>5.8 Warmwasservorwärmung im Sommer</u>	42
<u>5.9 Spezialauswertungen</u>	45
<u>6. Schlussfolgerungen</u>	48
<u>6.1 Beantwortung der im Auftrag formulierten Fragestellungen</u>	48
<u>6.2 Empfohlene Verbesserungen</u>	50
<u>7. Literaturverzeichnis</u>	51
<u>ANHANG</u>	53
<u>1. Gebäudepläne (Auswahl)</u>	53
<u>2. Energiebezugsfläche und Volumen</u>	56
<u>3. Warmwasseraufbereitung</u>	59
<u>4. Photovoltaikanlage</u>	60
<u>5. Berechnung des Wärmebedarfs für Transmission und Lüftung</u>	61

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Projekt wurde das Heizsystem des Solarhauses Holinger in Oberdorf BL untersucht. Die vier Wohnungen dieses Mehrfamilienhauses werden über ein Fenster- und Dach-Luftkollektorsystem geheizt; die Wärmeabgabe erfolgt über bodenverlegte Hypokausten. Als Zusatzheizung steht in jeder Wohnung ein mit Stückholz betriebener Speicherofen. Ferner ist eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung eingebaut, die pro Wohnung manuell geschaltet wird.

Mittels Messungen und Simulationsrechnungen sollte untersucht werden, inwieweit sich diese verschiedenen Systeme ergänzen oder konkurrenzieren. Aus den Erkenntnissen waren Planungshinweise für ähnliche Anlagen zu erarbeiten.

Im vorliegenden Schlussbericht werden die Resultate aus der messtechnischen Untersuchung sowie den Simulationsläufen vorgestellt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Systeme funktionieren grundsätzlich, und es wird ein guter Wohnkomfort erreicht (Abschnitt 4.2). Dagegen gibt es Details in der Planung und in der Ausführung, die den Energieertrag gegenüber den projektierten Werten beträchtlich mindern (Abschnitt 4.3). Insbesondere sind die Laufzeiten des Luftkollektorsystems zu klein und die Verluste zu gross (Abschnitt 4.4 und 4.5). Zum Teil sind diese Mängel behebbar, zum Teil können die Erfahrungen bei künftigen Bauten berücksichtigt werden (Abschnitt 6.2).
- Wie bei anderen Gebäuden, ist auch hier der Abdichtung zwischen Hypokaustsystem und Fensterkollektor zu wenig Rechnung getragen worden (Abschnitt 4.6). Massnahmen sind in die Wege geleitet (Abschnitt 6.2).
- Das Hinzufügen des Dachkollektors bringt nur noch eine geringe Energieeinsparung gegenüber einer – hypothetischen – Variante nur mit Fensterkollektoren (Abschnitt 5.5).
- Die kontrollierte Lüftung wird zu wenig verwendet, so dass die Wärmerückgewinnung kaum zu einer Energieeinsparung führt (Abschnitt 4.3). Würde indessen der Luftwechsel ganz über die kontrollierte Lüftung erfolgen, so wäre diese durchaus eine sinnvolle Ergänzung zum Luftkollektorsystem (Abschnitt 5.6).

Generell wurde zwar der geplante, hohe Anteil an Sonnenenergie für die Heizung nicht erreicht; als Folge davon liegt der Brennholzverbrauch über den Planungswerten. Die Idee der Energieversorgung mit ausschliesslich erneuerbaren Energien konnte dennoch überzeugend verwirklicht werden.

HAUPTTEIL

1. Projektziele

In Oberdorf BL steht das Solarhaus Holinger mit vier Wohnungen und insgesamt rund 500 m² Wohnfläche. Das Haus nutzt Direktgewinn, Luftkollektoren, Warmwasserkollektoren und Photovoltaik.

In diesem Projekt geht es ausschliesslich um die Untersuchung der Heizung. Die Wohnungen werden über ein Luftsystem geheizt; die Wärmeabgabe erfolgt über ein bodenverlegtes Hypokaustsystem. Als Zusatzheizung steht in jeder Wohnung ein mit Stückholz betriebener Speicherofen. Eine kontrollierte Lüftung, die pro Wohnung manuell geschaltet wird, saugt aus Küche und Nassräumen die Luft ab. Die Abwärme wird der Zuluft zugeführt, die zuvor über ein Erdregister vorgewärmt worden ist.

Mittels Messungen und Simulationsrechnungen sollte untersucht werden, inwieweit sich diese verschiedenen Systeme ergänzen oder konkurrenzieren. Aus den Erkenntnissen waren Planungshinweise für ähnliche Anlagen zu erarbeiten. Die folgende Liste zeigt die Fragen, die durch die Messungen und die Simulationsrechnungen beantwortet werden sollten.

Allgemein

- Ermitteln der Kenngrössen des Luftkollektorsystems (Fördervolumen, Aufnahmeleistung und Abwärmenutzung der Ventilatoren). (Siehe Abschnitt 2.2.)

Kombination von geneigten Dach-Luftkollektoren mit vertikalen Fensterkollektoren:

- Wie ist der saisonale Verlauf des Ertrags der beiden Elemente im Vergleich? (Siehe Abschnitt 4.4 sowie Kapitel 5)
- Welchen Ertrag brächte jedes der Elemente allein? Rechtfertigt die Ertragssteigerung die Kombination beider Elemente? (Siehe Abschnitt 5.5.)
- Ist die (tatsächlich vorhandene) Serienschaltung der beiden Elemente optimal, oder würde eine Parallelschaltung (bei gleicher Luftmenge) einen höheren Ertrag bringen? (Fragestellung modifiziert; siehe Abschnitt 5.4.)

Konkurrenz von Luftkollektorsystem einerseits und kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung andererseits:

- Wird durch die Wärmerückgewinnung eine entsprechende Menge Zusatzenergie eingespart, oder wird statt dessen der mögliche Ertrag des Fensterkollektors vermindert und in welchem Umfang? (Siehe Abschnitt 4.3.)
- Wie sähe dies aus, wenn der *ganze* nötige Luftwechsel über die kontrollierte Lüftung stattfinden würde (was aktuell *nicht* der Fall ist)? (Siehe Abschnitt 5.6.)

Komfort:

- Wie verläuft die Wärmeabgabe der Hypokaustböden zeitlich? (Siehe Abschnitt 4.6 sowie Abschnitt 5.9.)
- Wie sind die raumseitigen Oberflächentemperaturen des Fensterkollektorglases? Verursachen sie Komfortprobleme? (Siehe Abschnitt 4.2 sowie Abschnitt 5.9.)

Nutzung des Luftkollektorsystems im Sommer:

- Wie effizient wäre es, im Sommer das Brauchwasser durch einen im Luftkreislauf liegenden Wärmetauscher zu erwärmen (an Stelle eines Warmwasserkollektors)? (Siehe Abschnitt 5.8.)

Übertragung der Resultate auf andere Klimazonen:

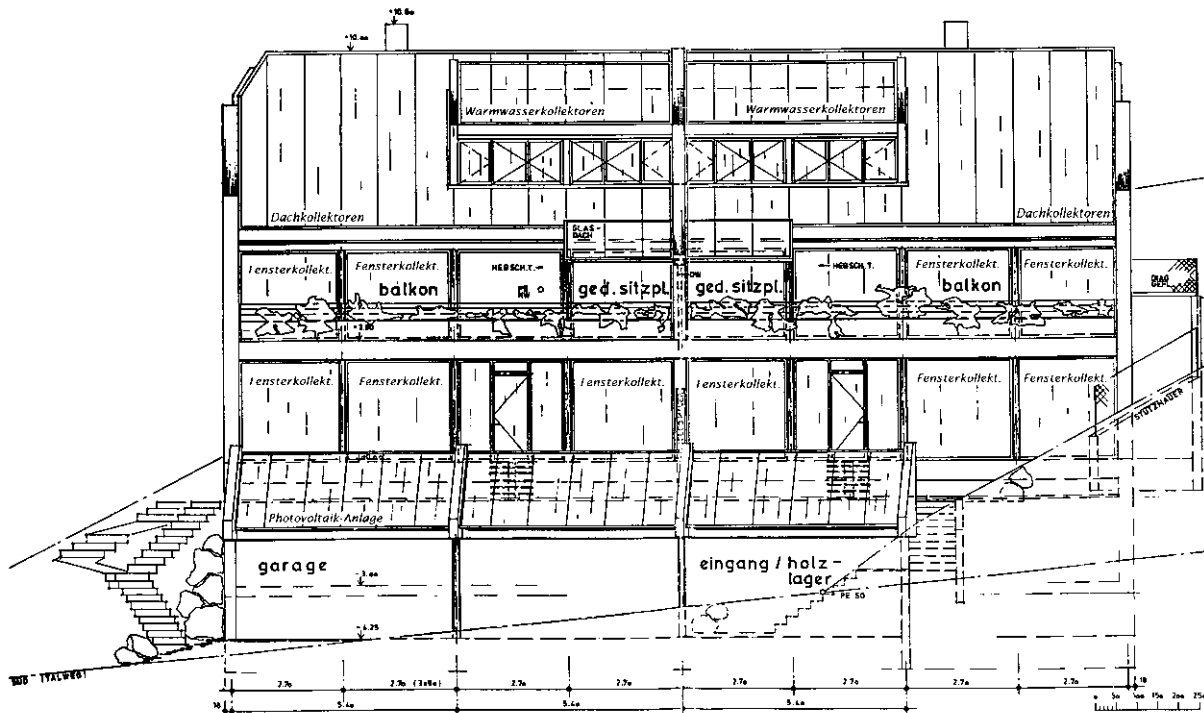
- Wie würde sich das Gebäude in anderen schweizerischen Klimaregionen verhalten? (Siehe Abschnitt 5.7.)
- Welche Kollektorfläche[n] wären dort optimal? (Siehe Abschnitt 5.7.)
- Wie wäre dort der Komfort bezüglich Oberflächentemperatur des Fensterkollektorglases zu beurteilen? (Siehe Abschnitt 5.9.)

Leider wurde aus Kostengründen auf eine Vorlaufphase des Messprojektes verzichtet, in der die qualitative Funktionsweise des Systems untersucht und auf grundlegende Mängel geprüft worden wäre. Dies hat sich im nachhinein als Fehler erwiesen, denn es kamen tatsächlich einige Schwachstellen zum Vorschein, die nun mitgemessen wurden. Dies erschwerte die Interpretation der Resultate sowie die Abstimmung von Simulation und Messung.

2. Beschreibung des Objekts

2.1 Allgemeines

Das Mehrfamilienhaus Holinger steht an einer südlichen Hanglage am Fuss des Baselbieter Jura. Es handelt sich um einen Steinbau mit Zweischalenmauerwerk, der vier Wohnungen umfasst, die eher dem gehobenen Wohnstandard zuzurechnen sind. Alle Wohnungen haben Anteil an der grosszügig verglasten Südfassade, die im EG dem Lauf der Sonne entsprechend gerundet ist. Dadurch wird ein grosser Teil der einfallenden Sonnenstrahlung passiv genutzt. Ausserdem ist die Südfassade grösstenteils als Fensterkollektor ausgebildet, ferner wird ein Teil des Daches als Dachluftkollektor genutzt. Den Rest des Heizwärmebedarfs decken Speicheröfen in den einzelnen Wohnungen, die mit Stückholz beschickt werden. Das Warmwasser wird durch Sonnenkollektoren und einen holzbefeuerten Kessel erzeugt. Eine grosse Photovoltaikanlage liefert übers Jahr mehr als die Hälfte der Elektrizitätsmenge, die in den Wohnungen und für den Allgemeinstrom verbraucht wird.



Figur 1: Südansicht des Hauses

Es handelt sich somit um ein Gebäude, das nicht energie-autark ist im Sinne einer Abkapselung von der Umwelt, das aber den Energiebedarf seiner Bewohnerinnen und Bewohner ausschliesslich aus erneuerbaren Energiequellen bereitstellt. Der Bauherr wurde für dieses zukunftsweisende Energiekonzept, das er zusammen mit dem Architekten Felix Meier erarbeitet hat, mit dem Solar-91-Preis geehrt.

Gebäudetyp	MFH mit vier Parteien
Standort	Klimaregion 1 „östlicher Jura“ 552 m.ü.M.
Lage	frei
Energiebezugsfläche EBF	646 m²
Bauherrschaft	Heinrich Holinger Talweg 57 4436 Oberdorf BL
Architekt	Felix Meier Dinkelweg 20 4153 Reinach BL
Energieplaner	Heinrich Holinger Holinger Solar AG Rheinstrasse 17 4410 Liestal

Tabelle 1: Gebäude, allgemeine Angaben

2.2 Fensterkollektorsystem

Das Luftkollektorsystem ist in Figur 2 im Schnitt dargestellt. Die westliche und die östliche Gebäudehälfte sind mit je einem getrennten, spiegelbildlich gleichen System ausgerüstet.

Der in den Fensterkollektoren und im Dachluftkollektor erwärmte Luftstrom wird unterhalb des Giebels in einem Kanal gefasst und nach unten geführt. Nach dem Ventilator teilt er sich in zwei Zweige auf, von denen der untere den Speicherboden sowie den Fensterkollektor des EG durchströmt, der obere den Speicherboden des OG. Im Betonvolumen der Speicherböden gibt die Luft ihre Wärme ab. Anschliessend vereinigen sich die beiden Luftströme, bevor sie wieder dem Fensterkollektor des OG und dem Dachluftkollektor zugeführt werden.

Je eine Rückschlagklappe, die aus einer Kunststoffolie besteht und sich über die ganze Breite des Fensterkollektors erstreckt, soll die nächtliche Rückzirkulation und somit die Auskühlung der Böden verhindern. Wie die Messungen zeigten und wie im Kapitel 5 erläutert wird, genügt diese Massnahme nicht.

	Istwert	Optimale Werte
Bruttofläche der Fensterkollektoren (EG und OG)	31 m ²	
Bruttofläche des Dachkollektors	29 m ²	
Bruttofläche der Luftkollektoren (Fenster und Dach) bezogen auf die Energiebezugsfläche (ohne UG)	0.21	ca. 0.25 [SIA D010]
Aperturfläche der Luftkollektoren	49 m²	
Glasanteil	82 %	Standardwert 70 % [SIA D010]
Südaabweichung	0°	0°
Luft-Volumenstrom insgesamt	3'000 m ³ /h	
Luft-Volumenstrom bezogen auf die Aperturfläche der Luftkollektoren	60 m³/h/m²	50...80 m³/h/m² [Gütermann 1992] [SIA D010]
Volumen der Speicherböden (Beton)	160 m ³	
Wärmekapazität des Speicherbodens (Dichte 1800 kg/m ³ , spezifische Wärme 1,0 kJ/kgK)	290 MJ/K	
Speicherkapazität bezogen auf die verglaste Kollektorfläche	5.9 MJ/K/m²	0.8...1.1 MJ/K/m² [SIA D010]
Ventilatorleistung (elektrisch)	570 W	
Ventilatorleistung (elektrisch) bezogen auf die verglaste Kollektorfläche	12 W/m²	< 10 W/m² erreichbar [Blatter 1997]

Tabelle 2: Kenndaten des Luftkollektorsystems (westliche Gebäudehälfte)

In Tabelle 2 sind die wichtigen Kenngrößen des Systems aufgelistet. Sie liegen in den aus der Literatur bekannten optimalen Bereichen oder nahe daran. – Lediglich das Volumen und somit die Kapazität der Speicherböden erscheint ausserordentlich hoch. Eine Überschreitung des Optimums bringt indessen keine wärmetechnischen Nachteile; es ist eine bauökologische und ökonomische Frage. Nach Aussage des Bauherrn ist das Betonvolumen zu einem grossen Teil durch die Baustatik bestimmt.

2.3 Wärmerückgewinnung

Die Wohnungen sind mit einer manuell bedienbaren kontrollierten Lüftung ausgestattet, die aus den Nasszellen und der Küche die Abluft absaugt und sie zur Wärmerückgewinnung einem Wärmetauscher zuführt. Die Frischluft wird ihrerseits zunächst in einem Erdregister vorgewärmt (bzw. im Sommer vorgekühlt), bevor sie dem Wärmetauscher zugeführt und als Zuluft im Wohnbereich eingebracht wird.

Die Messungen haben ergeben, dass der Energieertrag der Wärmerückgewinnung marginal ist; dies hauptsächlich wegen der seltenen Benützung der kontrollierten Lüftung. Aus diesem Grund wird hier nicht weiter auf das System eingegangen.

3. Messkonzept

Von Oktober 1998 bis April 1999 wurden alle für die Raumheizung wichtigen Grössen messtechnisch erfasst und mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde elektronisch registriert. Die Messwerte wurden zu Tageswerten zusammengefasst, auf deren Grundlage die interessierenden Energieflüsse abgeleitet wurde. Es erfolgte eine weitere Zusammenfassung zu monatlichen Energiebilanzen.

Im einzelnen wurden folgende Messgrössen registriert bzw., wo entsprechend angegeben, einmalig gemessen oder von Hand protokolliert:

Meteorologische Grössen

- Aussenlufttemperatur
- Globalstrahlung auf die horizontale Ebene
- Globalstrahlung auf die Ebene der Südfassade
- Globalstrahlung auf die Ebene des Dachluftkollektors

Raumkomfort

- Raumlufthtemperatur und Globetemperatur (zur Ermittlung der Strahlungstemperatur) an einem repräsentativen Ort im EG
- Raumlufthtemperatur und Globetemperatur (zur Ermittlung der Strahlungstemperatur) an einem repräsentativen Ort im OG

Luftkollektorsystem

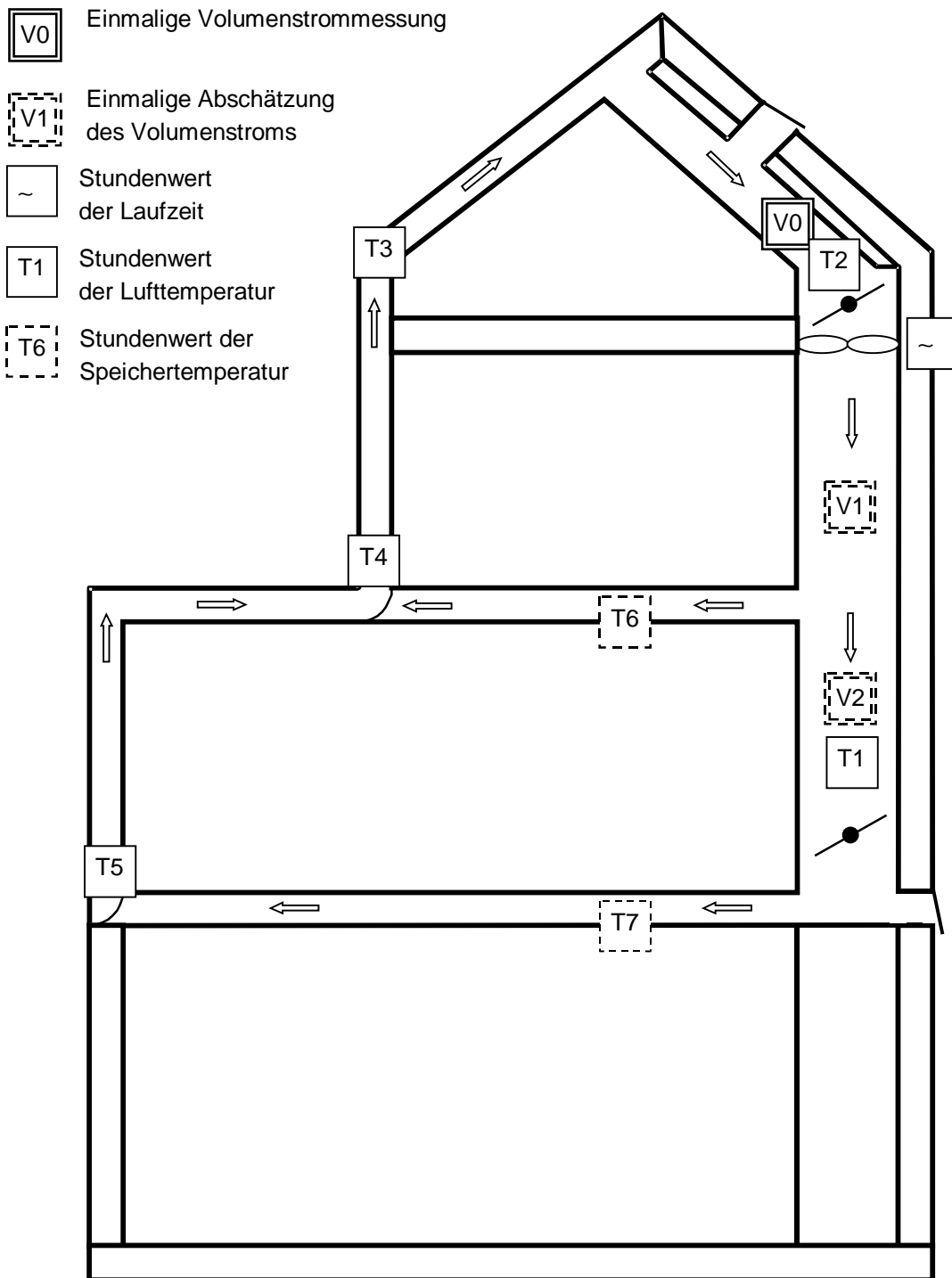
Siehe Figur 3.

Wärmerückgewinnung

- Temperatur der Frischluft (nach der Vorwärmung im Erdregister)
- Temperatur der Zuluft je für die Wohnung im EG und im OG
- Laufzeiten der Ventilatoren (je drei Drehzahlstufen für die Wohnung im EG und im OG)
- Einmalige Messung der entsprechenden Luftvolumenströme

Zusatzenergie

- Brennholzverbrauch EG: Tagesprotokoll der Bewohnerin (Anzahl Füllungen)
- Brennholzverbrauch OG: Monatsprotokoll der Bewohner (Anzahl Füllungen)
- Zur Kontrolle: Oberflächentemperatur Ofen EG, Ofen OG, Satellit DG
- Elektrizitätsverbrauch Wohnung EG, Wohnung OG, Allgemeinstrom (Monatsprotokoll des Bauherrn)



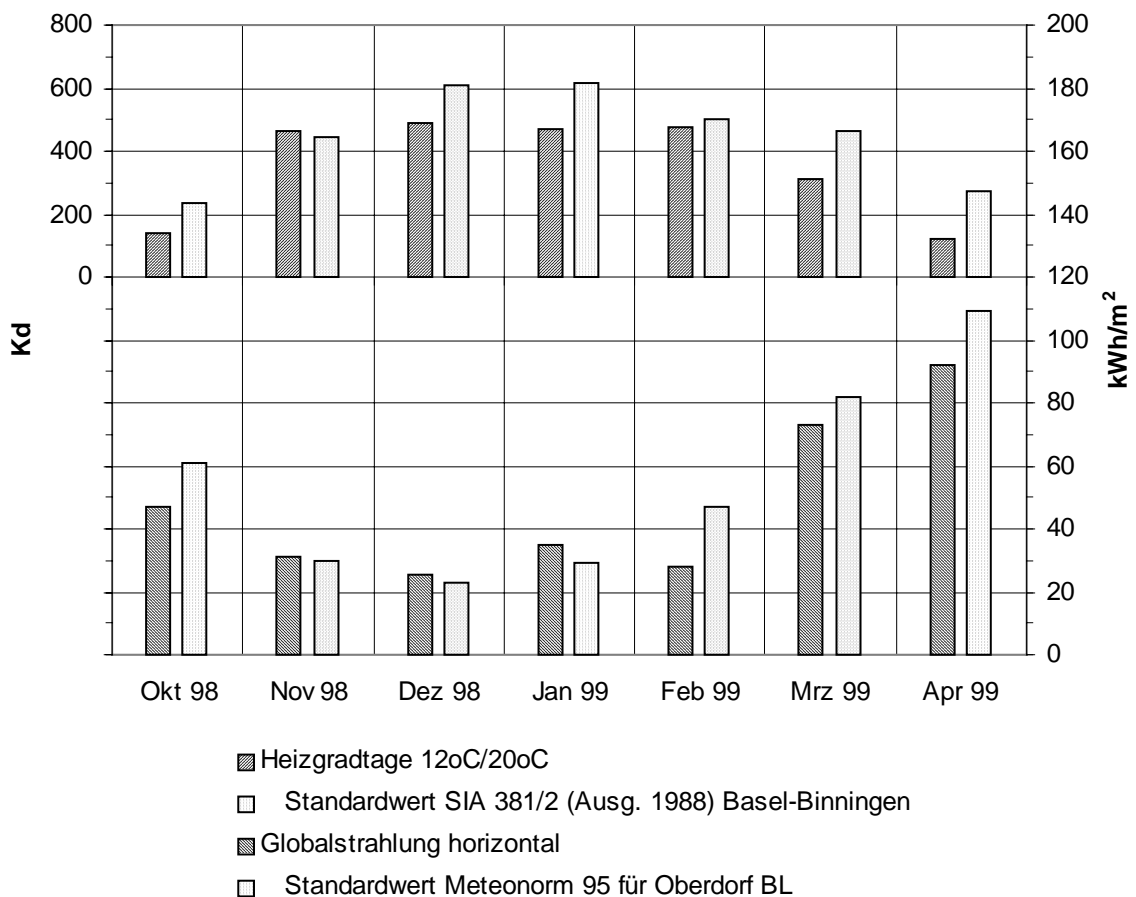
Figur 3: Messstellen im Luftkollektorsystem

4. Resultate

4.1 Meteorologische Daten während der Messperiode

Für eine verfeinerte Interpretation der Messresultate, und insbesondere für den Vergleich mit anderen Fallstudien, müssen die meteorologischen Bedingungen während der Messperiode bekannt sein. Bei Messungen an Solarhäusern sind dabei mindestens die Aussenlufttemperatur sowie die solare Globalstrahlung auf die massgebende Gebäudefassade zu berücksichtigen.

