



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech

Schlussbericht vom 21.12.2016

75%-AKTIV-SOLARHAUS

(OHNE SAISONALE SPEICHERUNG)



© November 2016



Datum: 21. Dezember 2016

Ort: Wetzikon ZH

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Familie Stephan A. und
Anna Katharina Mathez
Frohbergstrasse 12c
CH-8620 Wetzikon ZH
044 262 78 32

Autor:

Dr. Stephan A. Mathez, stephan.a.mathez@solarcampus.ch

BFE-Programmleitung:

Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung:

Rolf Moser, moser@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/500647-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Kurzübersicht

Das erstellte Minergie-P-ECO-Einfamilienhaus mit Einliegerbüro erzielt nach dreijähriger Messperiode einen solarthermischen Deckungsgrad von 84% (Solarertrag von 428 kWh/m^2), 16% via Pelletkessel. Die Solarstromproduktion deckt den Strombedarf des Gebäudes (sechs Bewohner / zwei Arbeitsplätze) doppelt ab. Der jährliche Nutzenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser und Strom beträgt 16.8, 8.0 und 12.8 kWh/m^2 , total $14'850 \text{ kWh}$. Der nicht-erneuerbare Primärenergieverbrauch ist dank der Stromüberproduktion negativ und beträgt $-7'850 \text{ kWh oil-eq}$ und $-565 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ pro Jahr. Der rekordtiefe Pro-Kopf-Verbrauch für Wohnen, Arbeit und Mobilität von 320 W ist zu 100% erneuerbar.

Das Gebäude zeichnet sich aus durch einen aktivierbaren Betonkern als Solarwärmespeicher, eine solaroptimierte „geknickte“ Dachform und eine konsequent ausgeführte Passivhausarchitektur. Überschusswärme wird auf vielfältige Weise genutzt. An vier Stellen kommen Spezialgläser mit saisonal variabler Transmission zum Einsatz. Die energetischen Effekte wurden an 40 Messpunkten erfasst, sowie der Nutzen von vorausschauenden Solar-, Heizungs- und Speicherregelungen untersucht.

Résumé

Le bâtiment Minergie-P-ECO-unifamilial avec bureau intégré atteint après trois ans de période de mesure un taux de couverture solaire thermique de 84% (rendement solaire de 428 kWh/m^2), 16% par chaudière à granulés. La production photovoltaïque fournit deux fois la consommation d'électricité du bâtiment (six résidents / deux emplois). L'énergie utile annuelle pour le chauffage, l'eau chaude et l'électricité égale 16.8, 8.0 et 12.8 kWh/m^2 , au total $14'850 \text{ kWh}$. La consommation non renouvelable de l'énergie primaire est négative à cause de la surproduction photovoltaïque et atteint $-7'850 \text{ kWh oil-eq}$ et $-565 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ par an. La record basse consommation par habitant pour logement, travail et mobilité de 320 W est couverte entièrement par de l'énergie renouvelable.

Le bâtiment se caractérise par un noyau en béton activable comme stockage de la chaleur solaire, un toit en forme de coude qui optimise la production solaire et une architecture de maison passive exécutée en conséquence. Le surplus de la chaleur solaire est utilisé de façon multiple. En quatre endroits, un vitrage spécial avec une transmission saisonnière variable est appliqué. Les effets énergétiques ont été détectés à 40 points de mesure et les avantages d'un réglage prospectif pour l'énergie solaire supplémentaire et le stockage sont étudiés.

Abstract

The Minergie-P-ECO single-family house with integrated office achieves a solar thermal fraction of 84% (solar yield of 428 kWh/m^2), 16% by a pellet burner, after three years of measurement. The photovoltaic system provides twice the amount of electricity the house consumes (six occupants / two workstations). The annual consumption of energy for heating, hot water and electricity is 16.8, 8.0 and 12.8 kWh/m^2 , respectively, totaling $14'850 \text{ kWh}$. Non-renewable primary energy consumption is negative thanks to the over-production of electricity and amounts to $-7'850 \text{ kWh oil-eq}$ and $-565 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ per year. The record-low per capita consumption for living, working and mobility of 320 W is completely renewable. The building is characterized by an activatable concrete core as solar heat storage, a solar-optimized "kinked" roof form and consistently designed passive house architecture. Surplus heat is gainfully used in various ways. In four places, special glazing with seasonally variable transmission is applied. The energy effects were recorded at 40 measuring points, as well as the benefits of predictive solar, heating and storage controls were investigated.