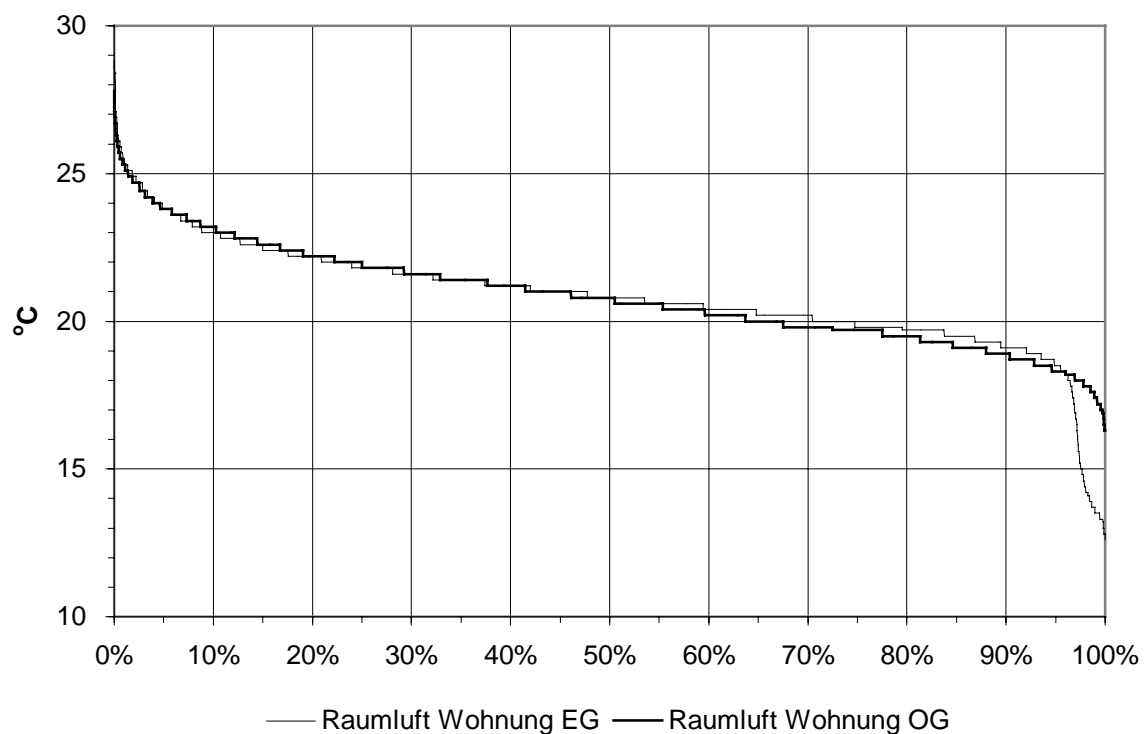
Es wurde darauf verzichtet, die Messwerte auf ein „meteorologisches Normaljahr“ umrechnen zu wollen. Somit ist es aber nötig, die Besonderheiten der Witterung während der Messperiode im Auge zu behalten und bei der Interpretation mit zu berücksichtigen. Figur 4 zeigt die meteorologischen Charakteristika im Vergleich zu den Standardwerten.



Figur 4: Heizgradtage und Globalstrahlung während der Messperiode

Die Periode begann mit einem zu milden und zu sonnenarmem Oktober; es folgte ein normaler November. Der Winter war zunächst ebenfalls zu mild und wies gleichzeitig ein normales Angebot an Solarstrahlung auf (Dezember, Januar), während der Februar normal kalt war und viel zu sonnenarm. Die Übergangszeit im Frühjahr war wieder zu mild, bei unterdurchschnittlichem Strahlungsangebot.

4.2 Raumkomfort



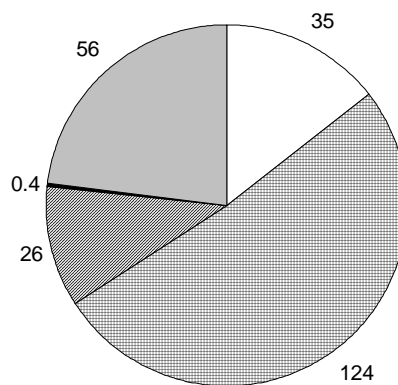
Figur 5: Summenhäufigkeit der Raumlufttemperaturen während der Heizperiode (Oktober bis und mit April)

Wichtig für die Beurteilung eines Solarhauses ist auch der erreichte Raumkomfort. Hierzu sind in Figur 5 die Summenhäufigkeitskurven der Raumlufttemperaturen dargestellt. In über 90% der Zeit lagen die Raumlufttemperaturen zwischen 18°C und 24°C, im Mittel etwa bei 21°C. Der Raumkomfort ist somit einwandfrei. – Das Absinken der Temperatur in der Wohnung EG ist auf eine Ferienabwesenheit zurückzuführen, während welcher der Ofen nicht angefeuert wurde.

4.3 Jährliche Energiebilanz

	Istwert Oktober 98 bis April 99	Auslegungswert bzw. Planungswert	Ziel- bzw. Standardwert nach SIA 380/1
Anzahl Bewohnerinnen und Bewohner	4 Erwachsene 1 Kind	4 Erwachsene 5½ Kinder	
Energiebezugsfläche EBF	283 m ² 57 m ² pro Person	283 m ² 30 m ² pro Person	MFH: 30 m ² pro Person
Energiekennzahl Heizung E _h (Brennholzbedarf)	155 MJ/m ² a	76 MJ/m ² a 1,5 Ster/Wohnung 1 Ster = 7'200 MJ	280 MJ/m ² a abgeleiteter Zielwert

Tabelle 3: Energiekennzahlen (westliche Gebäudehälfte)



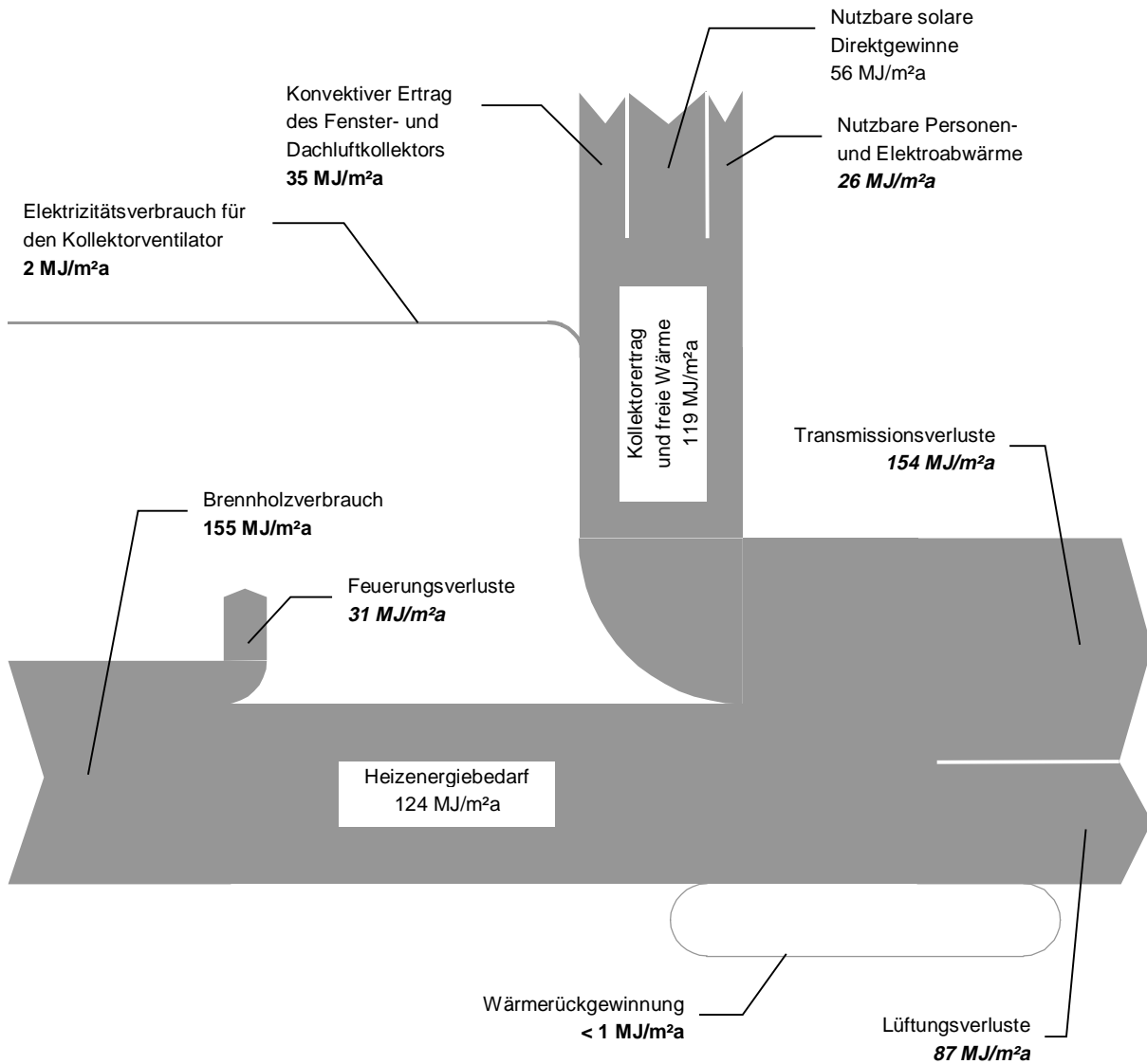
- Ertrag von Fenster- und Dachluftkollektor
- ▨ Nutzwärme der Holzöfen
- ▩ Nutzbare Wärmegewinne Elektro und Personen
- WRG EG und OG: Gesamte rückgewonnene Wärme
- ◻ Passiv solare Energie (Rest)

Figur 6: Jahresenergiebilanz in MJ/m²

Figur 6 verdeutlicht das Untersuchungsergebnis, wonach das MFH Holinger vorwiegend ein holzbeheiztes Niedrigenergiehaus ist. Die passive Sonnenenergienutzung steht anteilmässig an zweiter Stelle, erst dann folgt das Luftkollektorsystem. Die Wärmerückgewinnung aus der Abluft der Küchen und Nassräume hat dagegen einen gänzlich vernachlässigbaren Effekt.

Da der Ertrag der Luftkollektoren wesentlich kleiner ist als geplant, wird auch mehr Brennholz benötigt als vorgesehen.

Figur 7 zeigt das detaillierte Energieflussdiagramm. Es ist zusammengestellt aus direkt gemessenen, geschätzten, sowie rechnerisch ermittelten Grössen. Entsprechend sind nicht alle Zahlenwerte gleich genau und zuverlässig, was im Diagramm durch unterschiedliche Schrift angedeutet ist.

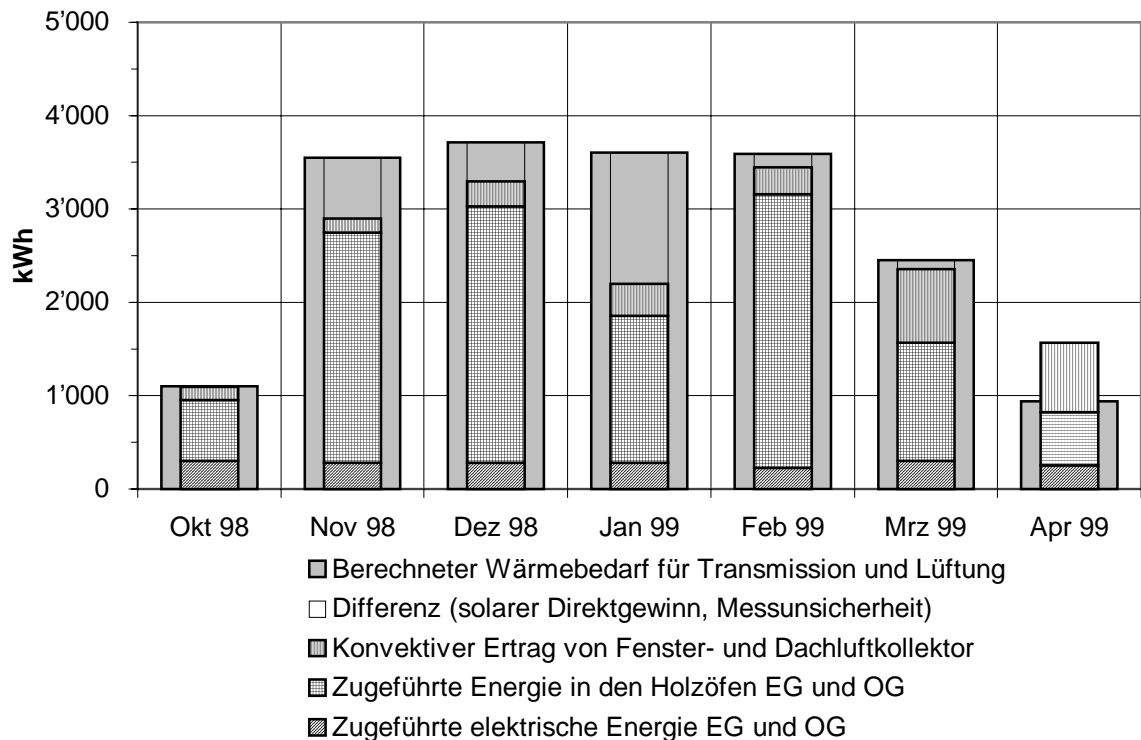


Fett: Gemessene Werte
Fett kursiv: Geschätzte oder theoretisch berechnete Werte
Mager: Indirekt rechnerisch sich ergebende Werte

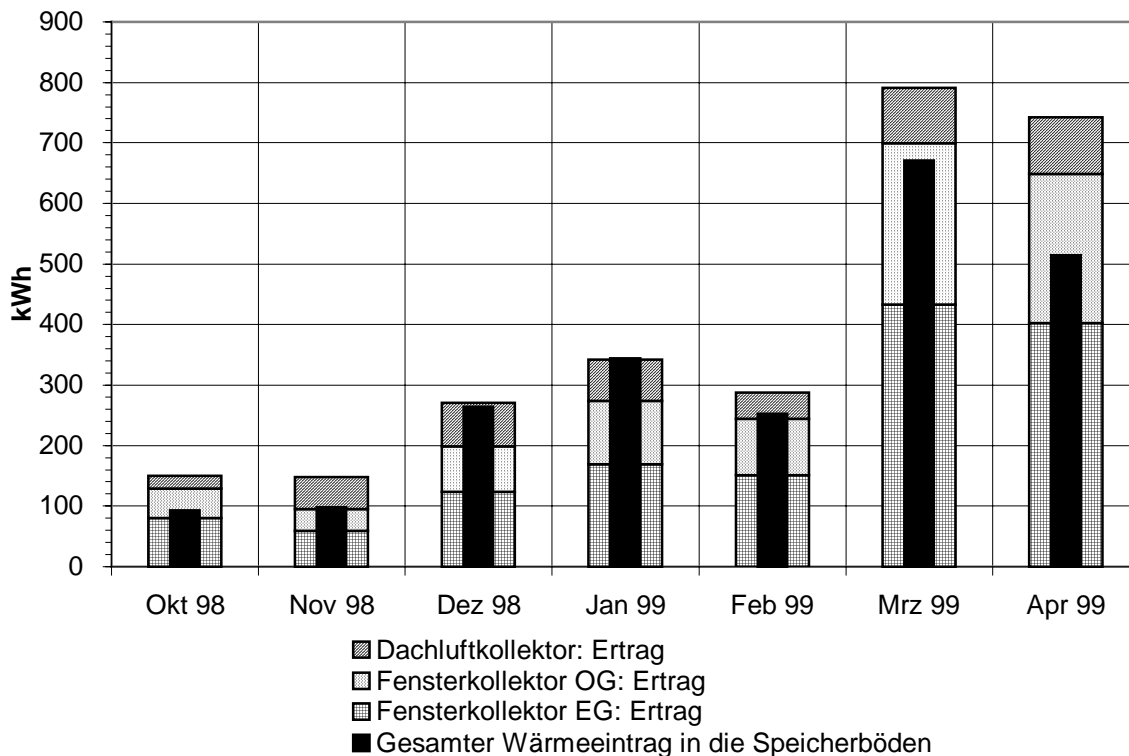
Figur 7: Energieflussdiagramm

4.4 Monatliche Energiebilanzen

In Figur 8 ist die Auswertung der monatlichen Energiebilanzen zu sehen. (Da das Gebäude weitgehend symmetrisch ist, wurden die Messungen auf die westliche Gebäudehälfte beschränkt; die Werte beziehen sich auf diesen Teil.) Es fällt auf, dass der Ertrag des Luftkollektorsystems anteilmässig recht klein ist: Der Hauptteil der Heizwärme wurde – entgegen der bei der Planung getroffenen Annahmen – durch die Holz-Speicheröfen in den Wohnungen aufgebracht. Es verbleibt ferner ein beträchtlicher – nicht messtechnisch erfasster – Rest, der in erster Linie auf das Konto der passiven Sonnenenergienutzung geht.



Figur 8: Monatliche Heizenergiebilanz



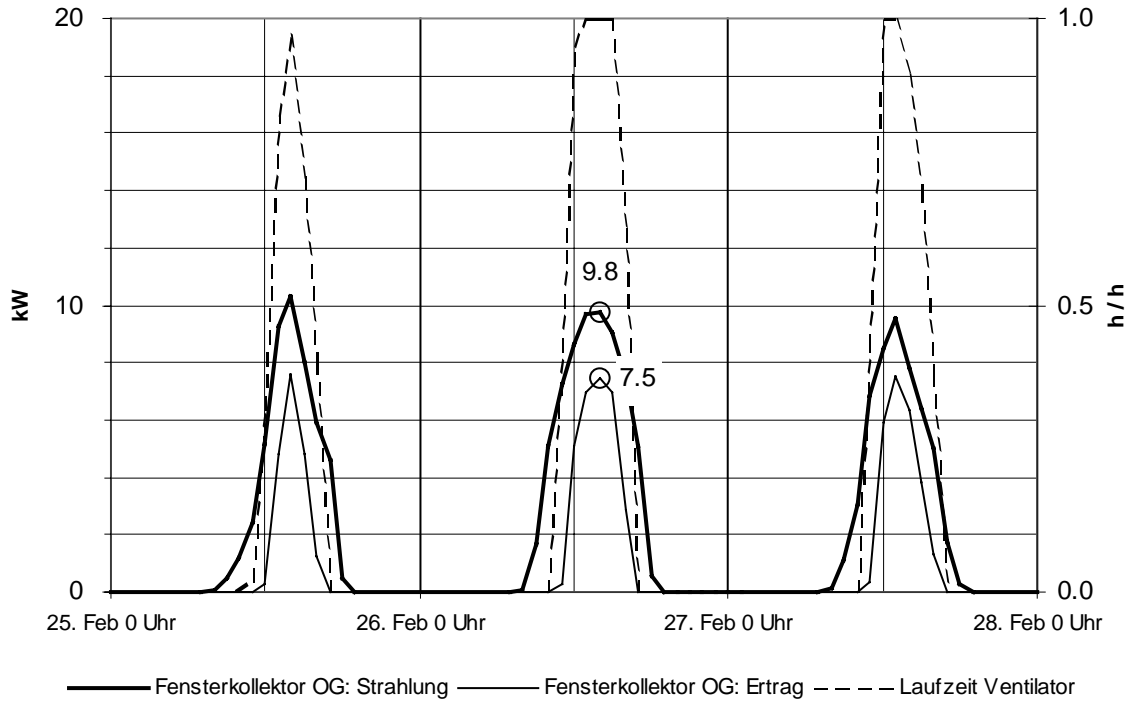
Figur 9: Monatsbilanzen des Luftkollektorkreislaufs

In Figur 9 sind die Monatsbilanzen des Luftkollektorkreislaufs dargestellt. Es zeigt sich zum einen wieder, dass die Erträge (ausser im März und April) absolut gesehen recht klein waren. Schon die Laufzeiten des Ventilators waren ungenügend: Gemäss Tabelle 4 konnten weniger als die Hälfte der Sonnenscheinstunden genutzt werden, im Oktober und November gar weniger als ein Drittel. Weiter zeigt sich, dass der Ertrag des Dachluftkollektors anteilmässig sehr klein ist. Darauf wird unten noch eingegangen.

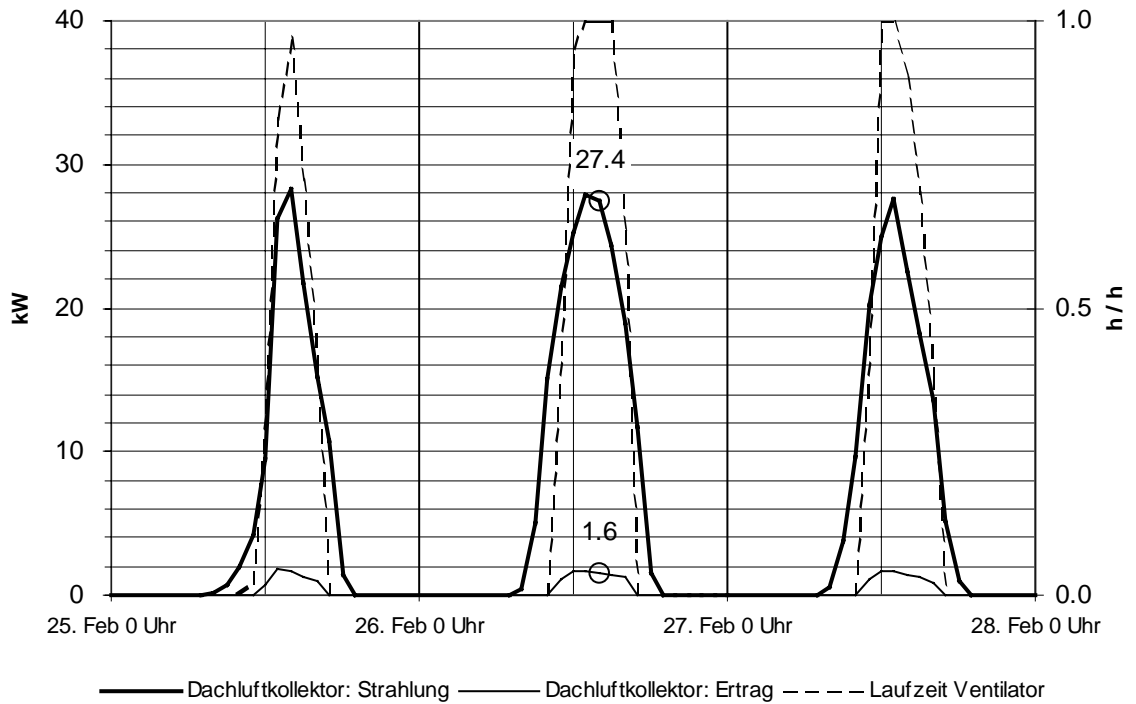
	Okt 98	Nov 98	Dez 98	Jan 99	Feb 99	Mrz 99	Apr 99
Sonnenscheinstunden SMA Basel-Binningen	72	77	80	101	52	118	116
Betriebsstunden des Luftkollektorventilators	19	24	35	50	24	54	56
Betriebsstunden in Prozent der Sonnenscheinstunden	26%	31%	44%	50%	46%	46%	48%

Tabelle 4: Betriebsstunden des Luftkollektorsystems versus Sonnenscheinstunden

4.5 Typischer Betrieb der Luftkollektoren



Figur 10: Ertrag des Fensterkollektors während einer typischen sonnigen Winterperiode



Figur 11: Ertrag des Dachkollektors während einer typischen sonnigen Winterperiode

Figur 10 und Figur 11 zeigen die Ertragsverläufe des Fenster- und des Dach-Luftkollektors während einer typischen Winterperiode.