1. Inhaltsverzeichnis

Kurzübersicht	3
Résumé.....	3
Abstract.....	3
1. Inhaltsverzeichnis	4
2. Zusammenfassung	6
2.1 Energiebilanzen	6
2.2 Raumklima	7
3. Ausgangslage.....	8
3.1 Einleitung	8
3.2 Ökologisches Engagement	8
3.3 Standort.....	8
3.4 Bedarf.....	9
3.5 Knowhow.....	9
3.6 Knowhow-Transfer.....	10
3.7 Finanzen	10
4. Ziele des Projekts.....	11
4.1 Ökologie und Autarkie: ein hoher solarthermischer Deckungsgrad	11
4.2 Anwendung der Spezialverglasung „SunPattern“	12
4.3 Nutzen einer prädiktiven Regelung.....	13
4.4 Gesunder Wohnraum und Behaglichkeit.....	13
5. Grundlagen – Randbedingungen	14
5.1 Spiegelungseffekt durch das vorgelagerte PV-Feld	14
5.2 Solar- und Gebäudesimulationen mit Tachion.....	15
5.3 Machbarkeit und Potential von SunPattern.....	16
5.4 Dynamisches Verhalten des Betonkerns	17
6. Konzept – Anlagenbeschrieb.....	18
6.1 Einleitung	18
6.2 Gebäudekonzept.....	18
6.3 Gebäudetechnik	19
6.4 Heiztechnik / Photovoltaik-Anlage	20
6.5 Wärmeverbraucher	21
6.6 Schematische Darstellung des Heizsystems	22
7. Vorgehen / Methode	23
7.1 Übersicht der eingesetzten Messgeräte	23
7.2 Strahlungsmessung	24



7.3	Technische Umsetzung: Betonkernaktivierung	25
7.4	Speicher und Hydraulik	26
8.	Ergebnisse.....	27
8.1	Hauptresultat: Der solarthermische Deckungsgrad SFi.....	27
8.2	Energieverbraucher.....	28
8.3	Solare Deckungsgrade.....	28
8.4	SunPattern	28
8.5	Reflexion durch die Photovoltaik-Anlage	32
8.6	Prädiktive Regelung	34
8.7	Passivhauskonzepte	35
8.8	Messung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit	37
8.9	Photovoltaik-Erträge.....	38
9.	Schlussfolgerungen.....	39
10.	Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss.....	40
10.1	Erhöhung des Verbrauchs	40
10.2	Erhöhung der Effizienz.....	40
10.3	Verbesserte Regelung	40
11.	Anhang	41
12.	Referenzen.....	42
13.	Danksagung.....	42



2. Zusammenfassung

2.1 Energiebilanzen

Im Zeitpunkt des Schlussberichtes lagen Messdaten über genau drei Jahren vor (Nov. 2013 – Okt. 2016). Die vorliegenden Daten zeigen den Mittelwert dieser drei Jahre. Der Pelletverbrauch lag im ersten und dritten Winter 10% unter, im zweiten Winter 20% über dem Durchschnittswert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die entsprechenden Mittelwerte:

Komponente	Jahresdurchschnitt	Spezifische Jahreswerte
Photovoltaik-Ertrag	9'900 kWh/a	972 kWh/kWp (152 kWh/m ²)
Solarwärmeertrag	11'596 kWh/a	428 kWh/m ² (Aperturfläche)
Pellet	2'202 kWh/a	290 Betriebsstunden
Stromverbrauch	5'063 kWh/a	12.8 kWh/m ² (EBF)
Raumwärme	6'619 kWh/a	16.8 kWh/m ² (EBF)
Warmwasser	3'153 kWh/a	8.0 kWh/m ² (EBF)
Deckenstrahler / Konvektor	(304 kWh/a)	(noch nicht voll operativ)

Tabelle 1: Absolute und spezifische Bilanzzahlen bei der Energieproduktion und dem Energieverbrauch.

Gemäss KBOB-2014 [9], gelten folgende Faktoren für die Umrechnung nach Primärenergie:

Energieform	CO _{2eq}	Primärenergie total	Primärenergie nicht-erneuerbar
CH-Verbrauchsmix	0.1386 kg / kWh	3.14 kWh oil-eq/kWh	2.69 kWh oil-eq/kWh
Pellets mit Partikelfilter	0.1726 kg / kWh	1.56 kWh oil-eq/kWh	0.264 kWh oil-eq/kWh
PV Schrägdach	-	1.38 kWh oil-eq/kWh	0.264 kWh oil-eq/kWh
Solarwärme WW + Heizung	-	1.85 kWh oil-eq/kWh	0.237 kWh oil-eq/kWh

Tabelle 2: KBOB-Primärenergiefaktoren im Vergleich zu Öl-Äquivalenten. Es ist zu beachten, dass der Solarwärgefaktor auf einem tiefen, pauschalen Ertragswert basiert. Die Bilanzierung ist somit sehr konservativ.

Anhand dieser Basiszahlen ergeben sich folgende CO₂- und Primärenergie-Bilanzen:

Energieform	Menge	CO _{2eq}	Primärenergie, total	Primärenergie, n-e
Nettostromverbrauch	- 4'837 kWh/a	- 670 kg	- 15'189 kWh oil-eq	- 13'020 kWh oil-eq
Pelletverbrauch	609 kg/a	105 kg	949 kWh oil-eq	161 kWh oil-eq
PV-Produktion	9'900 kWh/a	-	13'662 kWh oil-eq	2'614 kWh oil-eq
Solare Nutzwärme	10'075 kWh/a	-	18'640 kWh oil-eq	2'388 kWh oil-eq
Total	-	- 565 kg	18'062 kWh oil-eq	- 7'850 kWh oil-eq

Tabelle 3: Aufgrund der Stromüberproduktion, sind der Netto-CO₂-Ausstoss und die Netto-Primärenergie negativ.



2.2 Raumklima

Ein angenehmes Raumklima während der Heizperiode lässt sich durch die physikalischen Wertebe-reiche gemäss Tabelle 4 charakterisieren. Die nachfolgende Tabelle zeigt auch die in unserem Projekt getroffenen technischen Massnahmen:

Physikalische Grösse	Komfortzone (Heizperiode)	Technische Massnahmen
Oberflächentemperaturen	Boden / Decke: 21 – 23 °C	Betonkernaktivierung (UG / EG / DG)
	Wandheizung: 30 – 35 °C	Lehmintegrierte Wandheizung (total 35 m ²)
	Wände: 19 – 21 °C	Lehmwände (5 cm) als Feuchtigkeitsspeicher
	Fenster: 18 – 20 °C	3fach-Verglasung mit Low-E-Beschichtung
Lufttemperatur	19 – 21 °C	Betonkern- und Wandheizung, Passivgewinne
relative Luftfeuchtigkeit	40 – 50 %	Enthalpietauscher, Lehmwände / Lehmputz (3 mm)
Luftqualität	CO ₂ -Konzentration < 1000 ppm	Komfortlüftung, Kippfenster (nur für Sommer)
Luftbewegung	Luftgeschwindigkeit < 0.25 m/s	Überströmung Schlafen → Wohnen → Küche / Bad
Zulufttemperatur	2 – 4 K unter Lufttemperatur	Bodenregister zur Vorwärmung, Wärmetauscher

Tabelle 4: Kennwerte für ein angenehmes Raumklima (für körperlich nicht aktive Bewohner) während der Heizperiode, und die umgesetzten Massnahmen im vorliegenden Projekt. Die Oberflächentemperatur der Wand stimmt praktisch mit der Lufttemperatur überein, die der Fenster liegt ohne Einstrahlung etwa 2 K tiefer (mit Einstrahlung kann sie bis +10 K höher liegen). Boden und Decke heizen mit einem Temperaturunterschied von nur 1 – 2 K.

Die Behaglichkeit bei einer Lufttemperatur von 19 °C hängt stark von den umliegenden Oberflächentemperaturen ab. Bei aktiver Wandheizung ist es schon im T-Shirt behaglich. Ohne Wandheizung ist ein Pullover erforderlich. Zum Schlafen sind 19 °C sehr angenehm. Die Wandheizung wird daher morgens (6 – 9 Uhr) und abends (17 – 22 Uhr) aktiviert, wenn die Raumtemperatur unter 21 °C liegt. Die Wirkung der Wandheizung ist innert 20 Minuten spürbar.

Da Boden und Decke einen Grossteil der Oberflächen ausmachen, darf ihre Temperatur nicht zu tief absinken. Dazu wird der Betonkern alle 3 Tage mit 30 °C Vorlauf aufgewärmt (falls möglich mit Solarwärme). Aufgrund der Trägheit des Systems und dem „Behaglichkeits-Backup“ durch die Wandheizungen können Betonkern und Wandheizung mit fixen Vorlauftemperaturen fahren. Ein variierender Bedarf reguliert sich automatisch über die Taktung. Wenn sehr viel Solarstrahlung verfügbar ist, wird der Betonkern auf höhere Temperaturen gebracht und die Wandheizung kann inaktiv bleiben.