Der Wirkungsgrad des Fensterkollektors ist mit einem Spitzenwert von gegen 75% fast unglaublich hoch; während umgekehrt der Dachkollektor keine 10% erreicht. Systematische Temperaturmessfehler durch das Takten des Ventilators (vgl. Abschnitt 5.3) scheiden als Erklärung aus, da die gemessenen Erträge auch in den Spitzenzeiten bei durchgehend laufendem Ventilator das gleiche Verhalten zeigen. Dennoch bleibt die Tatsache bestehen, dass in der Simulation der grosse Ertragsunterschied zwischen Dach- und Fensterkollektor nicht nachvollzogen werden konnte.

Als einzige mit der Simulation kompatible Erklärung bleibt, dass im Bereich des Dachkollektors Undichtigkeiten vorhanden sind, durch die Aussenluft angesaugt wird. Dies würde die grossen Energieverluste im Dachkollektor erklären. Weiter würde dann auch wirklich der Ertrag des Fensterkollektors zu hoch gemessen, weil der Luft-Volumenstrom um die Menge der angesogenen Aussenluft zu hoch angesetzt wäre.

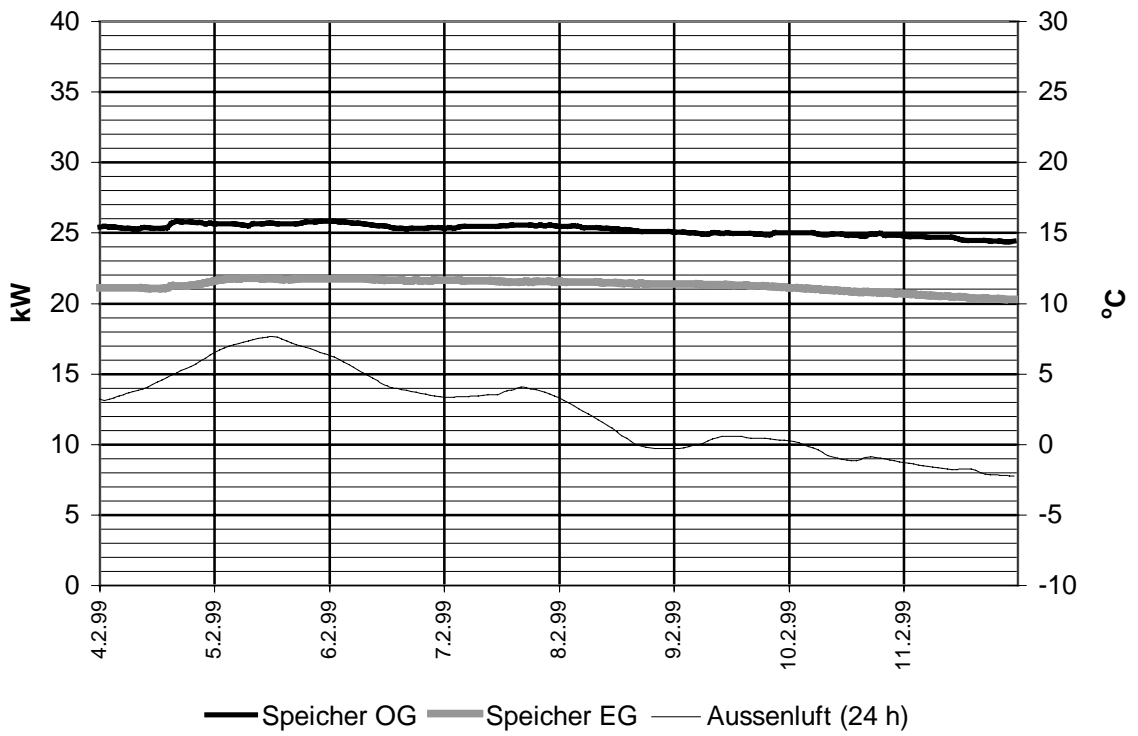
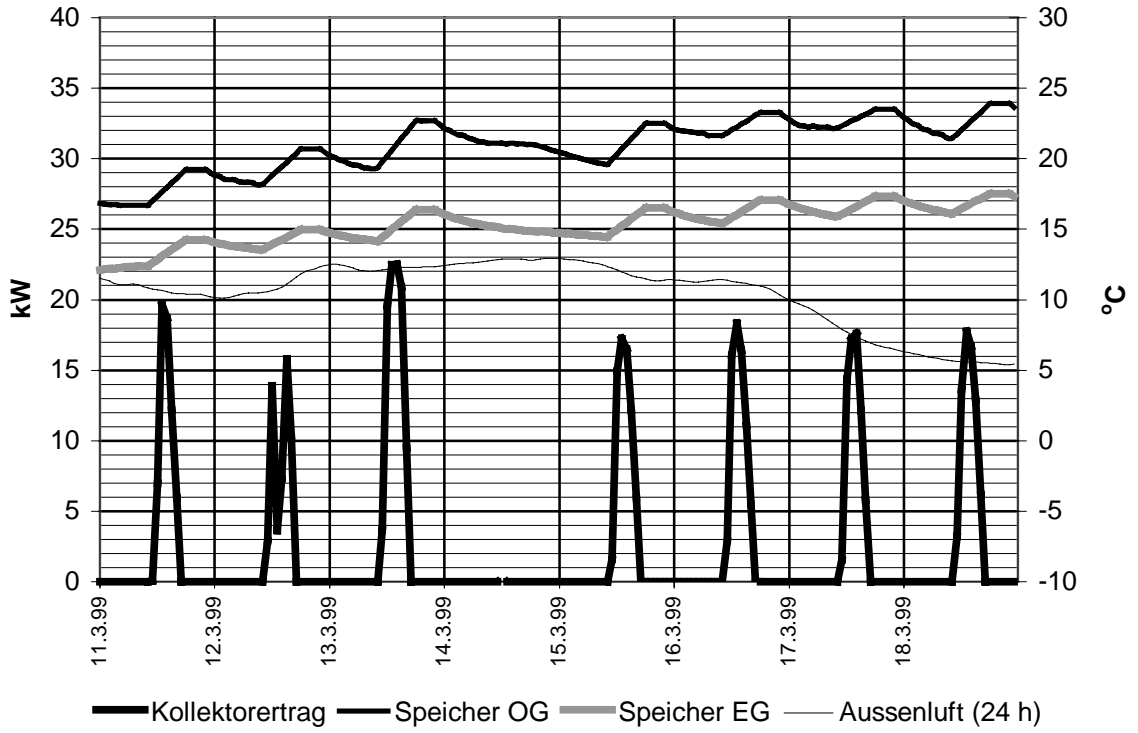
4.6 Bewirtschaftung des Speicherbodens

Figur 12 zeigt den Temperaturverlauf im Speicherboden, gemessen mit den bauseitig eingebauten Halbleiterfühlern. Im oberen Diagramm wird das Aufladen der Böden bei sonniger Witterung gezeigt. Zur Orientierung ist ebenfalls der Verlauf des konvektiven Kollektor-ertrags angegeben sowie der gleitende 24-Stunden-Mittelwert der Aussenlufttemperatur. Im unteren Diagramm ist eine sonnenarme und gleichzeitig relativ kalte Periode dargestellt.

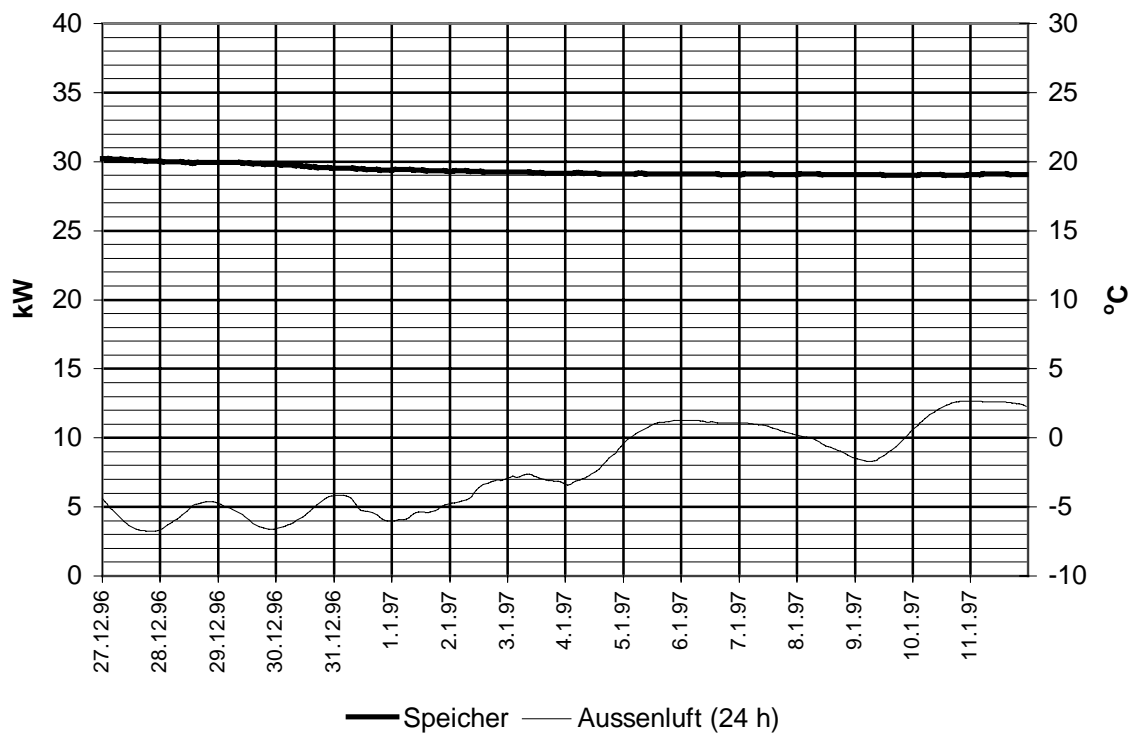
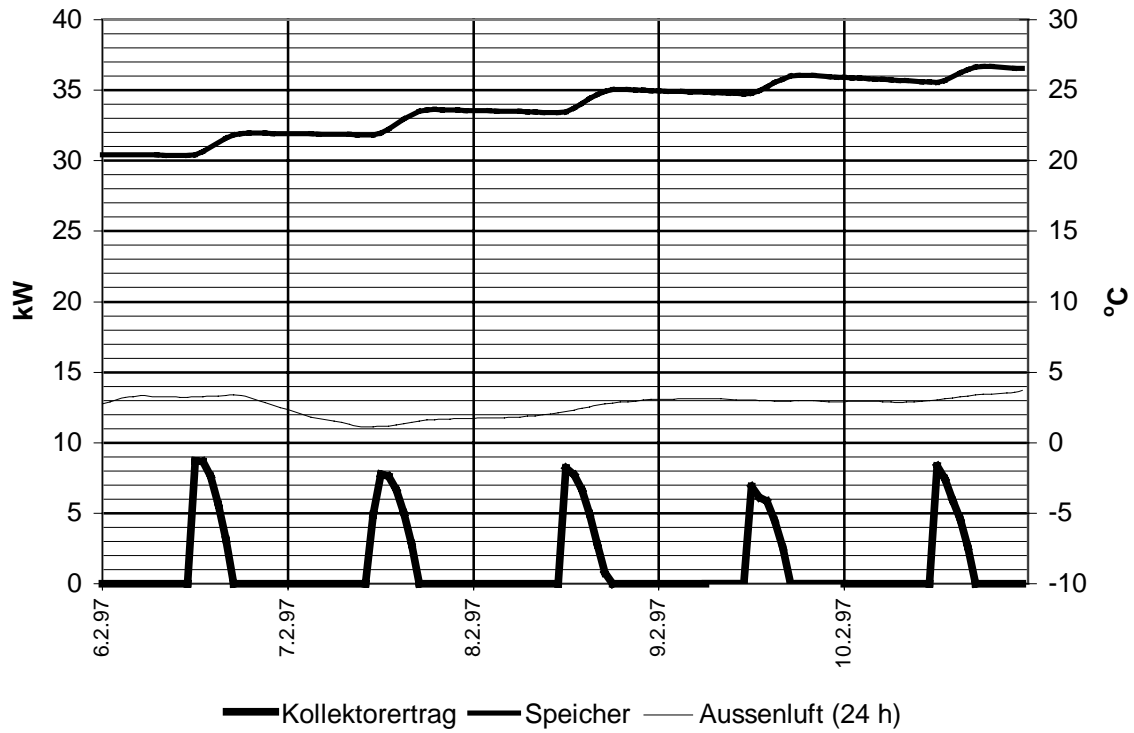
Es fällt auf, dass bei sonniger Witterung die Böden jeweils wie vorgesehen um einige Grad erwärmt werden, dass aber nachts die Wärme rasch wieder verloren geht. So wird im oberen Speicherboden maximal eine Temperatur von 24°C erreicht; im unteren Speicherboden gar nur knapp 18°C. So kann im EG nicht von einer Wärmeabgabe gesprochen werden, höchstens von einer Verminderung der Wärmeverluste gegen den Keller.

In der trüben Witterungsperiode erstaunt, dass sogar im oberen Speicherboden die Temperatur unter 15°C sinkt. Dies ist nur durch unerwünschte Rückzirkulation kalter Luft erklärbar.

Zum Vergleich wird in Figur 13 der Verlauf bei einem optimal konzipierten Gebäude gezeigt (es handelt sich um das EFH Huber in Oppligen, BE, von dem ebenfalls eine messtechnische Analyse vorliegt [Blatter 1997]). Man erkennt, wie dort die eingespeicherte Temperatur nachts erhalten bleibt (oberes Diagramm), und sogar in längeren trüben Perioden das Temperaturniveau im Boden nicht unter 19°C absinkt.

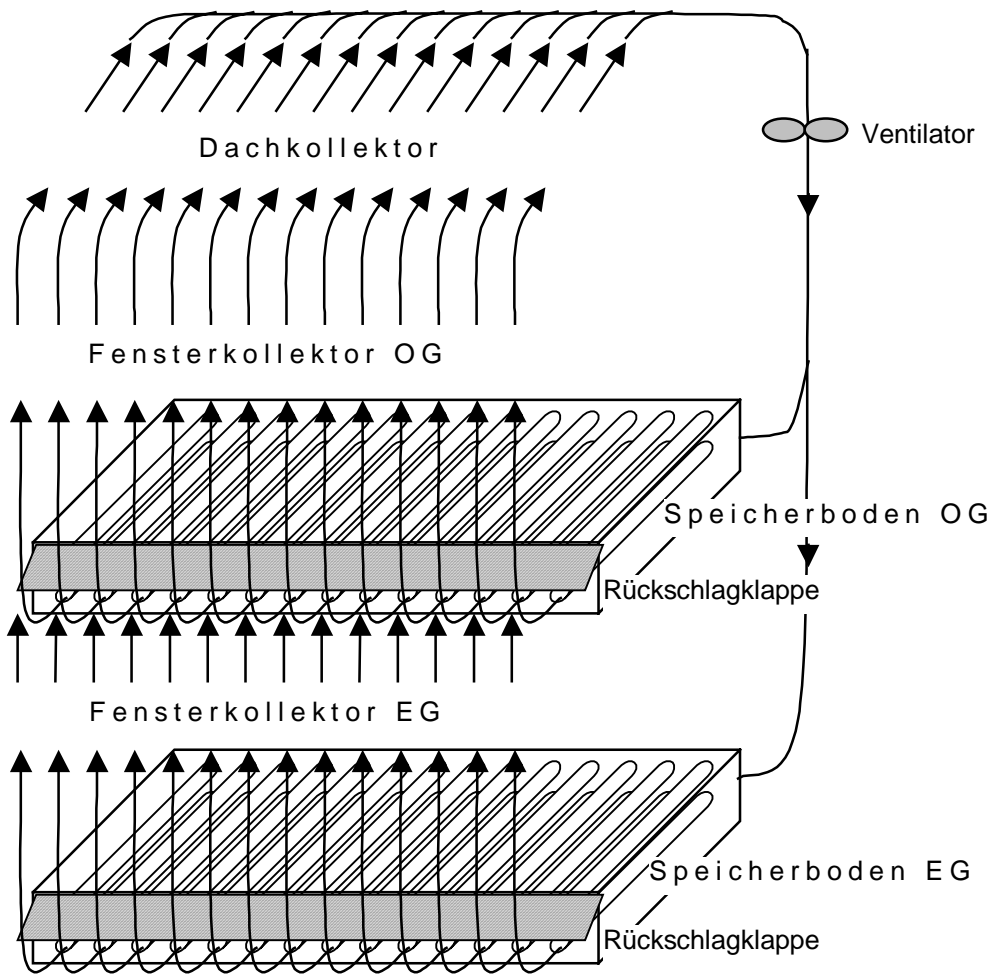


Figur 12: Auf- und Entladevorgang der Speicherböden (oben: Aufladung bei sonniger Witterung; unten: Entladung bei trüber Witterung)



Figur 13: Auf- und Entladevorgang des Speicherbodens bei einer mustergültigen Anlage (Haus Huber, Oppligen BE) (oben: Aufladung bei sonniger Witterung; unten: Entladung bei trüber Witterung)

Zur Erklärung dienen die unterschiedlichen Luftführungen in den Fensterkollektorsystemen der beiden Gebäude:

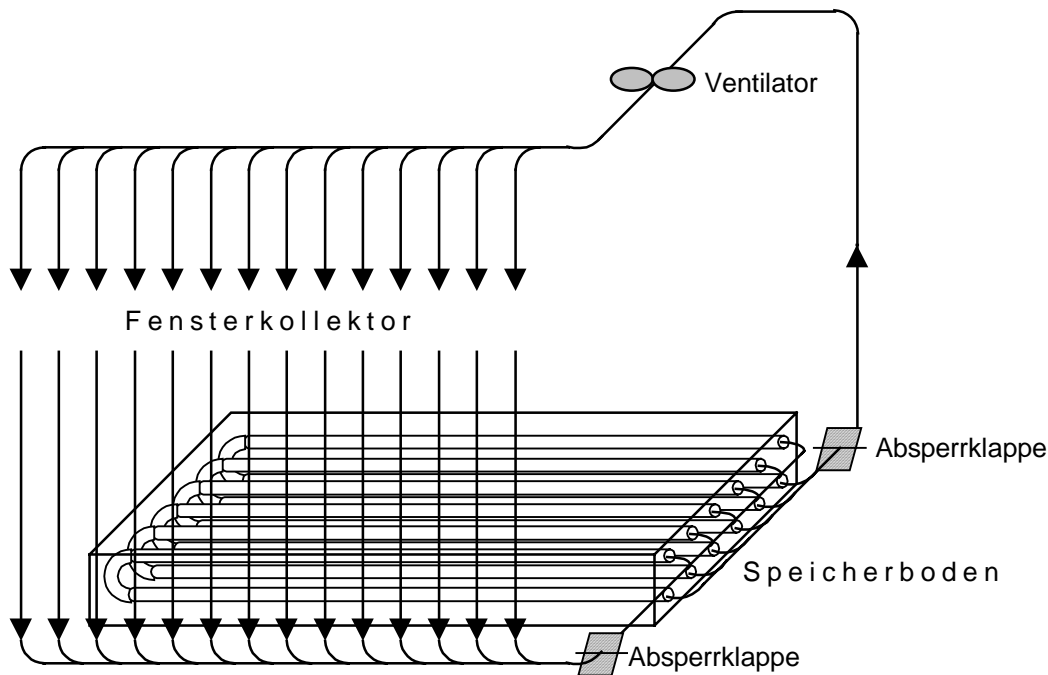


Figur 14: Luftführung im vorliegenden Gebäude

Wie Figur 14 zeigt, wird im vorliegenden Gebäude der Fensterkollektor von unten nach oben durchströmt. Die Überlegung des Architekten war, wie auch in anderen seiner Gebäude, dass der natürliche Auftrieb den Kollektorventilator unterstützt. Dieser Effekt erweist sich aber zum einen als relativ unbedeutend, jedenfalls lässt sich auf diese Weise nicht nennenswert Ventilatorenergie einsparen. Auf der anderen Seite hat diese Luftführung auch Nachteile: Die Luft durchströmt auf hohem Temperaturniveau den nur einfach verglasten Dachkollektor sowie anschliessend einen relativ langen Kanal auf der Nordseite des Gebäudes. Dies führt zu Verlusten und somit zu einem schlechteren Wirkungsgrad.

Das Auskühlen der Speicherböden sollte durch eine Rückschlagklappe verhindert werden, die als Kunststoffolie ausgebildet ist und sich über die ganze Breite des Kollektorfensters erstreckt. Wie sich zeigt, ist aber die Formstabilität einer solchen Folie absolut ungenügend,

um auch nur eine annähernd akzeptable Abdichtung zu erreichen. Dass im nördlichen Kanal motorisch betriebene Absperrklappen vorgesehen sind (hier nicht eingezeichnet), ändert daran nichts: Die Luft kann auch innerhalb des Fensterkollektors selbst hin und zurück zirkulieren (ein Phänomen, das auch bei den Abgangsleitungen von Warmwasserspeichern bekannt ist).



Figur 15: Luftführung in der mustergültigen Anlage (Haus Huber, Oppligen)

Im Haus Oppligen ist demgegenüber die Strömungsrichtung umgekehrt, wodurch die Luft ohne nennenswerte Wärmeverluste dem Speicherboden zugeführt werden kann. Seitliche Sammelkanäle ermöglichen den Einbau von genormten Absperrklappen, deren Dichtigkeit gewährleistet ist.

Fazit:

Auch wenn insbesondere der positive Effekt der Strömungsumkehr in der Simulation nicht nachvollzogen werden konnte, würde der Autor persönlich und intuitiv jederzeit das System nach Figur 15 zur Nachahmung empfehlen, während Luftführungen nach Figur 14 jedenfalls nur mit gebührender Sorgfalt angewendet werden sollen.

5. Ergebnisse der Computersimulation

(Verfasser: Daniel Brühwiler, Fällanden)

5.1 Fragestellung

Folgende Fragestellungen waren mit der Simulation anzugehen:

- Konkurriert das Luftkollektorsystem mit der WRG der mechanischen Lüftung bzw. wie gross ist diese Konkurrenz?
- Beurteilung der Kombination von Dach- und Fassadenkollektoren (d.h. Fensterkollektoren). Was brächten Fassadenkollektoren bzw. Dachkollektoren je für sich allein? Rechtfertigt der Ertrag des Gesamtsystems die Kombination der beiden Kollektorarten?
- Ist es sinnvoll, die Kollektoren in Serie zu schalten? Würde der Parallelbetrieb (bei gleicher Gesamtluftmenge) mehr bringen? Diese Frage wird nicht beantwortet, weil ein sinnvoller Parallelbetrieb von der Luftführung her gar nicht möglich ist. Stattdessen wird eine Simulationsvariante mit umgekehrter Richtung der Luftströmung präsentiert, welche sich aufgrund der Interpretation der Messresultate aufdrängte.
- Wie vergleichen sich die saisonalen Verläufe der Erträge von Fassaden- und Dachkollektoren?
- Wie sieht der zeitliche Verlauf der Wärmeabgabe der Hypokausten aus?
- Wie verhält sich das Gebäude an zwei andern schweizerischen Standorten (Südschweiz, alpines Klima)? Welche Kollektorfläche wäre dort optimal?
- Wie sehen die Oberflächentemperaturen auf der Raumseite des Fensterkollektors aus? Verursachen sie Probleme? (Diese Untersuchung wird für alle drei Klimastationen vorgenommen).
- Wie effizient wäre es, das Warmwasser im Sommer mit dem Luftsystem (über einen Wärmetauscher) aufzubereiten?