Da der ganze obere Gebäudeteil im Leichtbau erstellt ist, würde man bei hoher Solareinstrahlung starke Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen erwarten. Tatsächlich haben wir aber Temperaturschwankungen von max. 3 – 4 K und Luftfeuchtigkeitsschwankungen von max. 3 – 4 %-Punkten gemessen (siehe Grafiken Seite 37). Zum einen ist dies auf die Wärmekapazität der Lehmwände und der Holz-Beton-Verbunddecke zwischen EG und DG (12+14 cm) zurückzuführen, zum andern dämpft der Feuchtigkeitsaustausch zwischen den Wänden und der Luft die Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Im Sommer (April – Oktober) kann die Raumtemperatur mithilfe der Dachfenster, der Bypass-Lüftung, des Erdregisters und der weitgehenden Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung unter 27°C gehalten werden. So bleibt das Raumklima rund um das Jahr in der Komfortzone.



3. Ausgangslage

3.1 Einleitung

Um ein Bauprojekt realisieren zu können, das neue ökologische Massstäbe setzt, braucht es mehr als innovative Ideen und technisches Knowhow: die Lage des Baulandes, die familiäre Situation und weitere individuelle Voraussetzungen bilden eine einzigartige Konstellation, bei der der Faktor Glück eine wesentliche Rolle spielt. In diesem Schlussbericht geht es nicht primär um das Gesamtbauwerk oder die umgesetzten Einzelkonzepte: das Vernetzen von Ideen und die Herangehensweise sollen beispielhaft zeigen, wie die individuellen Bedürfnisse der Bewohner auf nachhaltige Weise erfüllt werden können. In der *Methode* liegt die Kunst und damit lassen sich ökologische Rekordwerte wie hier¹ auch unter anders gelagerten Voraussetzungen erreichen.

3.2 Ökologisches Engagement

Seit meiner Jugendzeit engagierte ich mich in Vereinen mit ökologischen Zielsetzungen. Ein schonender Umgang mit den natürlichen Ressourcen wie Luft, Wasser, Boden, Pflanzen und Tieren erschien mir selbstverständlich. Die nachhaltige (nicht überstrapazierende) Nutzung und der effiziente Einsatz dieser Ressourcen ebenso. Als Zürcher Kampagnenleiter für die Solar- und Energie-Umwelt-Initiative (September 2000) und langjähriger Mitarbeiter am Institut für Solartechnik SPF in Rapperswil habe ich das Thema Energie in all seinen Facetten kennengelernt. Sollte ich einmal ein Haus bauen können, so entscheid ich für mich, müsste es höchsten ökologischen Anforderungen gerecht werden.

3.3 Standort

Die Suche nach einem geeigneten Grundstück erfordert Einsatz, Geduld und eine Portion Glück. Als Kriterien waren für uns die Nähe zum Arbeitsort, Freundes- und Familienkreis wichtig, der Standort sollte aber auch gut mit ÖV erschlossen sein, über eine gute Infrastruktur verfügen, aber auch naturbelassenen Naherholung bieten. Die Schweiz bietet vielerorts diese Voraussetzungen in einem hohen Masse. Der Standort, den wir schliesslich gefunden haben, vier Minuten vom Bahnhof Wetzikon entfernt, erfüllt diese Bedingungen sogar in sehr hohem Masse. Es kann auch als Glücksfall bezeichnet werden, dass bzgl. des Grundstücks keine Architekturverpflichtungen bestanden, wir also freie Hand hatten.

Bewusst suchten wir zudem einen Standort, der im Winter von monatelangem Nebel verschont ist, und der über das ganze Jahr möglichst gute besonnt ist. Da wir bereits sechs Jahre in Wetzikon wohnten, konnten wir diese beiden Aspekte aus eigener Erfahrung beurteilen. Ansonsten kann man sich hier mit dem Schweizer Solarkataster [1], der Solarstrahlungskarte von MeteoSchweiz und mit GoogleEarth behelfen.

¹ Der Schweizer Solarpreis verweigerte dem Projekt die Teilnahme, weil die gemessenen Solarerträge unrealistisch hoch seien.
8/42

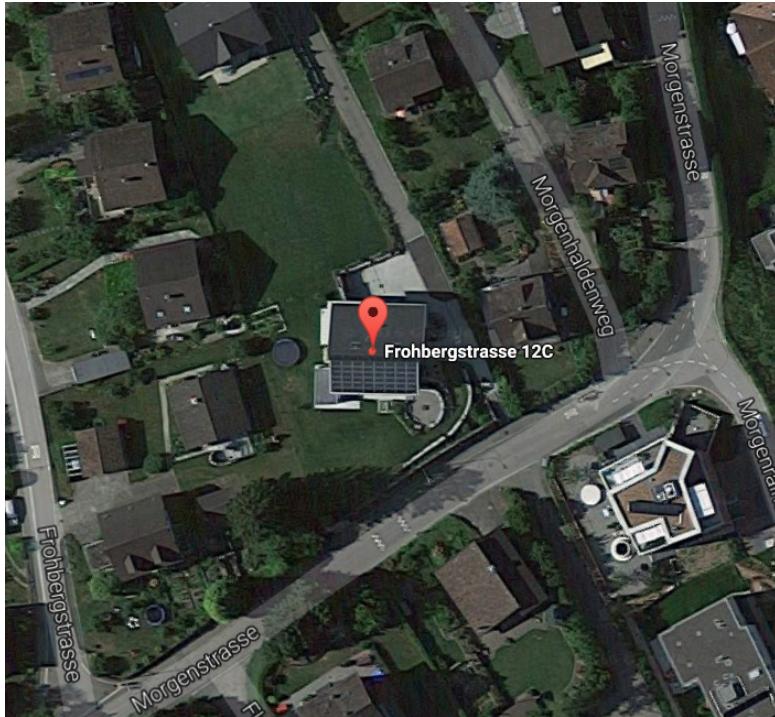


Abb. 1: Google-Luftbild des betrachteten Minergie-P-ECO-Gebäudes mit der näheren Umgebung. Das Grundstück liegt südlich des Bahnhofs Wetzikon, auf dem „Morgen“.

Gut erkennbar sind die genaue Südausrichtung des Gebäudes und die Photovoltaik-Anlage. Die steile thermische Anlage ist nur als schmales Band erkennbar.

3.4 Bedarf

Als junge sechsköpfige Familie besteht grundsätzlich ein etwas überdurchschnittlicher Platzbedarf. Man muss sich aber bewusst sein, dass diese Situation auf Zeit besteht und auch bei fortwährender Eigennutzung die Zahl der Bewohner variiert. Als zweiter Nutzer des Hauses hatten wir meine Firma Solar Campus von Anfang an vorgesehen und daher eine Einliegerwohnung (bzw. ein Einliegerbüro) mit bis zu vier Arbeitsplätzen eingeplant. Auch hier im Bewusstsein, dass die Zahl der Mitarbeiter sich rasch verändern kann. Anhand dieser Grundkonstellation haben wir ein Hauskonzept entwickelt, das über ein hohes Mass an Flexibilität verfügt: Die Hauptwohnung besteht aus 6 ½ Zimmern plus einem Studio mit separatem Eingang, dazu kommt eine 2-Zimmer-Einliegerwohnung im Bürostandard.

In Bezug auf die Energieversorgung ist die GrundwärmeverSORGUNG einer Gesamtenergiebezugsfläche von 350 m² (höhenkorrigiert 395 m²) sicherzustellen, bei einem warmwasserbedarf für 5 – 7 Personen. Eine aktive Klimatisierung im Sommer ist nicht vorgesehen.

3.5 Knowhow

Über persönliche Kontakte, die frühere Anstellung beim SPF und die Firma Solar Campus besteht ein breit gefächertes Netzwerk im Bereich Gebäude- und Energietechnik. Detaillierte technische Kenntnisse über das energetische Verhalten von Gebäuden und das Zusammenwirken von Haustechnikkomponenten sind vorhanden. Zum Zeitpunkt, als die Grundplanung des Hauses vorgenommen wurde, hatte der Autor die Energie-Simulationstools Polysun (2006) und Tachion (2008) entwickelt und dabei sämtliche Energieflüsse sowie das Komponenten- und Regelverhalten solcher Systeme mit detaillierten physikalischen Modellen beschrieben (Referenzen siehe Anhang). Auf der konzeptionellen Ebene konnten wir also aus dem Vollen schöpfen.



In Bezug auf das konkrete Vorgehen für den Bau eines Hauses war unser Wissen auf einem ziemlich durchschnittlichen Niveau. Hier mussten wir einen kompetenten Architekten finden und sämtliche planenden Ingenieure und Bauunternehmen, die es für ein solches Vorhaben braucht.