Zum Einsatz gelangt das Simulationsprogramm TRNSYS 15.0 [TRNSYS 2000].

5.2 Randbedingungen und Modelle

Aussenklima

Es wurden die Wetterdaten aus dem Messprojekt verwendet. Für die Parametervariation „Klimaregionen“ wurden Klimadaten (Stundenwerte) aus der Meteonorm 97 [METEONORM 97] verwendet.

Gebäude

Das Gebäudemodell (TRNSYS-Type 56: Mehrzonenmodell) wurde aufgrund von Plänen des Architekten und von telefonisch eingeholten Detailinformationen erstellt. Zudem konnte auf eine Material- und Massliste, die an der Forschungsstelle Solararchitektur der ETH Zürich erstellt wurde, zurückgegriffen werden [Haas 1999]. Vom gesamten Gebäude wurde nur die (gemessene) westliche Hälfte simuliert. Insgesamt wurde eine Aufteilung in vier thermische Zonen vorgenommen: EG Süd, EG Nord, OG und DG.

Luftwechsel

Über den Luftaustausch im Gebäude liegen keine Messdaten vor. Bekanntlich ist im Gebäude eine mechanische Lüftung mit Erdregister und Wärmerückgewinnung (WRG) vorhanden. Da letztere gemäss Messungen nur wenige Stunden in Betrieb war, wurde in der Simulation grundsätzlich von einer Fensterlüftung ausgegangen. Diese unterliegt in der Realität einem starken Benutzereinfluss, welcher für die Simulation abstrahiert werden musste. Folglich wurde angenommen, dass die lufthygienisch notwendige Luftmenge von $25 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person ins Gebäude eingebracht wird.

Interne Lasten

Bei den Personen wurde von der realen Anzahl der Bewohner ausgegangen und ein Anwesenheitsprofil festgelegt, welches sich täglich wiederholt.

Die Wärmeabgabe der Elektrogeräte wurde so festgelegt, dass die Monatssummen in Simulation und Messung möglichst nahe Übereinstimmung zeigen.

Kollektor-Speicher-System

Die Kollektoren wurden im TRNSYS-Type 56 als Gebäudezonen modelliert. Bei den Fensterkollektoren war es dabei eine grosse Hilfe, dass im neuen TRNSYS der Version 15 auch Innenfenster modelliert werden können. Im realen Gebäude werden die Storen von den Bewohnern manuell bedient. Aus den Messungen ist über die Storenstellung nichts bekannt. In der Simulation wird angenommen, dass die Storen abgesenkt werden, wenn die Sonne auf die Fassade scheint und die Temperatur des dahinterliegenden Raumes mindestens $23.5 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt (bei tieferer Raumtemperatur wird die Einstrahlung als Direktgewinn genutzt).

Die Simulation der Kollektoren als Gebäudezonen bringt auch ein Problem mit sich, weil jeder Gebäudezone nur eine Temperatur zugeordnet ist, ein Kollektor jedoch in Strömungsrichtung ein deutliches Temperaturprofil aufweist. Dieses Profil wurde angenähert, indem jeder Kollektor in zwei Zonen aufgeteilt wurde, die nacheinander durchströmt werden.

Für die Speicherböden (Hypokausten) lagen keine Pläne vor. Das Simulationsmodell musste daher aufgrund von Anzahl Rohren und Rohrlängen sowie einem Foto der in die Schalung gelegten Rohre vor dem Betonieren erstellt werden. Grundsätzlich stellt TRNSYS für die Simulation von Hypokausten ein Modell zur Verfügung (Type 160, [Fort 1994]). Es stellte sich jedoch heraus, dass der Gleichungslöser von TRNSYS überfordert ist, wenn mehr als ein Hypokaust an die gleiche Gebäudezone angebunden wird. Die Folge waren Konvergenzprobleme, welche innert nützlicher Frist nicht zu lösen waren. Deshalb wurde als Näherung ein Lösungsansatz verwendet, der für einbetonierte wasserführende Systeme entwickelt wurde. Dabei wird die Wärme des Mediums über einen thermischen Widerstand an die Rohrebene abgegeben, deren Mitteltemperatur bekannt ist [Koschütz 2000].

Holzöfen

Die Holzöfen sind Bedarfsheizungen, die einem starken Benutzereinfluss unterliegen und zu starken Temperaturschwankungen im Gebäude führen können. Eine genaue Modellierung ist daher sehr aufwändig. Bei dieser Simulation wurden daher die Holzöfen durch eine thermostatisch geregelte Heizung ersetzt. Die Reglereinstellung wurde so gewählt, dass die von der Simulation ermittelten Monatsmitteltemperaturen im Gebäude möglichst genau mit den gemessenen übereinstimmen. Diese Reglereinstellung wurde dann für alle Simulationsvarianten beibehalten.

5.3 Vergleich von Messung und Simulation

Die erste Aufgabe der Simulation besteht darin, ein Modell zu erstellen, welches möglichst nahe an den gemessenen Zustand des Gebäudes herankommt. Dieses Ziel konnte im vorliegenden Projekt nicht im gewünschten Ausmass realisiert werden, weil das Gebäude gemäss Messdaten einige Probleme aufweist:

- Ausserhalb der Betriebszeiten des Kollektorventilators dringt infolge Schwerkraftzirkulation und nicht ganz dichter Rückschlagklappe kalte Kollektorluft in die Speicher ein und kühlt diese aus. Dies ist während der Heizperiode an etwa 4500 Stunden der Fall, weshalb der dadurch verursachte Mehrbedarf an Heizenergie wahrscheinlich nicht vernachlässigbar ist, auch wenn er nicht genau beziffert werden kann.

- Am Kollektorfuss hat man versucht, das Eindringen von Kaltluft ins beheizte Volumen mit einer Rückschlagklappe zu verhindern. Die Luftführung durchdringt jedoch die Wärmedämmebene des Gebäudes an zwei weiteren Stellen: beim Verbindungsstück zwischen Fenster- und Dachkollektor sowie am Ende des Dachkollektors beim Eintritt in den Luftkanal im Dachgeschoss. An diesen Stellen sind – gemäss vorliegenden Plänen – keine Absperrklappen montiert worden. Da der Dachkollektor bei fehlender Sonneneinstrahlung sehr kalt wird, muss auch hier mit Luftströmen gerechnet werden, die an etwa 4500 Stunden während der Heizperiode zur Auskühlung des Gebäudes beitragen. Die im Luftkanal des Dachgeschosses und im Verbindungsstück zwischen Fenster- und Dachkollektor gemessenen Temperaturen stützen diese These. Der verursachte Mehrbedarf an Heizenergie kann nicht beziffert werden.
- Der Kollektorventilator taktet. In ca. 620 Stunden während der Heizperiode war der Ventilator eingeschaltet. Davon waren allerdings nur knapp 60 Stunden vollständige Betriebsstunden. In den übrigen 560 Stunden war der Ventilator nur teilweise in Betrieb (im Mittel etwa 20 Minuten). Offenbar konnte aus den Messergebnissen keine Ursache für diesen Taktbetrieb ermittelt werden. Die Folge davon ist jedoch eine massive Ertrags einbusse.

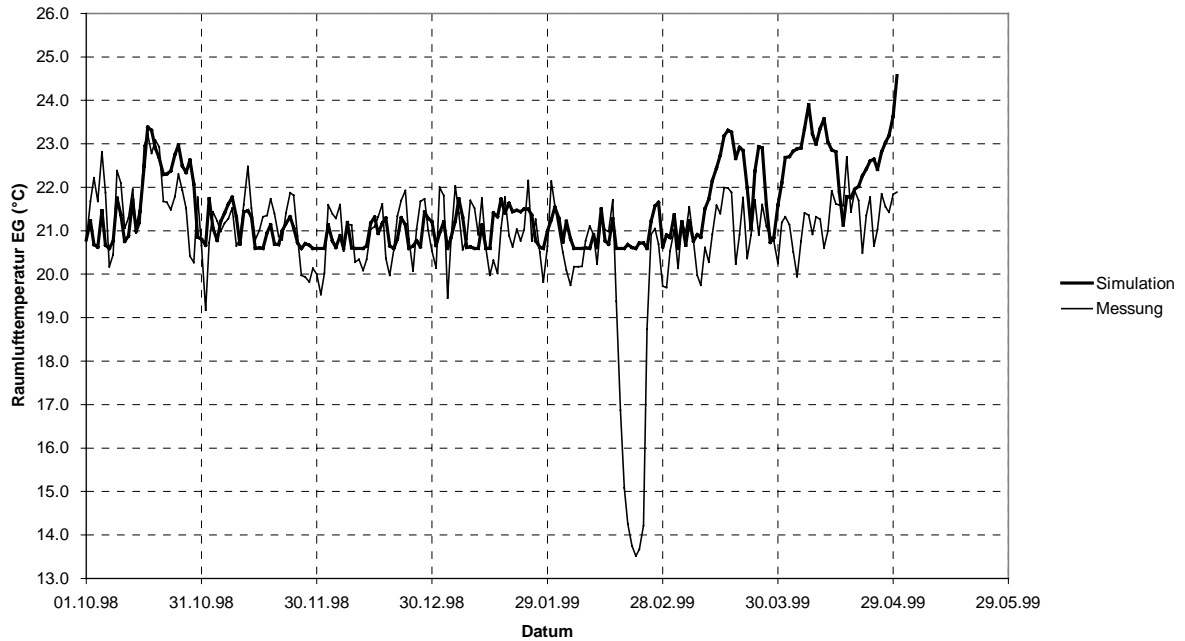
Wollte man den gemessenen Betrieb des Gebäudes in der Simulation genau nachvollziehen, müsste man alle diese Phänomene berücksichtigen. Beim Taktbetrieb des Ventilators ist dies schon deshalb nicht möglich, weil mit der Stundenauflösung der Messdaten gar keine Detailinformation über das Takten vorliegt. Zudem ist der übliche Zeitschritt der Simulation ebenfalls der Stundenschritt. Eine Verkürzung des Zeitschritts würde – wenn auch prinzipiell möglich – den vereinbarten Aufwand für dieses Projekt sprengen.

Bei den erwähnten Kaltluftströmen müssten für die Simulation mit viel Aufwand separate Modelle erstellt werden, was im Rahmen eines solchen Projektes nicht drinliegt. Zudem könnten diese Modelle bei der vorliegenden schmalen Messdatenbasis gar nicht vernünftig validiert werden. Deshalb wird auf die genaue Berücksichtigung dieser Phänomene in der Simulation verzichtet. Lediglich in einer Simulationsvariante wird ein konstanter „Kriechstrom“ vom Dachkollektor in den Luftkanal und ins Verbindungsstück zwischen Fenster- und Dachkollektor eingebaut. Damit soll gezeigt werden, welchen Einfluss solche „Undichtigkeiten“ auf den Heizenergiebedarf des Gebäudes haben können.

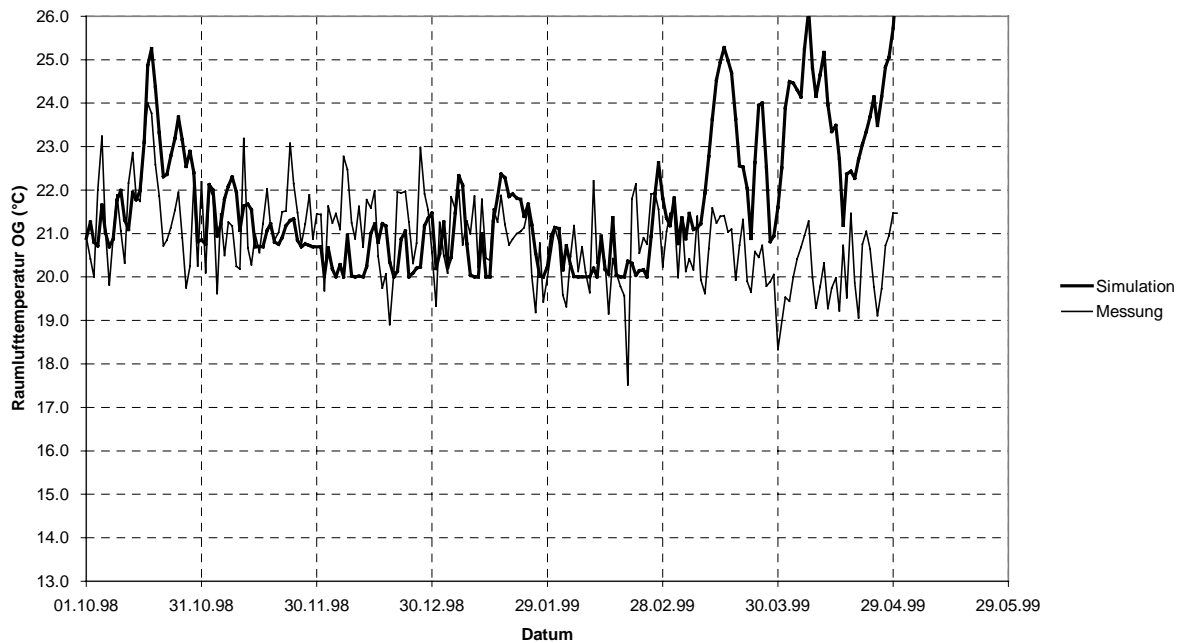
Das Takten des Kollektorventilators bringt auch noch ein Problem bei der Messgenauigkeit der Kollektorerträge mit sich. Dies gilt es zu berücksichtigen, wenn im Folgenden Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Kollektorerträgen auftreten.

Raumtemperaturen

Figur 16 und Figur 17 zeigen die Raumlufthtemperaturen aus Simulation und Messung als Tagesmittelwerte. Grundsätzlich konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Folgende Punkte sind bemerkenswert:



Figur 16: Vergleich Simulation/Messung der Tagesmittel der Raumlufthtemperatur EG

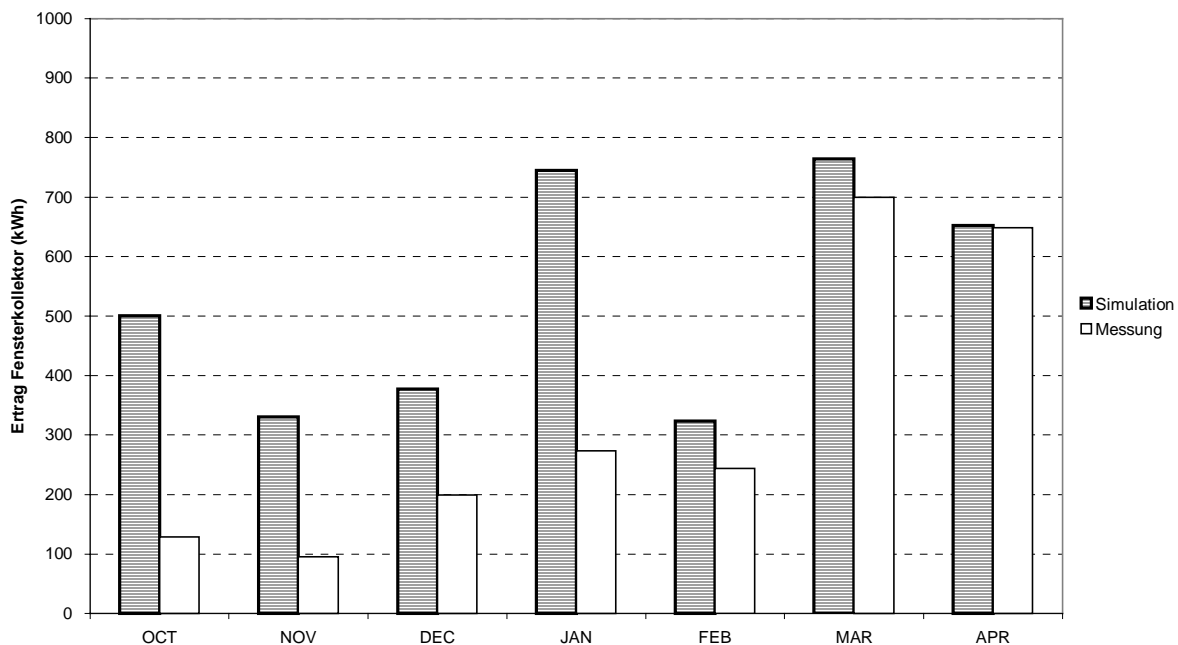


Figur 17: Vergleich Simulation/Messung der Tagesmittel der Raumlufthtemperatur OG

- Die kurzfristigen Schwankungen, die in der Messung auftauchen und die ein typisches Merkmal der Holzofenheizung (Bedarfsheizung) sind, fehlen in der Simulation (thermostatisch geregelte Heizung).
- Im EG zeigt die Messung eine Woche ohne Heizbetrieb (Ferien). Dies wurde in der Simulation nicht berücksichtigt.
- Im Frühjahr liegen die Temperaturen der Simulation deutlich höher als bei der Messung. Sie liegen so hoch, dass eigentlich nicht mehr geheizt werden müsste. Hier zeigt sich nun deutlich die Wirkung des höheren Kollektorbeitrages, weil das System in der Simulation nicht taktet (s. auch weiter unten den Vergleich der Kollektorbeiträge).

Kollektorbeiträge

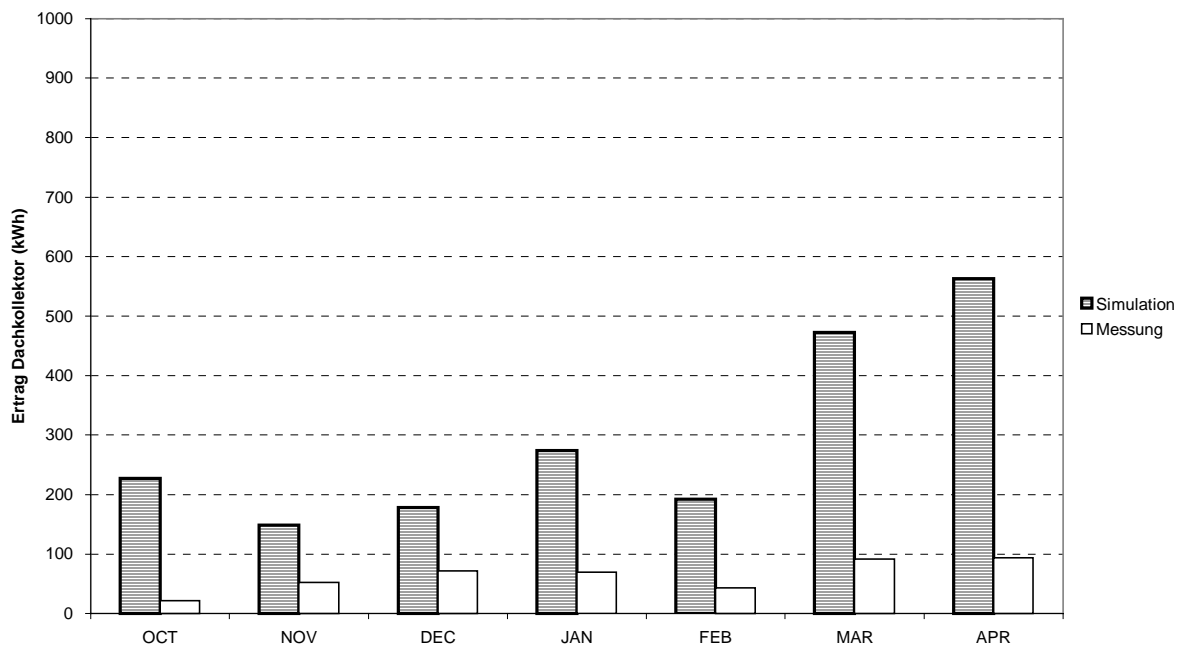
In Figur 18 werden die gemessenen und simulierten Erträge der Fensterkollektoren miteinander verglichen. Die Übereinstimmung lässt zu wünschen übrig. Als Erklärungsversuch sollen die folgenden Bemerkungen dienen.



Figur 18: Vergleich Simulation/Messung der Erträge der Fensterkollektoren

- Da das Takten des realen Ventilators in der Simulation nicht berücksichtigt wurde, ist es nicht erstaunlich, dass die simulierten Kollektorerträge klar höher liegen als die gemessenen.
- Beim Fensterkollektor kommt der Benutzereinfluss (Bedienung der Absorber-Storen) zum Tragen. Es muss angenommen werden, dass Messung und Simulation nicht die gleichen Storestellungen aufweisen.
- Erstaunen mag die Annäherung von gemessenen und simulierten Erträgen in den Monaten März und April. Möglicherweise liegt das daran, dass durch das Takten des Ventilators bei der Ertragsmessung ein Fehler aufgetreten ist. Gestützt wird diese These beim Vergleich der Erträge des Dachluftkollektors (s. weiter unten); dort klaffen gemessener und simulierter Ertrag im März/April noch weiter auseinander als in den übrigen Monaten.

In Figur 19 werden die gemessenen und simulierten Erträge des Dachluftkollektors miteinander verglichen. Hier sind die Unterschiede noch krasser als beim Fensterkollektor, obwohl in der Simulation suboptimale Betriebsparameter eingesetzt wurden (schlechter Wärmeübergang am Absorber, leicht undichter Kollektor). Vor allem in den Monaten März/April liegen die gemessenen Erträge unerklärlich tief. Falls die oben aufgestellte These vom Messfehler nicht zutrifft, müsste der Kollektor auch auf Konstruktionsfehler untersucht werden (z.B. starke Undichtigkeit, welche v.a. im Betrieb viel Aussenluft in den Kollektor eindringen lässt). Auf alle Fälle genügen der Hinweis auf das Takten und die Einfachverglasung nicht, um die tiefen gemessenen Erträge (v.a. März/April) zu erklären.

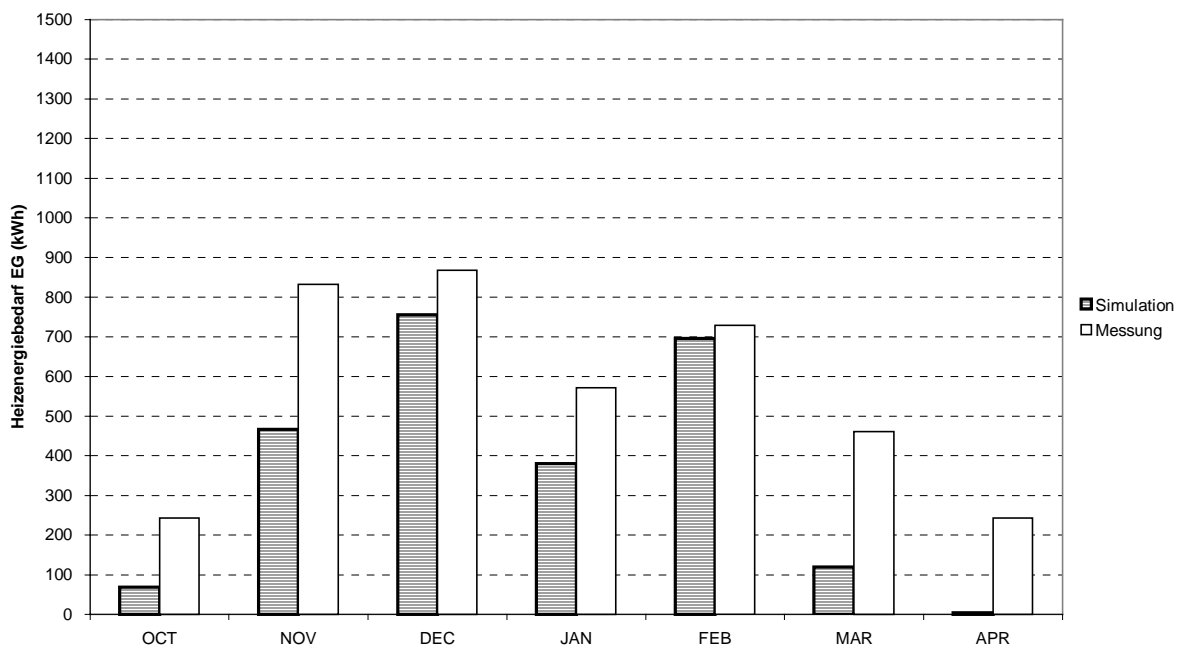


Figur 19: Vergleich Simulation/Messung der Erträge des Dachluftkollektors

Heizenergiebedarf

Wie gezeigt wurde weist das simulierte Gebäude deutlich höhere Kollektorerträge auf als das gemessene. Entsprechend kann man erwarten, dass das simulierte Gebäude einen kleineren Heizenergiebedarf aufweist als das gemessene. Figur 20 und Figur 21 zeigen, dass dem tatsächlich so ist. Zur Bestimmung des gemessenen Heizenergiebedarfs wurde der Endenergiebedarf (Holzverbrauch) auf 70 % reduziert, was dem angenommenen Wirkungsgrad des Holzofens entspricht.