Ein besonderer Aspekt von Knowhow war eine 2010 entwickelte und 2011 zum Patent angemeldete Idee: SunPattern. Dabei geht es um Fenstergläser, die mit feinen, geometrisch optimierten Streifen versehen sind mit der Eigenschaft, dass sie im Winter dreimal mehr Sonnenlicht transmittieren als im Sommer. Die Erfindung, die vor allem im Bereich Bürogebäude ein grosses Potential besitzt, soll hier zu Demonstrations- und Testzwecken eingesetzt werden.

3.6 Knowhow-Transfer

Als in den Bereichen erneuerbare Energien (Softwareentwicklung, Planung, Beratung) und Ausbildung (Vorlesungen an der ZHAW, BBZ und HSLU) tätige Firma, ist Solar Campus praktisch an der Quelle, wenn es darum geht, die eingesetzten Konzepte und Erkenntnisse aus diesem Projekt an Berufsleute und junge Ingenieurinnen und Ingenieure weiterzugeben. Durch Vereinstätigkeiten bei der Schweizerischen Energiestiftung SES, Schweizerischen Sonnenenergievereinigung SSES, Lokale Agenda 21 und im Wetziker Gemeinderat gibt es zahlreiche Möglichkeiten (wie z.B. die „Tage der Sonne“), um das Haus für Interessierte und Studenten zu öffnen und die Konzepte vor Ort zu demonstrieren.

3.7 Finanzen

Wie bei jedem Bauprojekt sind auch hier die Finanzen eine kritische Grösse. Der Hausbau ist ein Lebensprojekt, das einem sehr viel abverlangt. Unsere Situation kann hier wohl als durchschnittlich bezeichnet werden. Das Bestreben, ein energetisch vorbildliches Gebäude zu erstellen mit hochgradig innovativen Elementen hat uns zu der Idee geführt, das Bundesamt für Energie um Unterstützung anzufragen. Die Realisierung mehrerer Konzepte und deren Kombination wurde erst dank der BFE-Unterstützung möglich. Im Übrigen ist die Refinanzierung von energetischen Massnahmen ein langwieriger und kaum voraussehbarer Prozess. Je nach Energiepreisentwicklung kann die Rentabilität der Investitionen erst im Nachhinein beurteilt werden. Bei Investitionen mit einem konkreten Zusatznutzen ist die „Rendite“ Tag für Tag spürbar. Solche Kombinationen sollten also angestrebt werden.

4. Ziele des Projekts

4.1 Ökologie und Autarkie: ein hoher solarthermischer Deckungsgrad

Eine Energieversorgung eines Gebäudes allein durch Sonnenenergie ist ein sehr anspruchsvolles Unterfangen. Dass dies grundsätzlich möglich ist, wurde bereits 1991 mithilfe von Saisonspeichern demonstriert: Für ein durchschnittliches EFH ist ein Speichervolumen von ca. 30 m³ erforderlich. Bei allen Pluspunkten dieses Konzeptes – vor allem, dass keine Zusatzheizung erforderlich ist – besitzt es aber ein paar klare Nachteile:

- Die Beladung des Speichers im Sommer und Herbst erfolgt bei hohen Speichertemperaturen. Dies ergibt relativ geringe spezifische Solarerträge.
- Im Sommer entsteht im Gebäude Abwärme, die ungenutzt weggelüftet werden muss. Überschusswärme ist ein häufiges Problem bei solaren Heizungsanlagen, aber hier ist es durch die Anlagengröße und die Speicherposition im Zentrum des Hauses noch verschärft.
- Die beanspruchte Dachfläche lässt kaum Platz für eine Photovoltaikanlage für den Haushaltstrom.
- Diese Probleme machen unseres Erachtens die substituierte Zusatzheizung nicht wett. Denn zu einer Autarkie gehört nicht nur die Wärme-, sondern auch die Stromversorgung. Um diesen Zielkonflikt zu lösen, werden im vorliegenden Projekt folgende Konzepte umgesetzt:

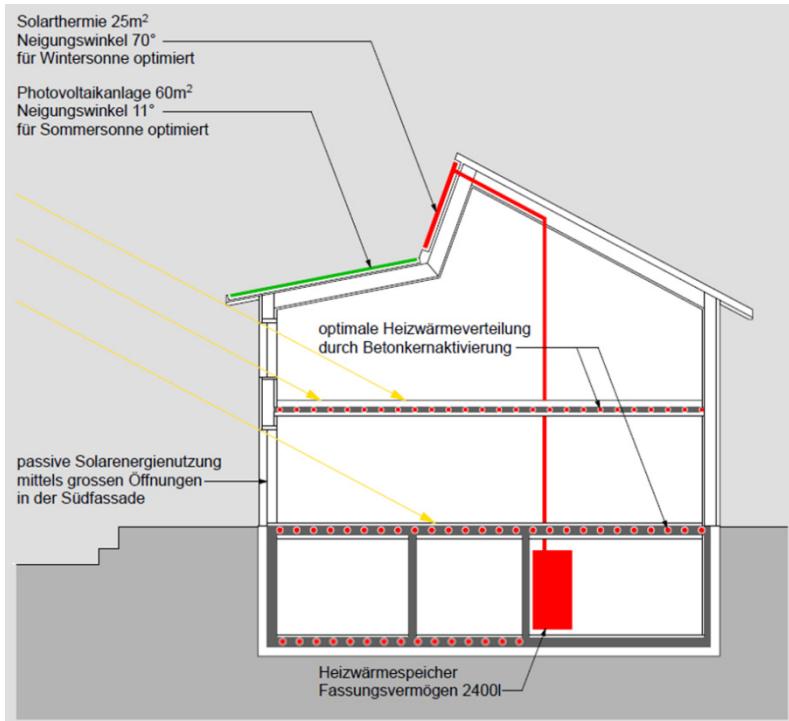


Abb. 2: Das Schema zeigt fünf Grundkonzepte des Gebäudes: Winteroptimierte Solarthermie (rot) mit kleinem Speicher, Wärmespeicherung in der Betonmasse (rote Punkte = Betonkernaktivierung), sommeroptimierte Photovoltaik (grün), hohe Passivgewinne im Winter (gelbe Pfeile), sowie Leichtbau mit durchgehender Gebäudedämmung.
Die angegebenen Systemgrößen stimmen nicht genau mit den ausgeföhrten Dimensionen überein.

- ein relativ kleines Kollektorfeld (Bruttofläche = 7.7% der Energiebezugsfläche)
- eine optimal auf das Winterhalbjahr geneigte, genau nach Süden orientierte Fläche



- Nutzung der Abwärme und Strahlungsreflexion des vorgelagerten PV-Feldes bei Wintersonne
- Nutzung der Betonmasse des Gebäudes als Wärmespeicher. Wegen des kleinen Kollektorfeldes ist nur eine Speicherung auf Wochenbasis nötig, bzw. erforderlich. Dies entspricht in etwa der Zeitkonstanten der Wärmedissipation des Betonkerns.
- Es besteht ausreichend Platz für eine angemessene Photovoltaikanlage. Diese ermöglicht eine Stromproduktion, die doppelt so gross ist wie der Stromverbrauch. Da heute wie auch im Zeitpunkt der Planung Stromspeicher (noch) nicht rentabel betrieben werden können, wird auf dieses Konzept (vorläufig) verzichtet.
- Als Zusatzheizung wird eine automatische Pelletheizung gewählt: Die Wärmeversorgung soll die Bewohner nicht kümmern. Die Heizung soll nachhaltige und möglichst CO₂-arm sein.

In der heutigen Zeit wird als Alternative zur Solarwärme/Holz-Kombination oft die Photovoltaik/Wärmepumpe-Kombination gewählt. Dass bei der Planung im Jahr 2011 diese Variante nicht gewählt wurde, hatte folgende Gründe:

- Das Bauland liegt im Einzugsgebiet von Grundwasser, wo Erdsonden für EFH nicht zulässig sind. Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde aufgrund der tiefen Jahresarbeitszahl verworfen.
- Eine Erhöhung des CH-Stromverbrauchs im Winter, wenn Wärmepumpen am meisten Strom verbrauchen, verursacht zusätzliche Stromimporte. Wärmepumpen für Heizzwecke haben bzgl. Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen kaum ökologische Vorteile gegenüber fossilen Energien.
- Die Preise für Photovoltaik waren 2011 noch markant höher als heute und Stromeigenverbrauch war noch nicht möglich. Modulierende Wärmepumpen mit Eigenverbrauchsoptimierung waren noch nicht verfügbar.
- Die Kombination Solarwärme/Holz ergibt bzgl. Wärmeversorgung eine sehr hohe Autarkie.

Aus heutiger Sicht sind einige dieser Argumente überholt. Der Netzbezug von Strom im Winter muss aber auch heute noch kritisch hinterfragt werden.