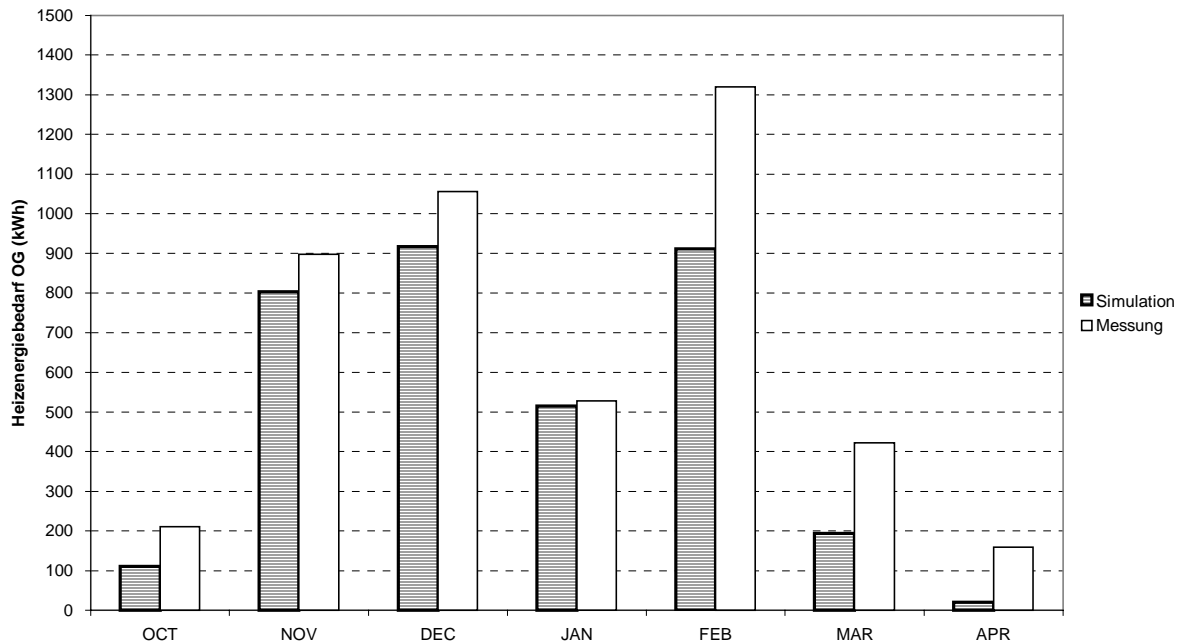
In diesem Simulationslauf wurde berücksichtigt, dass ausserhalb der Kollektorbetriebszeit kleine Kaltluftmengen vom Dachkollektor in das Kanalsystem und ins Verbindungsstück zwischen Fenster- und Dachkollektor eindringen. Die Luftgeschwindigkeiten wurden dabei als konstant und sehr klein (ca. 3 cm/s) angenommen. Diese Auskühleffekte erhöhen die Verluste und damit den Heizenergiebedarf ausschliesslich in der oberen Wohnung.



Figur 20: Vergleich Simulation/Messung des Heizenergiebedarfs der Wohnung EG

In der Wohnung EG (Figur 20) liegt der simulierte Heizenergiebedarf in den meisten Monaten deutlich tiefer als der gemessene. Nur im Februar kommt es beinahe zur Übereinstimmung. Diese Trendabweichung erklärt sich dadurch, dass im realen Betrieb im Februar eine Woche lang nicht geheizt wurde (Ferien), während in der Simulation die Heizung durchgehend in Betrieb war.

Bei der oberen Wohnung (Figur 21) sind die Unterschiede zwischen Messung und Simulation etwas weniger ausgeprägt. Dies liegt wohl daran, dass in der Simulation Auskühleffekte beim Luftkanal DG und beim Verbindungsstück Fenster- und Dachkollektor berücksichtigt wurden.



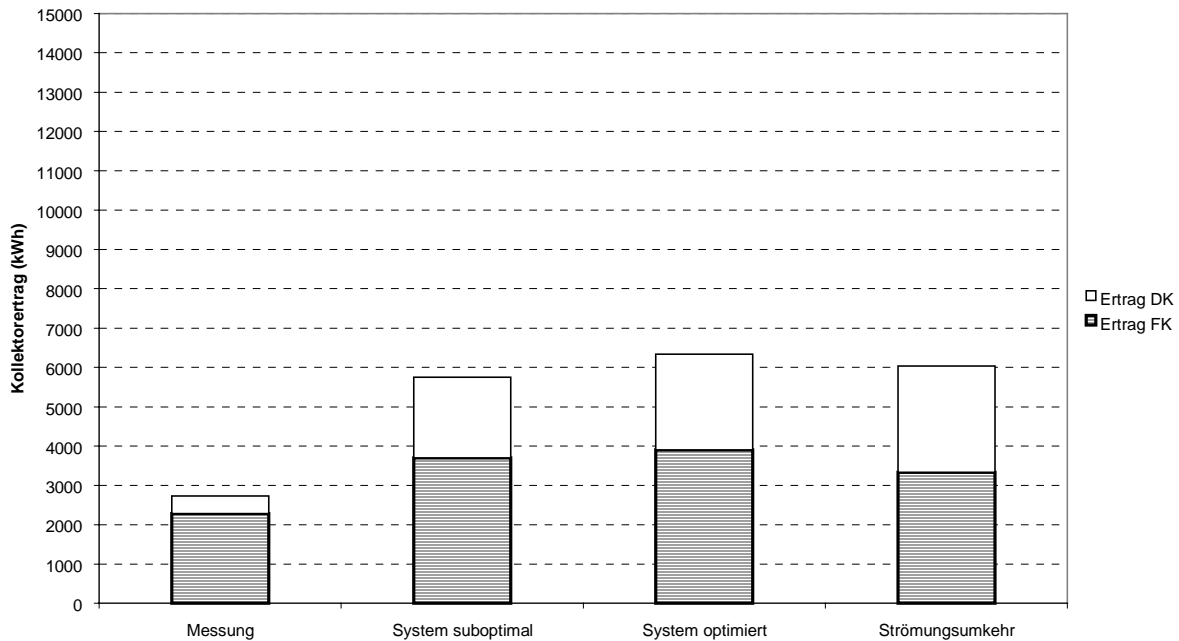
Figur 21: Vergleich Simulation/Messung des Heizenergiebedarfs der Wohnung OG/DG

5.4 Systemoptimierung und Strömungsumkehr

Es ist klar, dass die mittels Simulation durchzuführende Parameterstudie von einem optimal funktionierenden Gebäude und System ausgehen muss. Nach dem Modellaufbau und dem Vergleich zur Messung wurde daher das System wieder optimiert, d.h. der Dachkollektor wurde nun als dicht angenommen, der Wärmeübergang am Absorber wurde auf einen höheren Wert gesetzt und die Kaltluftströme vom Dachkollektor ins Innere der Dämmhülle (Luftkanal DG und Verbindung zwischen Fenster- und Dachkollektor) wurden eliminiert.

Ausgehend von diesem optimierten Gebäude wurde in einer weiteren Variante die Strömungsrichtung umgekehrt. Die Idee für diese Variante entstand aufgrund der kleinen gemessenen Erträge des Dachkollektors; es wurde vermutet, dass das Gesamtsystem besser arbeitet, wenn zuerst der einfach verglaste Dachkollektor durchströmt würde.

Die gesamten Kollektorerträge (Fenster- und Dachkollektor) der genannten Varianten sind in der Figur 22 dargestellt.

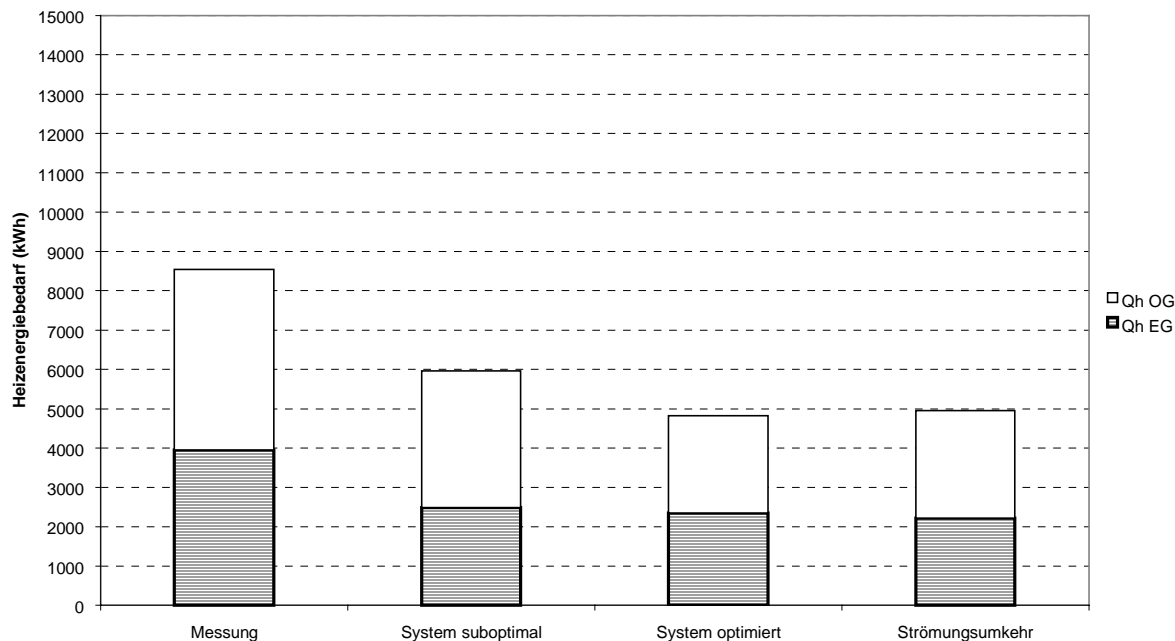


Figur 22: Kollektorerträge aus Messung und drei Simulationsvarianten im Vergleich

Die Optimierung der Parameter des Dachkollektors DK (Wärmeübergang am Absorber, Dichtigkeit) führen zu einer sichtbaren, aber nicht überwältigenden Ertragsverbesserung dieses Kollektors. Der kleine gemessene Ertrag kann sicher nicht mit einem schlechten Wärmeübergang am Absorber erklärt werden. Ebenso wenig können kleine Undichtigkeiten dafür verantwortlich gemacht werden; wenn schon müsste es sich um massive Undichtigkeiten handeln, welche eigentlich auch leicht festzustellen sein müssten.

Die Strömungsumkehr bringt – etwas überraschend – nicht die erwartete Ertragsverbesserung. Zwar wird der Ertrag des Dachkollektors tatsächlich etwas vergrößert, hingegen wird der Ertrag des Fensterkollektors etwa im gleichen Ausmass geschmälert. Dass der Ertrag insgesamt etwas kleiner erscheint als beim optimierten Ist-Zustand hat eher mit Zufälligkeiten zu tun. Da die Temperaturverhältnisse im Kollektor durch die Strömungsumkehr ändern, musste auch der Thermostat, welcher den Ventilator ein- und ausschaltet, umplatziert werden. Dadurch wies der Kollektor insgesamt einige Betriebsstunden weniger auf als beim optimierten Ist-Zustand. Je nach Platzierung dieses Thermostaten könnte statt einem leicht reduzierten ein leicht höherer Ertrag resultieren.

In Figur 23 wird der Heizenergiebedarf derselben drei Varianten und der Messungen verglichen.



Figur 23: Heizenergiebedarf aus Messung und drei Simulationsvarianten im Vergleich

Wie nach der Grafik über die Kollektorerträge zu erwarten war, bringt die Strömungsumkehr im Vergleich zum optimierten System keine nennenswerte Veränderung des Heizenergiebedarfs.

Relevant ist hingegen die durch die Systemoptimierung erreichte Verringerung des Heizenergiebedarfs. Sie betrifft vor allem die obere Wohnung, d.h. sie ist nicht so sehr auf die Verbesserung des Dachkollektorertrages zurückzuführen (von dieser müsste die untere Wohnung mindestens ebenso profitieren), sondern eher auf die Eliminierung der weiter oben beschriebenen Kaltluftströme im Bereich des Luftkanals DG und der Verbindung Fenster- zu Dachkollektor.

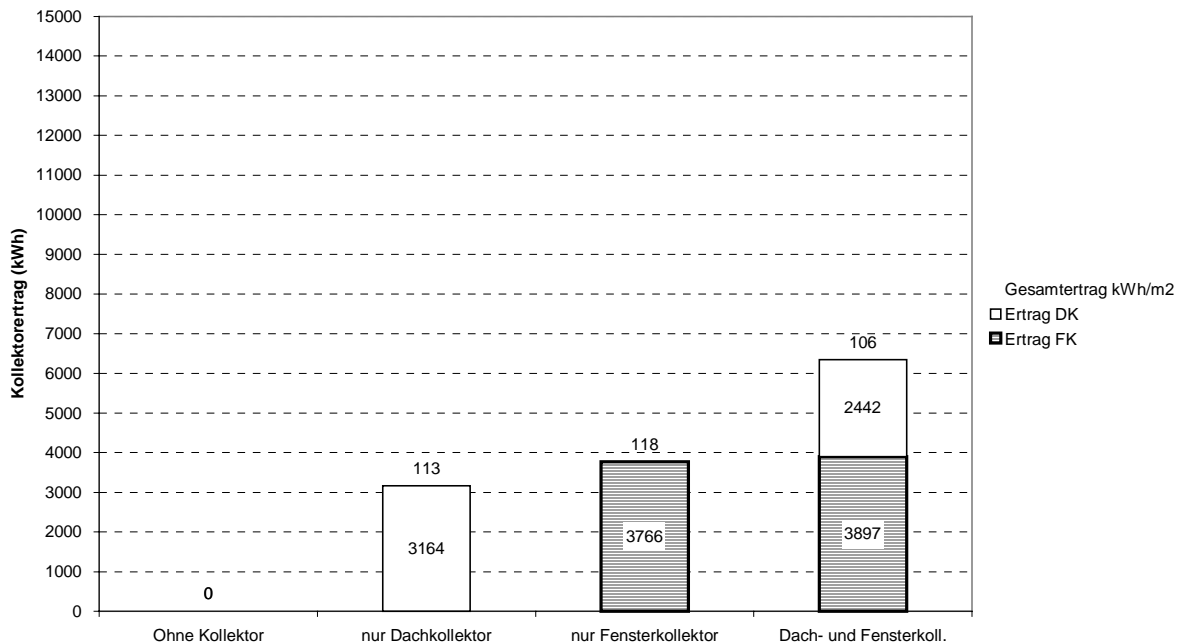
Dieses Ergebnis zeigt, dass der Eliminierung dieser Kaltluftströme (neben dem „Taktproblem“ des Ventilators) erste Priorität zukommen sollte.

5.5 Kollektorkombination

Gemäss unserem Kenntnisstand wurde die Kombination eines Fensterkollektors mit einem Dachluftkollektor beim jetzt untersuchten Gebäude erstmals realisiert. Daher bietet sich die Möglichkeit, diese Kombination mit der Simulation etwas genauer unter die Lupe zu nehmen. Das Simulationsmodell wurde dahingehend abgeändert, dass das Gebäude einmal nur mit

dem Fensterkollektor und einmal nur mit dem Dachluftkollektor betrieben wurde. In beiden Fällen müsste natürlich in der Praxis die Luftführung neu geplant werden.

Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurde schliesslich noch ein Simulationsmodell des Gebäudes erstellt, welches überhaupt keinen Luftkollektor aufweist.



Figur 24: Kollektorerträge bei unterschiedlichen Kollektorkombinationen

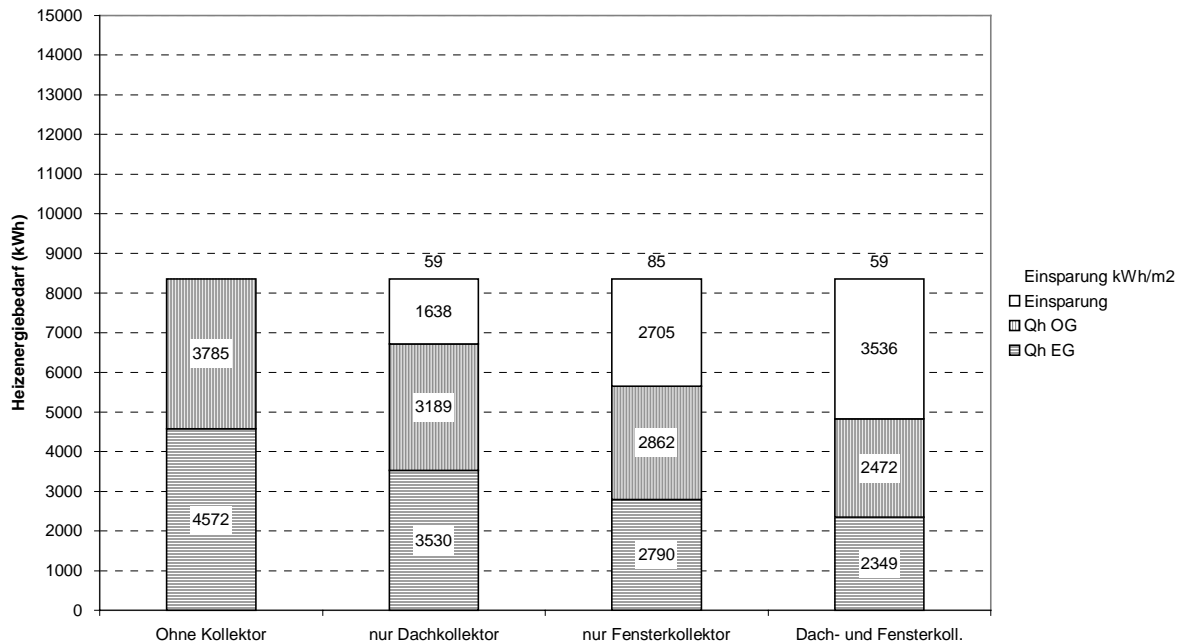
Die Kollektorerträge der genannten Varianten sind in Figur 24 dargestellt. Der m^2 -Ertrag des Dachkollektors fällt etwa 5 % tiefer aus als jener des Fensterkollektors. Andererseits erhält der Dachkollektor in der Heizperiode (Okt.-April) etwa 15 % mehr Strahlung als der Fensterkollektor. Der Wirkungsgrad des einfach verglasten Dachkollektors ist also etwas tiefer als jener des Fensterkollektors.

Kombiniert man beide Kollektoren, so sinkt der Ertrag des Dachkollektors, weil er höhere Lufteintrittstemperaturen aufweist (Luftaustritt Fensterkollektor = Lufteintritt Dachkollektor). Daraus resultieren höhere Kollektorverluste.

Beim Fensterkollektor hingegen steigt der Ertrag sogar leicht an. Weil dieser Kollektor weiterhin mit Luft direkt aus den Hypokaustspeichern beschickt wird, hat er bessere Betriebsbedingungen als der Dachkollektor, d.h. die Kollektorverluste werden gegenüber dem Betrieb „nur Fensterkollektor“ kaum erhöht. Andererseits führt der höhere Ertrag des Gesamtsystems zu höheren Temperaturen im Gebäude. Tendenziell verliert dadurch der solare Direktgewinn an Attraktivität, was zu häufigerem Absenken der Absorberstoren im Fensterkollektor führt.

Vergleicht man den Gesamtertrag der kombinierten Kollektoren mit der Summe der beiden Stand-alone-Lösungen „nur Dachkollektor“ bzw. „nur Fensterkollektor“, so kann man eine Ertragsschmälerung von knapp 10 % feststellen.

Interessanter und für einen Systemscheid von Bedeutung sind die in Figur 25 zusammengestellten Ergebnisse zum Heizenergiebedarf.



Figur 25: Heizenergiebedarf bei unterschiedlichen Kollektorkombinationen

Folgende Punkte sind bemerkenswert:

- Bei der Lösung „nur Dachkollektor“ kann etwas mehr als die Hälfte des erzielten Kollektorertrages in Heizenergieeinsparung umgesetzt werden.
- Bei der Lösung „nur Fensterkollektor“ kann über 70 % des Kollektorertrages in Heizenergieeinsparung umgesetzt werden, diese Variante schneidet also wesentlich besser ab als der Dachkollektor. Erklärung: Der Fensterkollektor verbessert – im Vergleich zu einem gewöhnlichen Fenster mit Wärmeschutzglas – den Wärmedämmwert. Es ist also nicht nur der konvektive Kollektorertrag, der zur Heizenergieeinsparung beiträgt, sondern auch die Verbesserung der Wärmedämmung durch die zusätzliche äussere Kollektorverglasung. Grundsätzlich bewirkt natürlich auch der Dachkollektor eine Verbesserung der Wärmedämmung des Daches. Da das Dach ohnehin bereits sehr gut wärmedämmt ist und der Kollektor zudem nur eine Einfachverglasung aufweist, fällt diese Verbesserung aber kaum ins Gewicht.

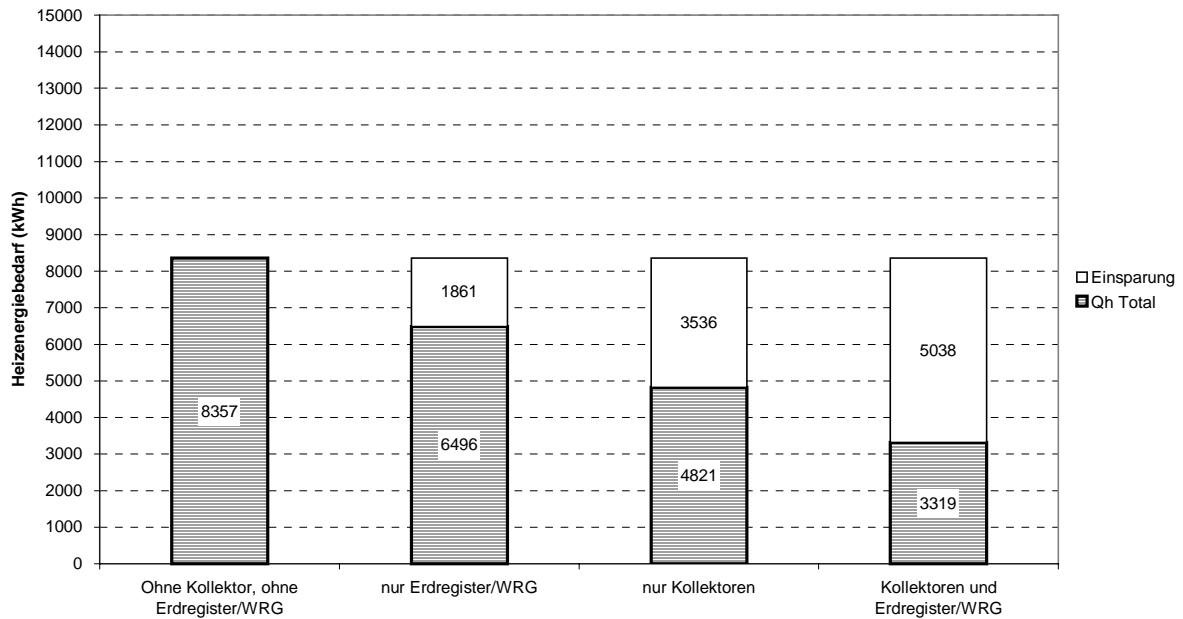
- Nun vergleichen wir die Heizenergieeinsparung des Gesamtsystems (Dach- und Fensterkollektor) mit jener des Fensterkollektors alleine. Es zeigt sich, dass der Fensterkollektor alleine bereits über 75 % der Heizenergieeinsparung der jetzt realisierten Lösung mit Dach- und Fensterkollektoren gebracht hätte. Aus dieser Sicht kann die Notwendigkeit des Dachkollektors sicher in Frage gestellt werden.
- Als letztes betrachten wir noch den Heizenergiebedarf des Gebäudes **ohne** Kollektoren. Er liegt etwas über 8000 kWh. Nehmen wir einen (realistischen) Holzofenwirkungsgrad von 70 % an, um diesen Heizenergiebedarf in Endenergie (=Holzverbrauch) umzurechnen, so kommen wir auf 12000 kWh. Dies entspricht gerade dem im Messprojekt bestimmten Holzverbrauch des realen Gebäudes **mit** Kollektorbetrieb. Dies mag zwar etwas zufällig sein, denn in der Simulation stecken viele Annahmen, gibt aber doch einen Hinweis darauf, dass der im realen Gebäude erzielte Kollektorertrag durch die systembedingten zusätzlichen Verluste (Kaltluftströme, Rückzirkulation) wieder vernichtet wird.

5.6 Mechanische Lüftung mit Erdregister und WRG

Grundsätzlich ist jede Wohnung im untersuchten Gebäude mit einer mechanischen Wohnungslüftung ausgerüstet. Dabei wird die Zuluft durch ein Erdregister und die obligate Wärmerückgewinnung vorgewärmt.

Die Messdaten zeigen, dass in den untersuchten zwei Wohnungen die mechanische Lüftungsanlage sehr selten in Betrieb war und dass die Beiträge von Erdregister und Wärmerückgewinnung an den Energiehaushalt des Gebäudes vernachlässigbar sind. Es muss daher angenommen werden, dass die Lufthygiene im Gebäude hauptsächlich über die klassische Fensterlüftung sichergestellt wurde.

In den bisher diskutierten Simulationsvarianten wurde deshalb mit einer reinen Fensterlüftung gerechnet, wobei ein sinnvolles Benutzerverhalten vorausgesetzt wurde. „Sinnvoll“ bedeutet, dass die Bewohner über die Fenster gerade den lufthygienisch notwendigen Luftaustausch von 25 m³/h pro Person sicherstellen. In diesem Abschnitt werden nun die bereits bekannten „fenstergelüfteten“ Varianten solchen mit mechanischer Lüftung gegenübergestellt. Auch hier ergibt sich die Gesamtluftmenge pro Zone aus der Forderung, dass aus lufthygienischen Gründen pro Person eine Luftmenge von 25 m³/h benötigt wird.

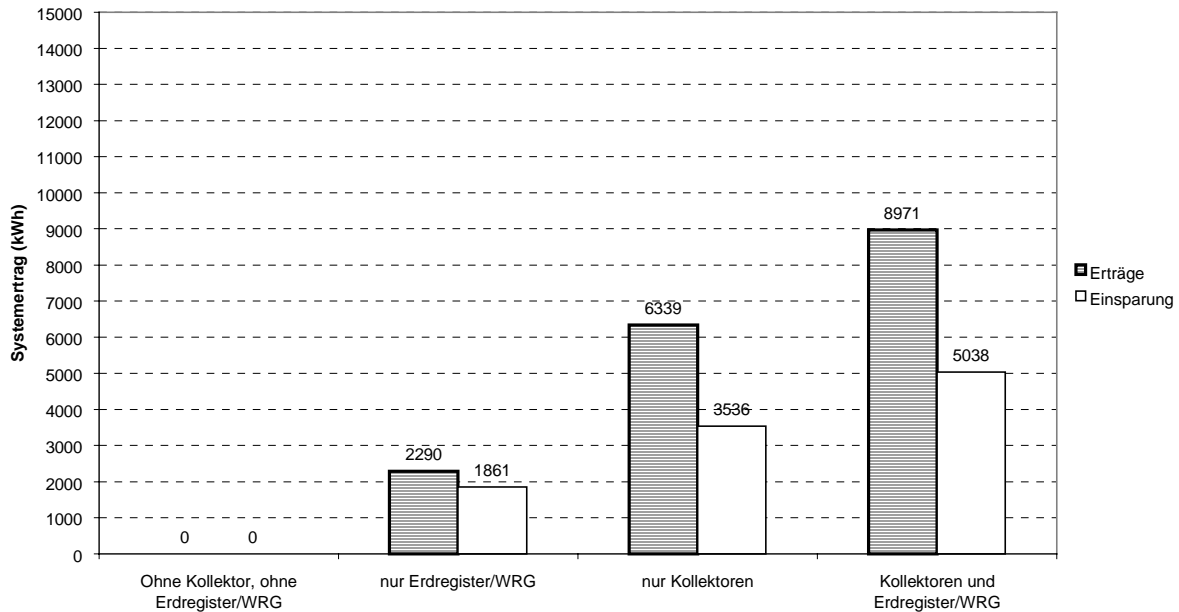


Figur 26: Heizenergiebedarf von fenstergelüfteten und mechanisch gelüfteten Varianten

Figur 26 zeigt als Basisvariante das fenstergelüftete Gebäude ohne Kollektoren mit einem Heizenergiebedarf von 8357 kWh. Rüstet man dieses Gebäude mit einer mechanischen Lüftung mit WRG/Erdregister aus, so kann der Heizenergiebedarf um ca. 22 % (1861 kWh) gesenkt werden. Rüstet man das Gebäude – wie beim Messgebäude geschehen – mit Solarluftkollektoren aus, so sinkt der Heizenergiebedarf um etwa 42 % (3536 kWh, bei optimiertem Betrieb wohlgermerkt!). Kombiniert man beide Massnahmen, so reduziert sich der Heizenergiebedarf um 60 % (5038 kWh).

Da sich Energiesparmassnahmen an Gebäuden in der Regel konkurrenzieren, entspricht die Einsparung der kombinierten Massnahmen nicht der Summe der Einsparungen der Einzelmassnahmen, sondern in diesem Fall etwa 93 % davon. Bei der untersuchten Massnahmenkombination kann also von einer eher kleinen Konkurrenz gesprochen werden.

Bereits weiter oben wurde gezeigt, dass von den Kollektorströgen immer nur ein Teil in Heizenergieeinsparung umgesetzt werden kann. Für die mechanische Lüftung mit Erdregister und WRG kann man auch einen Systemertrag definieren, unter welchem man die Energie versteht, die von Erdregister und WRG an die Zuluft abgegeben wird. In Figur 27 ist dieser Systemertrag u.a. für die Variante „nur Erdregister/WRG“ dargestellt. Es zeigt sich, dass im untersuchten Gebäude die durch Erdregister und WRG während der Heizperiode gewonnene Energie zu 80 % in Heizenergieeinsparung umgesetzt werden kann.



Figur 27: Systemerträge und die erzielten Heizenergieeinsparungen im Vergleich

5.7 Klimaregionen

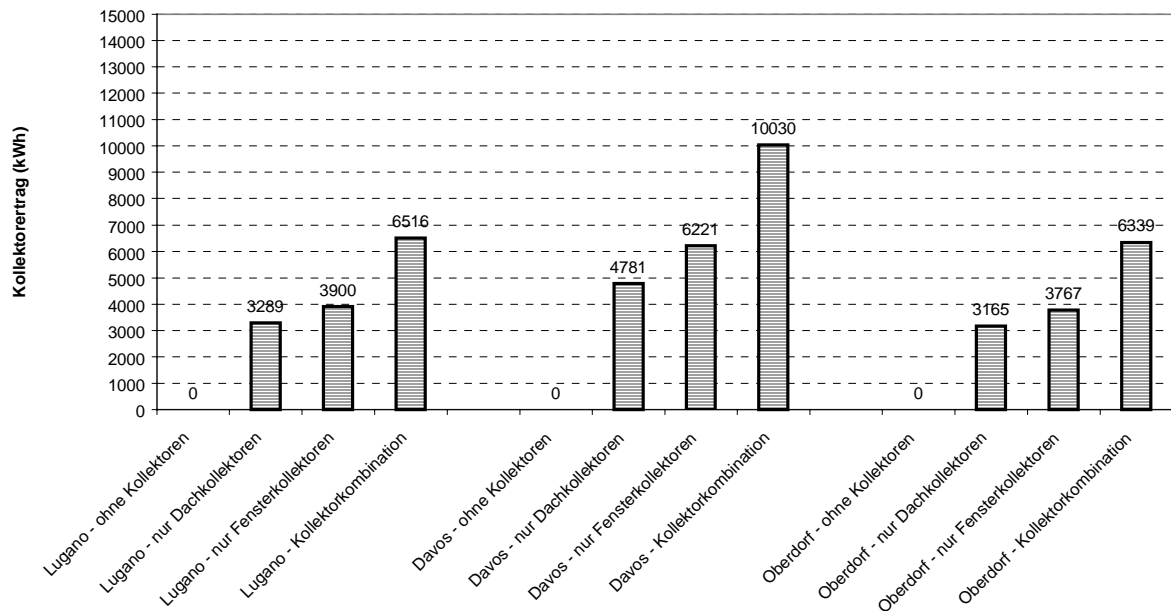
In diesem Abschnitt geht es um die Frage, wie sich das Solarhaus Holinger in anderen schweizerischen Klimaregionen verhalten würde. Das reale Gebäude ist im Baselbieter Jura gelegen. Dieser Standort weist recht grosse Ähnlichkeiten mit typischen Mittellandstandorten auf, wenn auch das Strahlungsangebot etwas grösser ist.

Die Untersuchung wurde deshalb mit Klimadaten von Davos (typischer alpiner Standort) und Lugano (Standort südlich der Alpen) durchgeführt. Von diesen zwei Standorten kann im Vergleich zu Oberdorf am ehesten ein unterschiedliches Resultat erwartet werden. Die Klimadaten für diese zwei Standorte wurden der Meteonorm entnommen [METEONORM 97].

Für beide Standorte wurde die Untersuchung in den vier Varianten „ohne Kollektor“, „nur Dachkollektor“, „nur Fensterkollektor“ und „Kombination von Dach- und Fensterkollektor“ durchgeführt – ähnlich wie dies für Oberdorf weiter oben auch gemacht wurde.

Der Vergleich der Kollektorerträge in Figur 28 zeigt zwei erwähnenswerte Ergebnisse:

- Bekanntlich weist der Alpenraum im Winter ein deutlich höheres Strahlungsangebot auf als das Mittelland. Dieses Strahlungsangebot wird am Standort Davos in deutlich höhere Kollektorerträge als in Oberdorf umgesetzt.
- Obwohl das Tessin den Übernamen „Sonnenstube der Schweiz“ trägt, liegen die Kollektorerträge dort nur marginal höher als in Oberdorf.



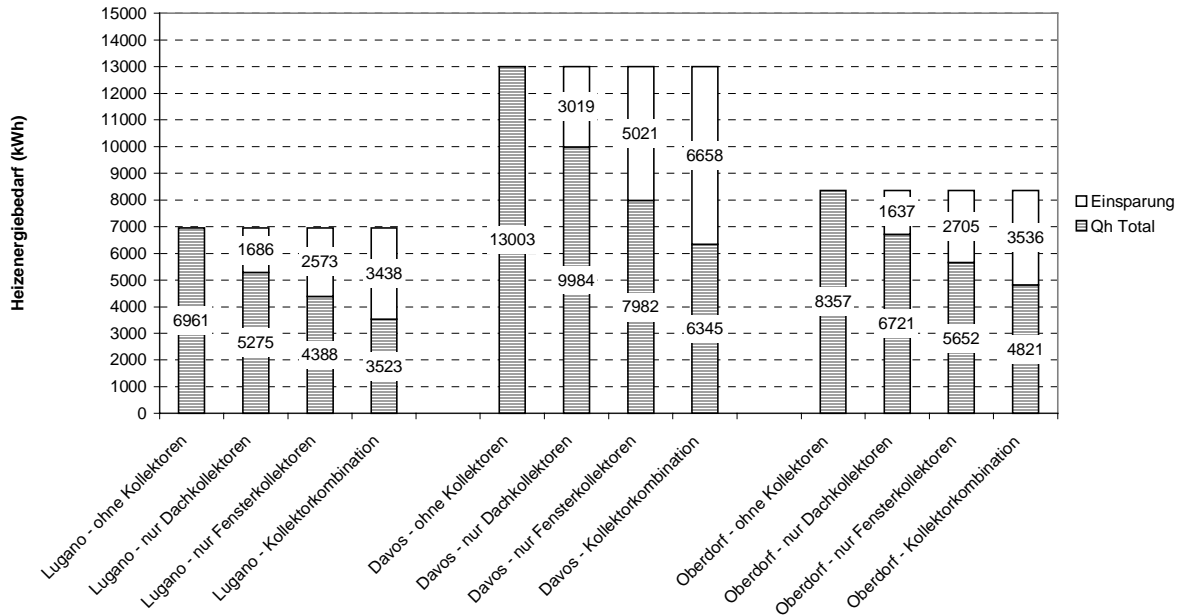
Figur 28: Kollektorerträge an drei Klimastandorten für je vier Varianten

Die entscheidende Frage ist aber, welcher Anteil des Kollektorertrages in Heizenergieeinsparung umgesetzt werden kann. Darüber gibt untenstehende Figur 29 Auskunft.

Als erstes zeigt sich, dass am Standort Lugano der Heizenergiebedarf niedriger ist als in Oberdorf. Dies weist darauf hin, dass die Aussentemperaturen in Lugano etwas höher liegen als in Oberdorf. Wenn es – wie oben gezeigt wurde – im Tessin schon nicht viel sonniger ist als in Oberdorf, so ist es wenigstens wärmer. Die Heizenergieeinsparung, die dank der Kollektoren erzielt werden kann, liegt etwas tiefer als in Oberdorf, trotz der leicht höheren Kollektorerträge. Oder anders ausgedrückt: Die Kollektorerträge lassen sich in Lugano weniger gut in Heizenergieeinsparung umsetzen als in Oberdorf. Am Standort Lugano resultiert daher eine leicht schlechtere Wirtschaftlichkeit des Systems als am Standort Oberdorf. Würde man in Lugano nur die Fensterkollektoren realisieren, so läge der Heizenergiebedarf immer noch tiefer als in Oberdorf mit der Kombination Fenster- und Dachkollektoren.

Umgekehrt sieht es in Davos aus: Der Heizenergiebedarf des Gebäudes ohne Kollektoren liegt deutlich über jenem in Oberdorf. Die hohen Kollektorerträge können gut in Heizenergieeinsparung umgesetzt werden. Betrachtet man die Heizenergieeinsparung dank Fenster- und Dachkollektoren als 100 %, so bringt auch in Davos der Fensterkollektor alleine bereits 75 % davon. Die zusätzlichen 25 %, die das Hinzufügen des Dachkollektors noch bringt, macht aber nominell etwa 1600 kWh aus – das doppelte von Oberdorf (oder auch Lugano). Aus die-

ser Sicht ist die Kombination von Dach- und Fensterkollektor in Davos bzw. im alpinen Klima am ehesten zu rechtfertigen.



Figur 29: Heizenergiebedarf an drei Klimastandorten für je vier Varianten

5.8 Warmwasservorwärmung im Sommer

Ein Nachteil von solaren Luftsystemen ist die Beschränkung des Betriebes auf die Winter- und z.T. die Übergangszeit. Im Sommer liegt das System brach. Daher stellte sich die Frage, ob ein Luftsystem im Sommer auch für die solare Vorwärmung des Warmwassers eingesetzt werden kann. Benötigt würde dazu ein Luft-Wasser-Wärmetauscher, um die Energie der erwärmten Luft auf das Wasser übertragen zu können. Ziel dabei muss sein, möglichst wenig Zusatzinvestitionen tätigen zu müssen.

In dieser Simulationsvariante wurde ein Warmwasserspeicher von 600 l Inhalt angenommen, welcher im oberen Segment elektrisch nachgeheizt werden kann. Beim Warmwasserverbrauch wird davon ausgegangen, dass pro Person und Tag knapp 54 l Wasser bei 50 °C aus dem Speicher entnommen werden (inkl. Ausstossverluste). Dies entspricht einem Wert, der an der solaren Prüf- und Forschungsstelle in Rapperswil für die Solkit-Studie verwendet wurde [Vogelsanger]. Auch das Tagesprofil der Warmwasserentnahmen wurde von dieser Studie übernommen.

Als Wärmetauscher wurde ein Kreuzstromwärmetauscher mit Betriebspunkt gemäss Tabelle 5 ausgewählt.

Luftstrom:	3000 m ³ /h	
Luft Eintritt/-austritt:	40.0 °C	34.2 °C
Wasserstrom:	200 l/h	
Wassereintritt/-austritt:	10.0 °C	34.0 °C

Tabelle 5: Auslegungsbetriebspunkt des Wärmetauschers

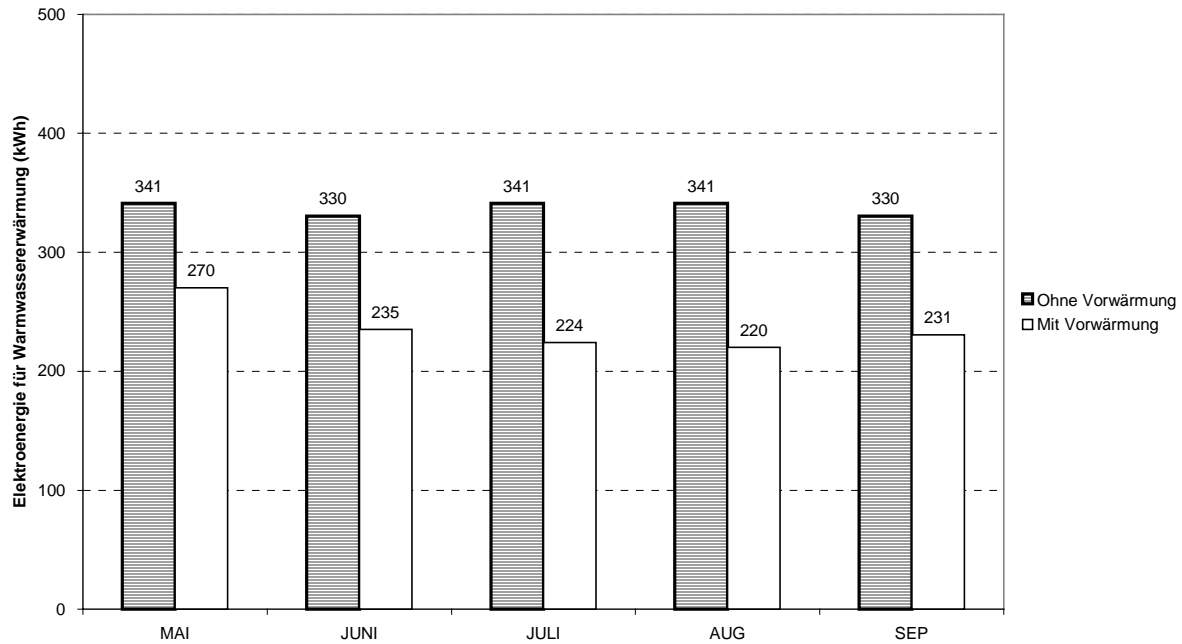
Da aus dem Messprojekt keine Klimadaten für die Sommerperiode vorliegen, wurden die entsprechenden Daten aus der Meteonorm [METEONORM 97] entnommen und aufbereitet.

Aus energetischer Sicht am effizientesten wäre für den Sommerbetrieb ein geschlossener Luftkreislauf (wie im Winter), d.h. die Luft wird vom Wärmetauscher wieder zum Kollektoreintritt geführt. Natürlich kann dies nicht über die Hypokausten geschehen, weil dies zu Komfortproblemen (Überhitzung) im Gebäude führen würde. Es müsste also ein zusätzlicher Luftkanal zwischen Wärmetauscher und Kollektoreintritt gebaut werden.

Es zeigte sich aber weiter, dass beim geschlossenen System der Speicher in einer längeren Schönwetterperiode auf über 60 °C klettert. Deshalb weist auch die Luft, die aus dem Wärmetauscher austritt und wieder dem Kollektor zugeführt wird, bereits sehr hohe Temperaturen auf (z.T. über 70 °C). Dies führt in einem System mit Fensterkollektor zu Komfortproblemen (Überhitzung) im Gebäudeinnern.

Daher wurde entschieden, für diese Simulationsvariante im Sommerfall ein offenes System anzunehmen. Dem Fensterkollektor im EG wird Aussenluft zugeführt. Nach der Erwärmung im Kollektor und der Energieübertragung im Wärmetauscher wird die Luft wieder ins Freie geblasen.

Die Ergebnisse sind in Figur 30 zusammengestellt. Die dank der solaren Vorwärmung realisierten Energieeinsparungen bei der Warmwassererwärmung sind relativ klein. Über den ganzen Sommer summiert ergeben sich etwa 500 kWh. Dies rechtfertigt den zusätzlichen Aufwand kaum. Es gibt aber ein Optimierungspotential:



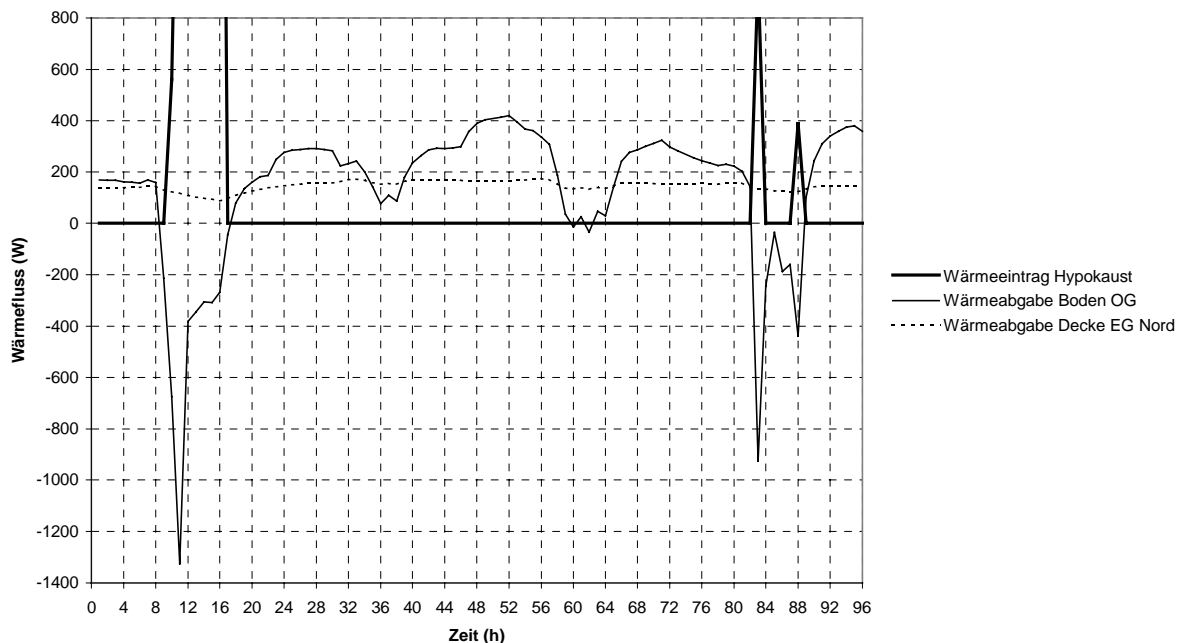
Figur 30: Energieverbrauch für die Warmwassererwärmung im Sommer

- Grundsätzlich ist die Luftmenge von 3000 m³/h für den Winterfall ausgelegt. Für die Warmwasservorwärmung mit offenem System im Sommer ist sie offenbar zu gross, denn oft erreicht die Luft am Kollektorausstritt nicht das Temperaturniveau, um überhaupt Energie an das Warmwasser abzugeben. Man muss daher die Luftmenge reduzieren, wofür ein 2-stufiger Ventilator nötig wäre. Wie gross dabei die Luftmenge sein müsste ist eine Optimierungsfrage, denn es müsste eine möglichst grosse Energieeinsparung erzielt werden, ohne dass in den Räumen hinter den Fensterkollektoren unkomfortabel hohe Temperaturen entstehen. Eine solche Optimierung sprengt den Rahmen dieser Studie.
- Grundsätzlich könnte man bei einem offenen System im Sommer auf einen Ventilator verzichten und die Luftumwälzung nur mit Schwerkraftzirkulation betreiben. Auch dabei müsste man auf den Komfort in den Räumen hinter den Fensterkollektoren achten. Um diese Frage in einer Simulation zu klären, müsste zuerst ein Modell für die Schwerkraftzirkulation entwickelt werden.
- Schliesslich könnte man versuchen, im Sommer doch mit einem geschlossenen Luftkreislauf zu arbeiten, dabei aber nur den Dachkollektor zu bewirtschaften. Der Fensterkollektor müsste dann entlüftet werden, um Komfortprobleme zu vermeiden.

5.9 Spezialauswertungen

Der Wärmefluss an der Hypokaustenoberfläche im untersuchten Gebäude ist in Figur 31 beispielhaft für ein paar Tage im November dargestellt. Am ersten dargestellten Tag wird nach einer längeren trüben Phase wieder Energie in den Hypokaust geladen. Zur Wärmeabgabe des Hypokausts in den darauffolgenden Stunden ist folgendes zu bemerken:

- Der Wärmefluss über den Boden ist grösser als über die Decke. Dies rührt von der unterschiedlichen Dämmung her: bodenseitig 2 cm Trittschalldämmung, deckenseitig 7 cm Wärmedämmung.
- Tagsüber wird der bodenseitige Wärmefluss stark gedämpft. Dies ist eine Folge des Direktgewinns (Diffusstrahlung!), denn der Boden befindet sich in einer Zone mit grossen südorientierten Fensterflächen. Bei der Decke ist dieser Effekt nur sehr schwach; die Decke befindet sich in einem Raum mit wenig Fensterfläche, welche zudem gegen Norden orientiert ist.
- Die Wärmeabgabe des Bodens durchläuft etwa 36 Stunden nach dem Energieeintrag ein Maximum. Bei der Decke ist dieses Maximum ebenfalls vorhanden, aber viel weniger ausgeprägt.

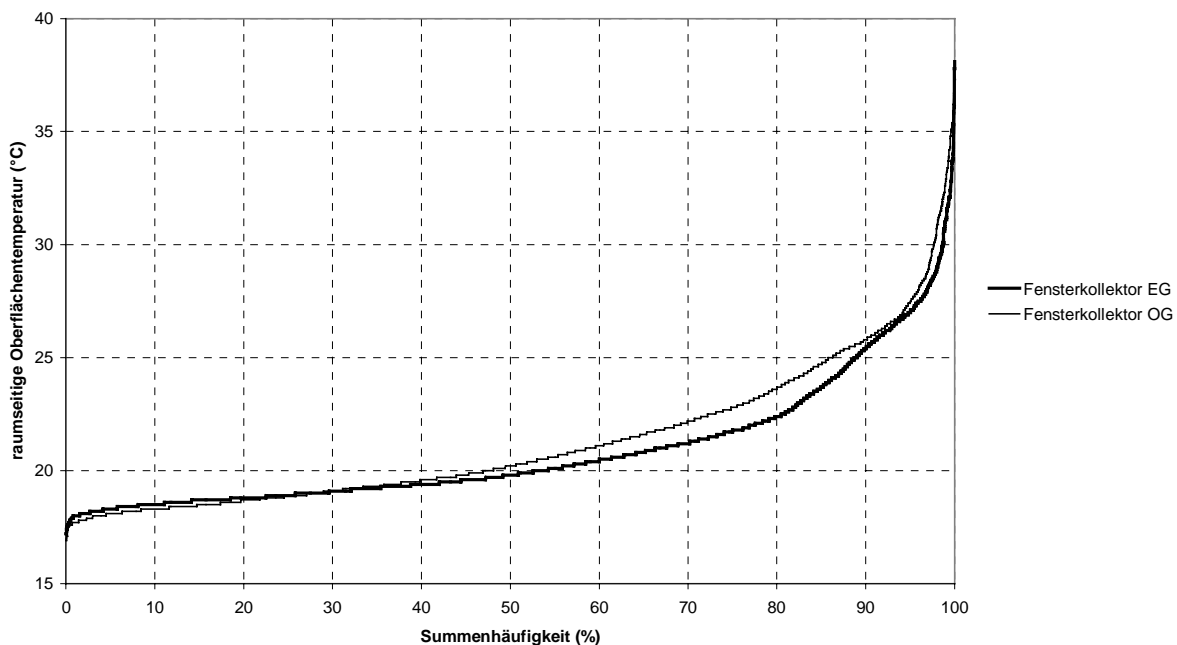


Figur 31: Verlauf der Wärmeabgabe eines Hypokausten

In der nachfolgenden Figur 32 ist die Summenhäufigkeit der raumseitigen Oberflächentemperatur der Fensterkollektoren für das Gebäude mit Standort Oberdorf dargestellt. Zwischen dem Kollektor im EG und jenem im OG ist kein wesentlicher Unterschied auszumachen.

In etwa 50 % der Stunden liegt die Temperatur tiefer als 20 °C, was für eine Fensteroberfläche im Winterhalbjahr bei fehlender Solarstrahlung üblich ist. Auf der andern Seite der Skala zeigt sich, dass an einigen Stunden Oberflächentemperaturen über 30 °C auftreten. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass dies im regulären Kollektorbetrieb nicht vorkommt, sondern nur in Stunden mit speziellen Randbedingungen:

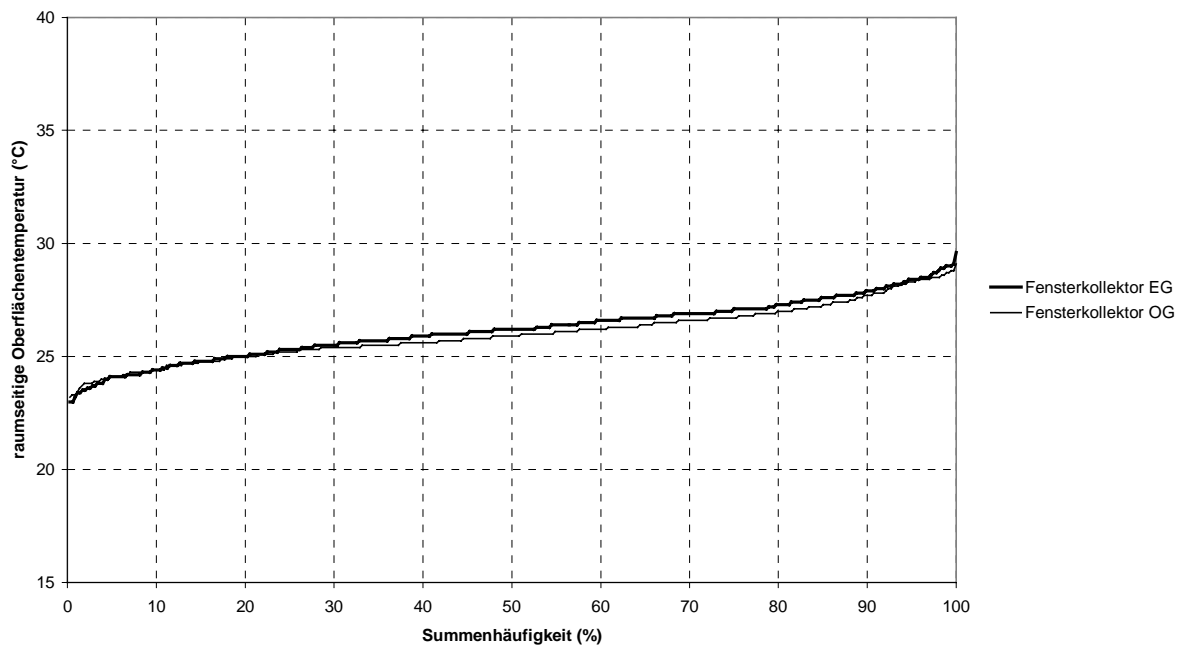
- Manchmal werden trotz direkter Einstrahlung die Storen nicht abgesenkt, weil die Bewohner die direkte solare Aufheizung des Raumes bevorzugen. Durch Strahlungsabsorption an der innern Scheibe kann dabei die Oberflächentemperatur auf über 30 °C ansteigen.
- Manchmal werden die Storen bei direkter Einstrahlung abgesenkt, der Ventilator des Luftsystems geht jedoch nicht in Betrieb. Dies tritt vereinzelt auf, weil für den Schaltbefehl die Temperatur des Dachkollektors massgebend ist. Dann steigt die Temperatur des Fensterkollektors auf die Stagnationstemperatur, was auch an der raumseitigen Oberfläche des Fensterkollektors spürbar wird, die dann ebenfalls auf über 30 °C ansteigt.



Figur 32: Summenhäufigkeit der raumseitigen Oberflächentemperatur der Fensterkollektoren

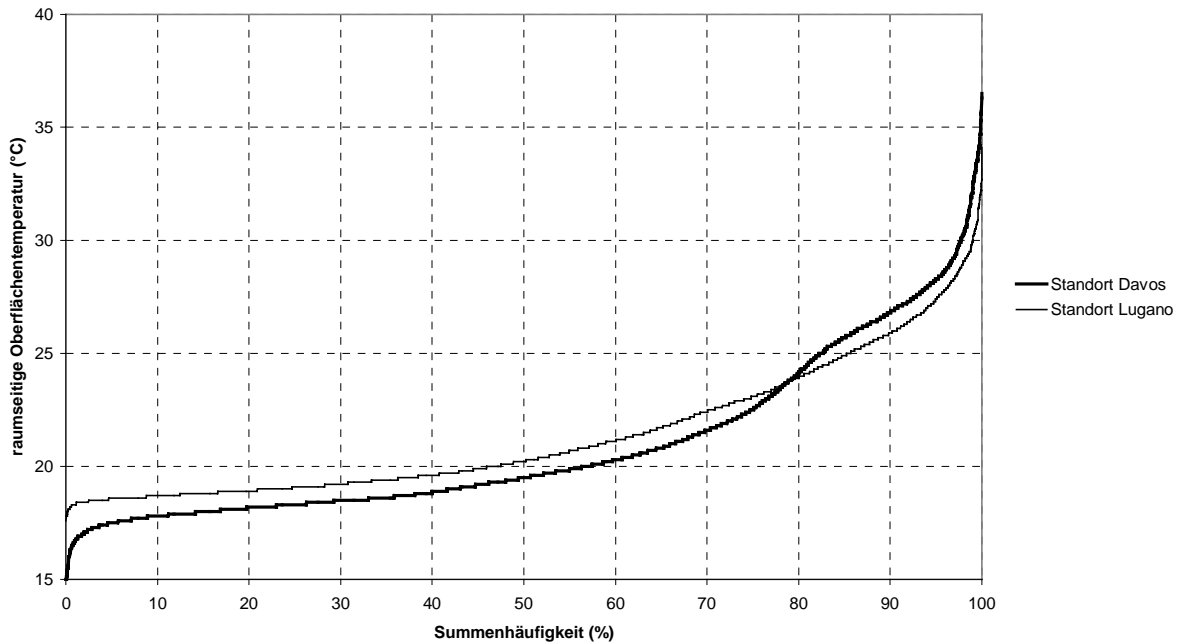
Stellt man die Summenhäufigkeit nur für die Stunden mit regulärem Kollektorbetrieb auf (d.h. Storen abgesenkt **und** Ventilator in Betrieb), so steigt die Temperatur der raumseitigen Ober-

fläche nicht über 30 °C, wie Figur 33 zeigt. Durch den Betrieb des Fensterkollektors entstehen also im Winter keine unzulässig hohen Oberflächentemperaturen und somit keine Komfortprobleme. Diese Aussage kann nicht ohne weiteres auf den Sommerfall übertragen werden, denn im Sommerfall hängt der Komfort stark davon ab, wie effizient der Kollektor entlüftet wird.



Figur 33: Summenhäufigkeit der raumseitigen Oberflächentemperatur der Fensterkollektoren während des Systembetriebes

Zum Schluss zeigt Figur 34, dass die gemachten Aussagen zur raumseitigen Oberflächentemperatur des Fensterkollektors ohne weiteres an die Standorte Lugano und Davos übertragen werden können.



Figur 34: Summenhäufigkeit der raumseitigen Oberflächentemperatur des Fensterkollektors in Davos und Lugano

6. Schlussfolgerungen

6.1 Beantwortung der im Auftrag formulierten Fragestellungen

Kombination von geneigten Dach-Luftkollektoren mit vertikalen Fensterkollektoren:

- Im vorliegenden Gebäude ist der Ertrag des – nur einfach verglasten – Dach-Luftkollektors wesentlich kleiner als derjenige des Fensterkollektors (vgl. Abschnitt 4.5). Mit der Simulation konnte der drastische Unterschied der Erträge nicht nachvollzogen werden, so dass ein schwerwiegender Mangel des Systems im Bereich des Dachkollektors angenommen werden muss (Ansaugen von Aussenluft durch Undichtigkeiten?).
- Im simulierten Gebäude könnte 75% der Energieeinsparung schon mit dem Fensterkollektor allein realisiert werden; der Dachkollektor bringt die restlichen 25%. Dies gilt für alle untersuchten Klimaregionen. Im alpinen Klima, wo die Erträge und somit die Energieeinsparungen absolut am grössten sind, liesse sich die Kombination beider Elemente am ehesten rechtfertigen. (Siehe Abschnitte 5.5 und 5.7.)

Konkurrenz von Luftkollektorsystem einerseits und kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung andererseits:

- Aktuell läuft die kontrollierte Lüftung so selten, dass ihr Beitrag zur Energiebilanz und somit auch die Konkurrenz zum Luftkollektorsystem völlig vernachlässigbar ist. (Siehe Abschnitt 4.3.)
- Auch wenn der ganze Luftwechsel über die kontrollierte Lüftung erfolgen würde, würde dies das Luftkollektorsystem nicht wesentlich konkurrenzieren, wie die Simulation zeigt. (Siehe Abschnitt 5.6.)

Komfort:

- Aktuell verlieren die Hypokaustböden die gespeicherte Wärme zu schnell und kühlen zu stark aus (vgl. Abschnitt 4.6). Dennoch werden komfortable Raumtemperaturen erreicht (vgl. Abschnitt 4.2), allerdings mit höherem Feuerungsaufwand als geplant (vgl. Abschnitt 4.3).
- Komfortprobleme durch die Erwärmung des inneren Fensterkollektorglases treten, zumindest während der gemessenen Heizperiode, keine auf. Dies wird auch durch die Simulation der Glas-Oberflächentemperaturen bestätigt. (Siehe Abschnitte 4.2 und 5.9.)

Nutzung des Luftkollektorsystems im Sommer:

- Die Idee, das Luftkollektorsystem zur Warmwasser-Vorwärmung zu verwenden, wäre nur mit wesentlichen Systemänderungen realisierbar und konnte nicht weiter verfolgt werden. (Siehe Abschnitt 5.8.)

Übertragung der Resultate auf andere Klimazonen:

- Auf der Alpensüdseite (simulierter Standort: Lugano) wären die zu erwartenden Kollektorerträge praktisch gleich wie in Oberdorf. Dagegen wäre die durch das Luftkollektorsystem erzielte Einsparung an Heizenergie kleiner, die Wirtschaftlichkeit des Systems also schlechter. (Siehe Abschnitt 5.7.) Das heisst also, dass es nicht sinnvoll ist, die gleiche Gebäudekonstruktion auf der Alpensüdseite zu kopieren; es schliesst aber nicht aus, dass bei entsprechend angepasster Konstruktion ein Luftkollektorsystem auch dort sinnvoll sein kann.
- Im alpinen Klima (simulierter Standort: Davos) liegen die Kollektorerträge infolge des hohen Strahlungsangebotes höher; sie resultieren auch in einer (absolut gesehen) wesentlich höheren Energieeinsparung. (Siehe Abschnitt 5.7.) Die vorliegende Kombination eines hoch wärmedämmten Gebäudes mit einem Luftkollektorsystem wäre also auch im Alpenraum eine gute Lösung.

- Bezüglich Oberflächentemperaturen des inneren Luftkollektorglases gelten für die Standorte Lugano und Davos die gleichen Aussagen wie für Oberdorf: Es sind diesbezüglich keine Komfortprobleme zu erwarten (siehe Abschnitt 5.9).

6.2 Empfohlene Verbesserungen

- Das Auskühlen der Speicherböden wird durch die vorhandene Rückschlagklappe, die als Kunststofffolie ausgebildet ist und sich über die ganze Breite des Kollektorfensters erstreckt, nur ungenügend verhindert. Der Bauherr hat inzwischen eine motorisch betriebene, starre, dicht schliessende Rückschlagklappe konstruiert und eingebaut. – Für künftige Bauten sind Systeme vorzuziehen, bei denen die Luftführung den Einsatz standardmässiger Rückschlagklappen für Lüftungskanäle erlaubt (Beispiel: Abschnitt 4.6, Figur 15).
- Wie in Abschnitt 4.6, Figur 14 gezeigt, wird im vorliegenden Gebäude der Fensterkollektor von unten nach oben durchströmt. Diese Luftführung hat Nachteile: Die Luft durchströmt auf hohem Temperaturniveau den nur einfach verglasten Dachkollektor sowie anschliessend einen relativ langen Kanal auf der Nordseite des Gebäudes. Dies führt zu Verlusten und somit zu einem schlechteren Wirkungsgrad. – Es wird daher eine Umkehrung der Strömungsrichtung empfohlen, so dass die Warmluft direkt vom Fensterkollektor in den Hypokaustboden einströmt. Dies ist nur im Zusammenhang mit der oben beschriebenen Massnahme (motorisch betriebene Rückschlagklappe) möglich. Der Bauherr wird auch diesen Umbau vornehmen.

7. Literaturverzeichnis

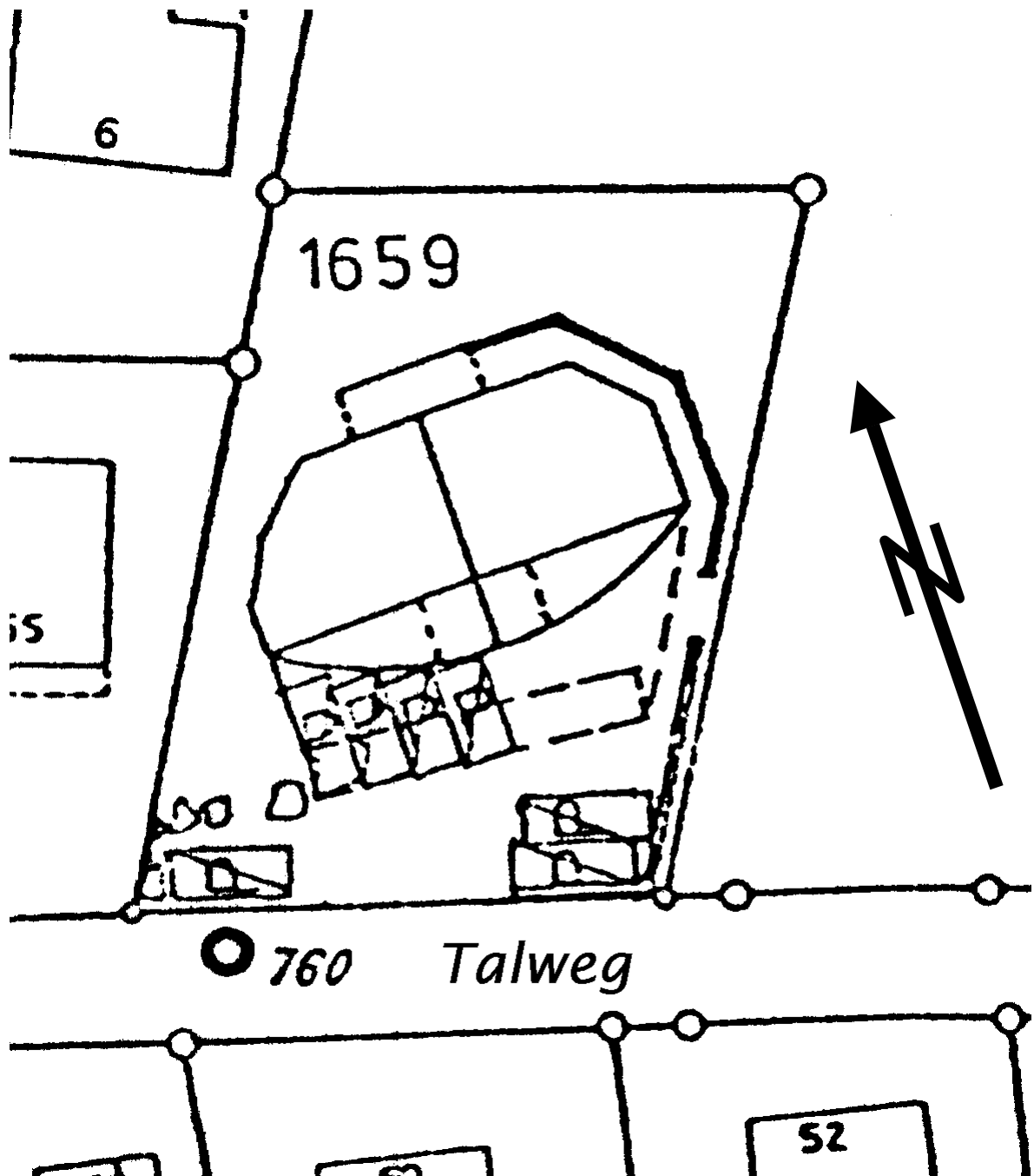
- [Blatter 1997] Max Blatter-Spaling: Wohnhaus Huber, Oppligen BE –
Messung eines Fensterkollektorsystems.
Forschungsstelle Solararchitektur, ETH, Zürich,
und Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Dezember 1997.
- [Blatter 1995] Max Blatter-Spaling: Solarhaus Bühler, Lausen.
Forschungsstelle Solararchitektur, ETH, Zürich,
und Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Januar 1995.
- [Fort 1994] Karel Fort, Werner Gygli:
TRNSYS-Model Type 60 for Hypocaust Thermal Storage and
Floor Heating
K. Fort, Ing.-Büro, Volketswil, 1994
- [Haas 1999] Anne Haas: Persönliche Mitteilung
ETH Zürich, Forschungsstelle Solararchitektur, 1999
- [Gütermann 1992] Andreas Gütermann, Peter Krüsi: Solarhaus Lenherr, Schwyz.
Forschungsstelle Solararchitektur, ETH, Zürich,
und Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Juli 1992.
- [Koschenz 2000] Markus Koschenz, Beat Lehmann:
Thermoaktive Bauteilsysteme tabs
EMPA Energiesysteme/Haustechnik, Dübendorf Juli 2000
- [METEONORM 95] Jan Remund, Esther Salvisberg, Stefan Kunz (Firma Meteotest):
METEONORM, Meteorologische Grundlagen für die
Sonnenenergienutzung, Ausgabe 1995.
Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Juni 1995
inkl. PC-Programm METEONORM Version 2.01, Oktober 1995.
- [METEONORM 97] Jan Remund, Ralf Lang, Stefan Kunz (Firma Meteotest):
METEONORM, Meteorologische Grundlagen für die
Sonnenenergienutzung, Ausgabe 1997.
Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, September 1997
inkl. PC-Programm METEONORM Version 3.0, September 1997.
- [SIA D010] M. Zimmermann: Handbuch der passiven Sonnenenergienutzung
SIA Dokumentation D 010, 4. Auflage Juli 1989.
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband, Zürich,
und Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Dezember 1986.

- [TRNSYS 2000] TRNSYS, A transient System Simulation Program“;
Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin
Madison, Wisconsin, Februar 2000.
- [Vogelsanger] Peter Vogelsanger: Persönliche Mitteilung
SPF Solare Prüf- und Forschungsstelle, Rapperswil

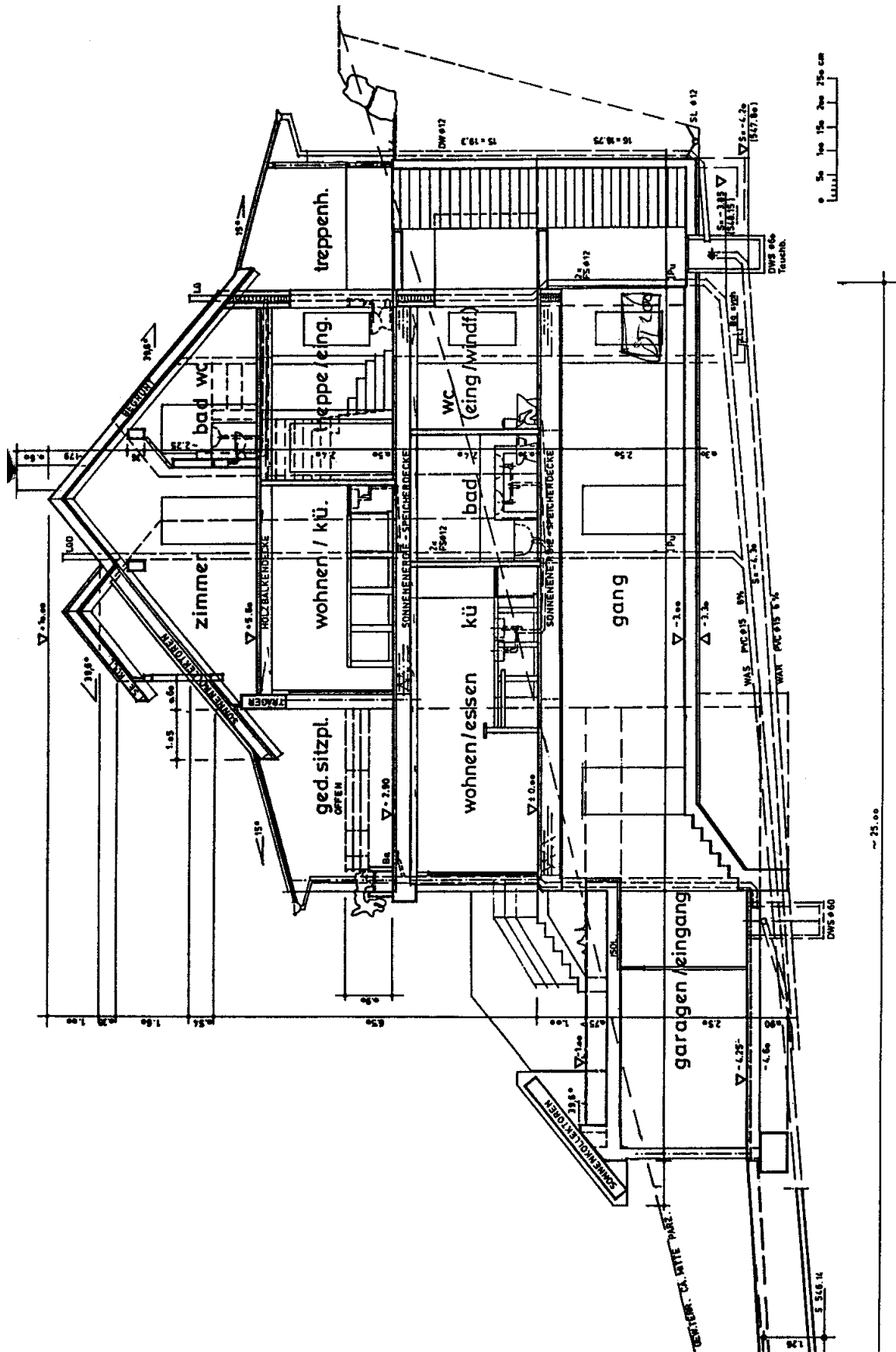
ANHANG

1. Gebäudepläne (Auswahl)

Situation

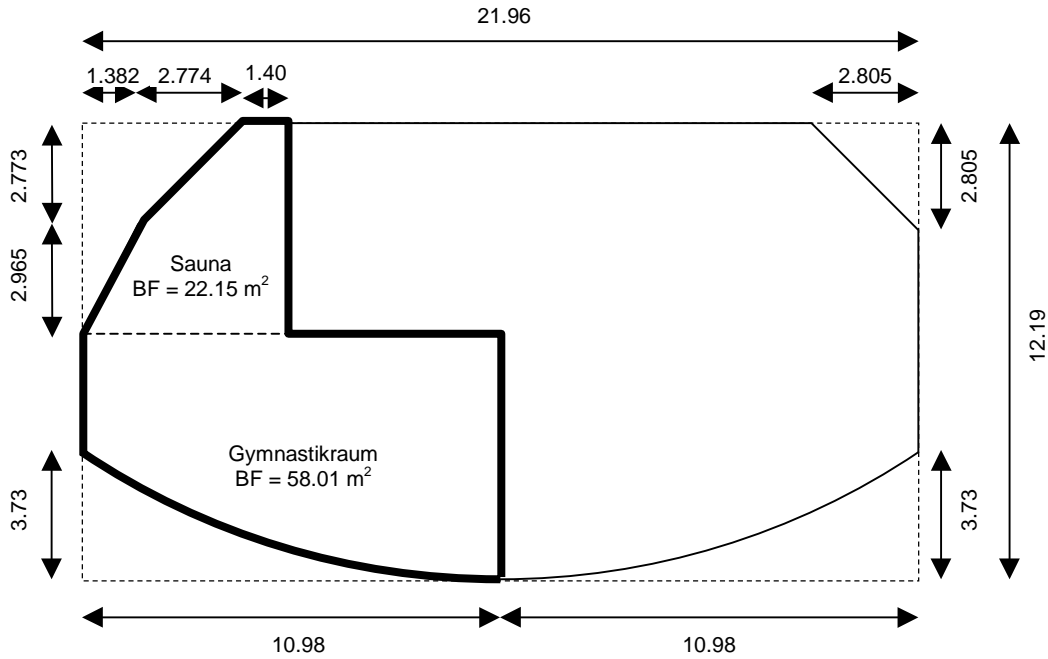


Schnitt Süd – Nord

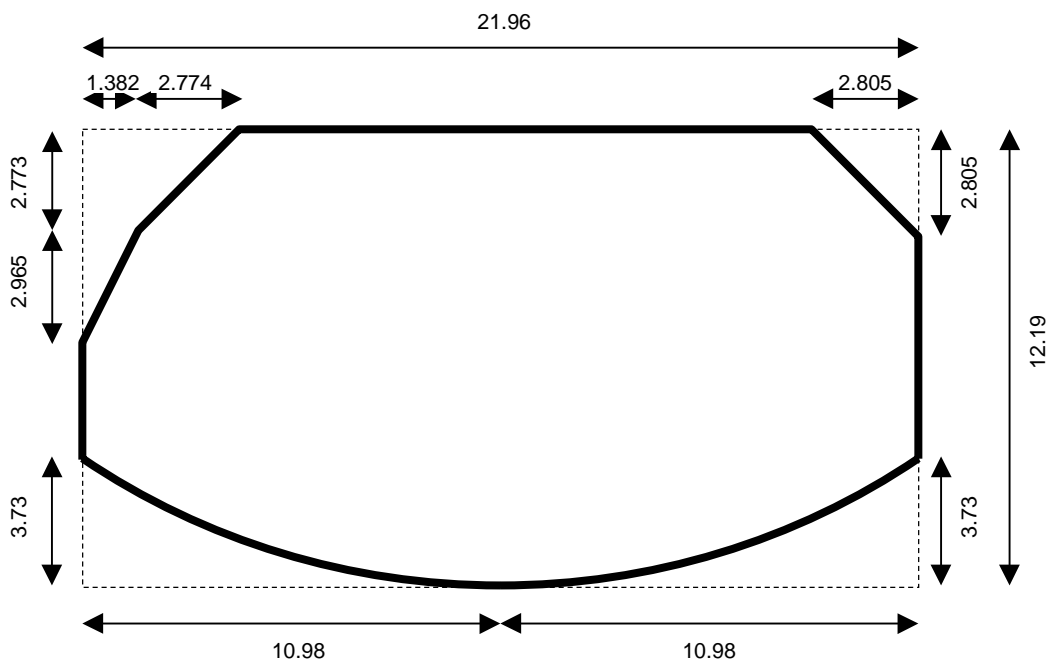


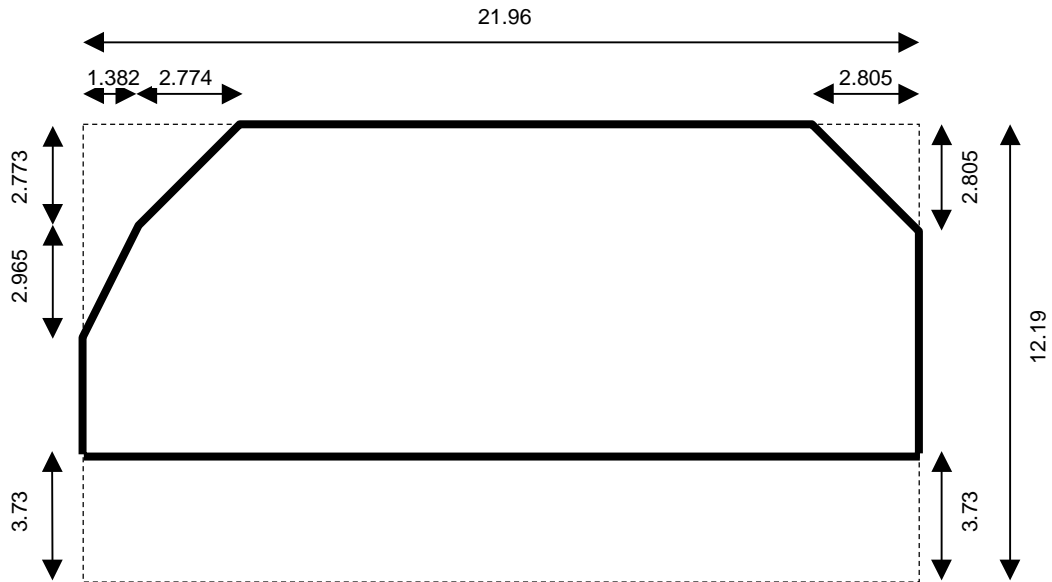
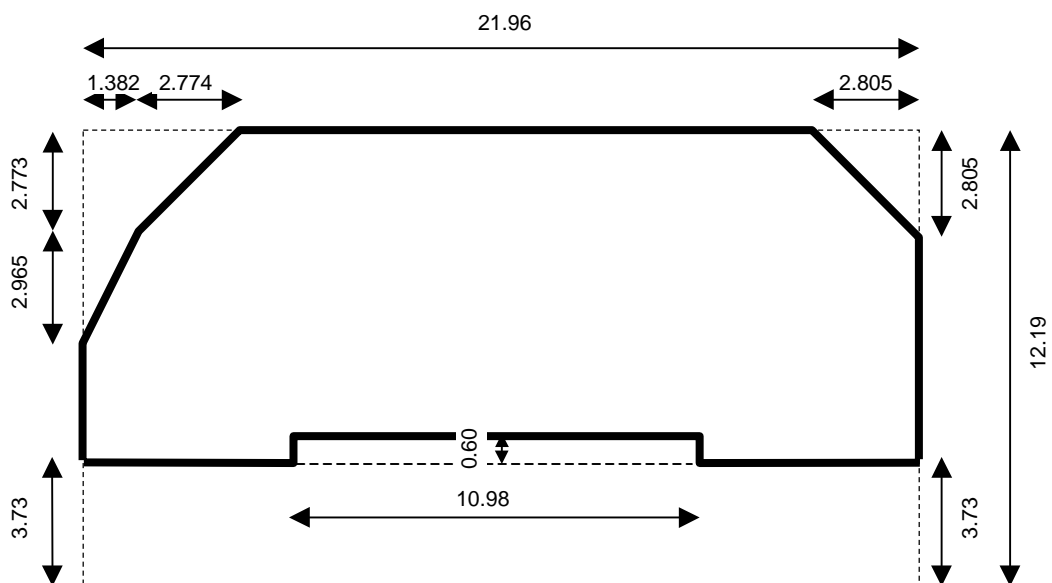
2. Energiebezugsfläche und Volumen

UG Höhe: 2.80 m EBF 80.16 m² beheiztes Bruttovolumen 224 m³



EG Höhe: 2.90 m EBF 228.37 m² beheiztes Bruttovolumen 662 m³



OG Höhe: 2.90 mEBF 172.12 m²beheiztes Bruttovolumen 499 m³**DG** Mittl. Höhe: 2.60 mEBF 165.53 m²beheiztes Bruttovolumen 430 m³

Zusammenfassung

	<i>EBF</i>	<i>beheiztes Bruttovolumen</i>
<i>EG</i>	<i>228.37 m²</i>	<i>662 m³</i>
<i>OG</i>	<i>172.12 m²</i>	<i>499 m³</i>
<i>DG</i>	<i>165.53 m²</i>	<i>430 m³</i>
<i>Total ohne UG</i>	<i>566.02 m²</i>	<i>1591 m³</i>
<i>UG</i>	<i>80.16 m²</i>	<i>224 m³</i>
<i>Total mit UG</i>	<i>646.18 m²</i>	<i>1815 m³</i>

Vergleich: Werte aus dem Projektbeschrieb des Gebäudes

EBF 673 m²

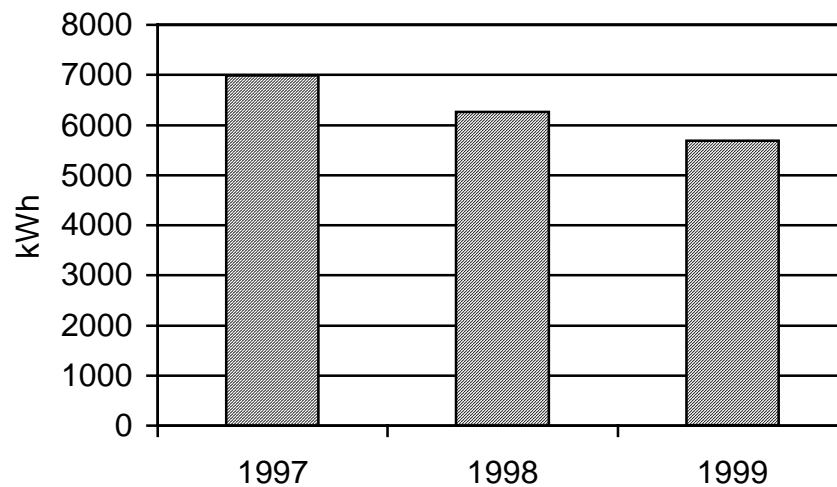
Beheiztes Bruttovolumen 1818 m³

3. Warmwasseraufbereitung

Das Warmwasser wird für alle vier Wohnungen zentral mit Sonnenkollektoren aufbereitet; die benötigte Zusatzenergie wird von einem ebenfalls zentralen, im UG befindlichen Holzheizkessel geliefert.

Die folgende Grafik zeigt den jährlichen Wärmeertrag der Sonnenkollektoren, gemäss den Angaben des Bauherrn.

Ertrag der Warmwasserkollektoren



Als Zusatzenergie wurde im Jahr 1999 rund 1'900 kg lufttrockenes Buchenholz verbraucht, was einer Energiekennzahl Warmwasser von

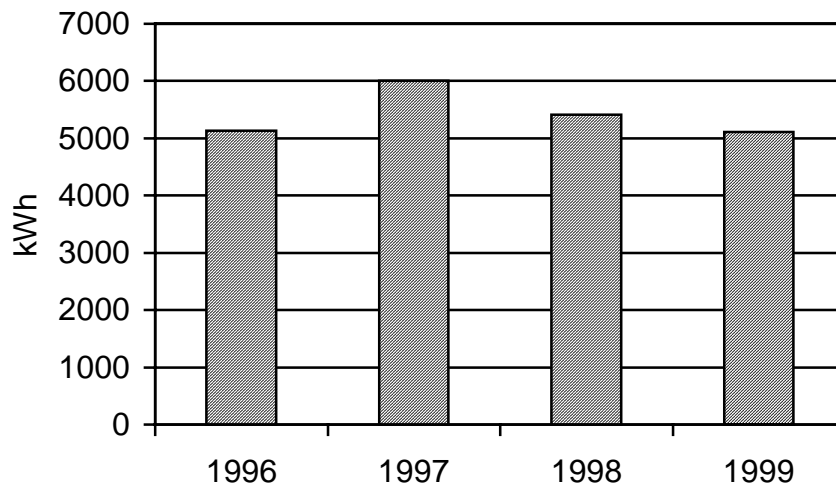
$$E_{ww} \approx 45 \text{ MJ/m}^2\text{a}$$

entspricht.

4. Photovoltaikanlage

Die Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 7,14 kW_p wies gemäss den Angaben des Bauherrn folgende jährliche Produktionszahlen auf:

Jährliche Elektrizitätsproduktion der Photovoltaikanlage



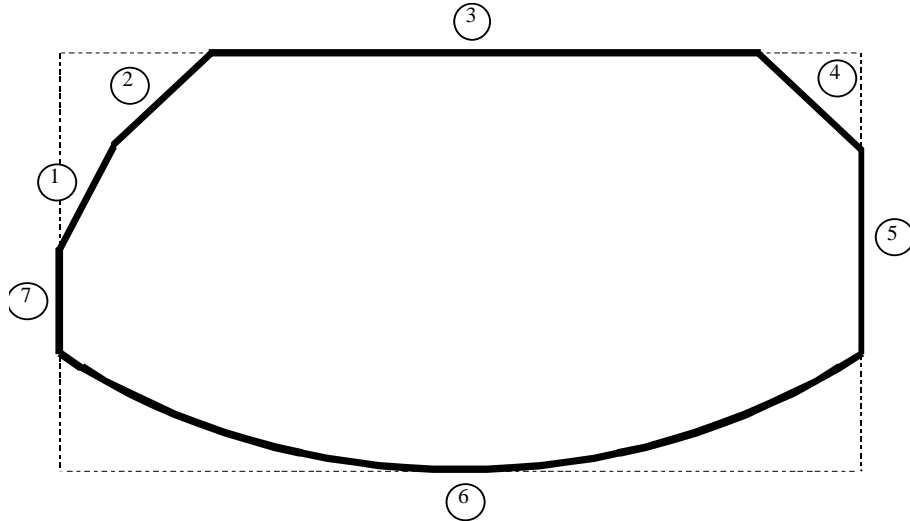
Im Mittel dieser Jahre betrug die spezifische Energieproduktion 758 kWh/kW_p, was etwa einer durchschnittlichen Energieausbeute heutiger Photovoltaikanlagen entspricht.

Im Jahre 1999 deckte die Anlage rund 56% des Elektrizitätsverbrauchs (4 Wohnungen und Allgemeinstrom). Der Restbedarf von 46%, der aus dem öffentlichen Netz bezogen wurde, entspricht einer Energiekennzahl Elektrizität von

$$E_e = 23 \text{ MJ/m}^2\text{a.}$$

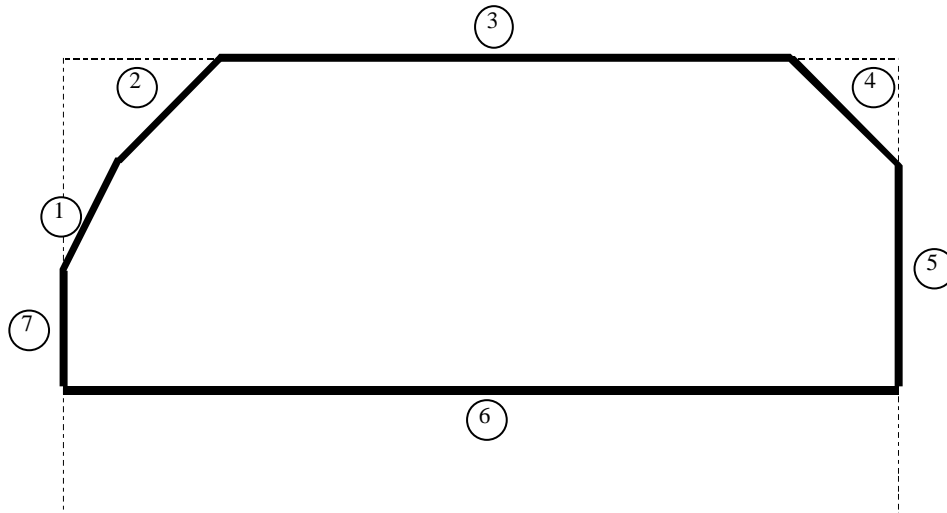
5. Berechnung des Wärmebedarfs für Transmission und Lüftung

Transmission EG



Bauteil	A [m ²]	k [W/m ² K]	gegen	Q'=A*k [W/K]
Boden	148.2	0.80	Keller	118.6
1	6.6	0.30	Aussenluft	2.0
1 Fenster	2.1	1.30	Aussenluft	2.7
2	11.1	0.30	Aussenluft	3.3
3	34.5	0.30	Aussenluft	10.4
3 Fenster+Tür	8.0	1.30	Aussenluft	10.4
4	11.2	0.30	Aussenluft	3.4
5	13.9	0.30	Aussenluft	4.2
5 Fenster	2.1	1.30	Aussenluft	2.7
6 Fensterkoll.	41.9	0.80	Aussenluft	33.5
6 Fenster	13.3	1.30	Aussenluft	17.3
6 "Rest"	11.1	1.00	Aussenluft	11.1
7	7.7	0.30	Aussenluft	2.3
Decke	56.3	0.30	Aussenluft	16.9
Total			Keller	118.6 W/K
Total			Aussenluft	120.1 W/K

Transmission OG+DG



Bauteil	A [m ²]	k [W/m ² K]	gegen	Q'=A*k [W/K]
1	14.5	0.30	Aussenluft	4.4
1 Fenster	7.1	1.30	Aussenluft	9.2
2	18.2	0.30	Aussenluft	5.5
2 Fenster	2.3	1.30	Aussenluft	3.0
3	53.5	0.30	Aussenluft	16.1
3 Fenster+Tür	8.0	1.30	Aussenluft	10.4
4	18.6	0.30	Aussenluft	5.6
4 Fenster	2.3	1.30	Aussenluft	3.0
5	25.2	0.30	Aussenluft	7.6
5 Fenster	7.1	1.30	Aussenluft	9.2
6 Fensterkoll.	23.8	0.80	Aussenluft	19.0
6 Fenster	23.8	1.30	Aussenluft	30.9
6 Querträger	16.5	0.25	Aussenluft	4.1
6 "Rest"	9.6	1.00	Aussenluft	9.6
7	14.2	0.30	Aussenluft	4.3
Dachkollektor	88.5	0.35	Aussenluft	31.0
Dach S Rest	20.0	0.40	Aussenluft	8.0
Dach N	107.0	0.40	Aussenluft	42.8
Total			Aussenluft	223.6 W/K

Zusammenfassung

Totale Transmission gegen Aussenluft	344 W/K
Totale Transmission gegen Keller	119 W/K
Kellertemperatur	12 °C
Beheiztes Bruttogebäudevolumen (ohne UG)	1'591 m ³
Faktor für Nettovolumen	0.9
Luftwechsel *)	0.5 h ⁻¹
Spezifische Wärme der Raumluft	0.3 Wh/m ³ K
Spezifischer Lüftungswärmebedarf	229 W/K

*) Gemäss SIA 380/1 für MFH:
 0.6 h⁻¹ während der Nutzungszeit von 12 h/d,
 0.4 h⁻¹ ausserhalb der Nutzungszeit