4.2 Anwendung der Spezialverglasung „SunPattern“

Ein weiteres Ziel des Projektes ist die erstmalige Anwendung und quantitative Analyse der Verglasung SunPattern, welche sich durch eine stark winkelselektive, saisonal variable Transmission auszeichnet. SunPattern-Fenster haben die Eigenschaft, dass direktes Sonnenlicht im Winter die dreimal grössere Transparenz aufweist als im Sommer. Damit ergibt sich eine Reihe von Vorteilen:

- im Sommer kann Überhitzung vermieden werden (Transmission 15 – 20%)
- im Winter können hohe Passivgewinne erzielt werden (Transmission 45 – 60%)
- bei Schlechtwetter (diffuses Licht) resultiert eine mittlere Transmission (Transmission 30 – 40%)
- über das ganze Jahr fällt ein Teil der Lichttransmission diffus in den Raum und sorgt für eine angenehme, gleichmässige Beleuchtung



- Die Verglasung kann süd-, ost- und westseitig, bzw. für beliebige Orientierungen, sowie auch über Kopf integriert oder vorgebaut, zum Einsatz kommen
- Das Verfahren ist kostengünstig und lässt sich mit gestalterischen Elementen kreativ kombinieren

Die Anwendungen von SunPattern liegen nicht primär bei Wohnbauten, sondern sind eher für Bürogebäuden, Glasüberdachungen und Gewächshäuser geeignet. Das vorliegende Projekt war aber eine Gelegenheit, das Konzept auf zwei verschiedene Arten einzusetzen:

- Ost- und westseitig, gebäudeintegriert (ausgeführt mit Verspiegelung und Sandstrahlung)
- Südseitig als Vordach (ausgeführt mit weißen Streifen)

Das Glasdesign SunPattern wurde 2011 zum Patent angemeldete [2] und an der CISBAT Konferenz 2011 an der EPFL vorgestellt [3]. Die Patenterteilung ist noch hängig. Solche Konzepte können in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Solaroptimierung von Gebäuden spielen. Im Kapitel Ausblick werden die positiven Effekte von SunPattern am Beispiel eines konkreten Bürogebäudes aufgezeigt.

4.3 Nutzen einer prädiktiven Regelung

Die Nutzung der Betonmasse als Wärmespeicher könnte sich bei Überladung negativ auf den Temperatur-Komfort des Gebäudes auswirken. Auch wenn der Beton im Sommerhalbjahr nicht beladen wird, könnte in der Übergangsjahreszeit dennoch ein Überhitzungsproblem entstehen. Um dieses zu vermeiden, wurde die Idee entwickelt, den Betonkern vorausschauend so zu beheizen, dass die resultierende Raumtemperatur nicht über dem Komfortbereich von 26°C zu liegen kommt.

Beim vorliegenden Projekt soll versucht werden, aufgrund einer 48-Stunden-Wetterprognose die Regelung im Voraus zu optimieren. Dazu wurden die beiden Regelsysteme des Gebäudes, d.h. der Heizungsregler (hier werden die Umlözpumpen von Betonkern, Wandeizungen und Solarkreis gesteuert) und die Haustechniksteuerung (hier werden die Raumthermostaten und Jalousien gesteuert) miteinander verknüpft.

Ein Ziel der ersten drei Betriebsjahre war es, herauszufinden, welcher Stellenwert eine solche prädiktive Regelung besitzt und wie diese zu regeln wäre.

4.4 Gesunder Wohnraum und Behaglichkeit

Bei allen hohen Zielsetzungen bzgl. Ökologie und Innovation ist ein Hausbau in erster Linie ein Projekt, bei dem es um die Bedürfnisse der eigenen Familie geht. Ein gesunder, vielfältig nutzbarer Lebensraum und Behaglichkeit stehen im Zentrum. Auch wenn es auf den ersten Blick nicht so scheint, stehen diese Fragen in engem Zusammenhang zum Thema der eingesetzten Materialien und Energietechnik. „Behaglichkeit“ hängt ab von Parametern wie Luftfeuchtigkeit und -temperatur, Oberflächentemperaturen, Luftzug, Akustik, Gerüchen (Geruchsfreiheit), etc. Ein uralter, leider etwas in Vergessenheit geratener Baustoff kann gleich mehrere dieser Aspekte verknüpfen: Lehm. Das Material kann in kurzer Zeit Feuchtigkeit an die Luft abgeben oder aus ihr aufnehmen. Dies hat auch eine ausgleichende Wirkung auf die Lufttemperatur. Bei hoher Sonneneinstrahlung im Winter wird dadurch ein übermäßiges Aufheizen und Austrocknen der Luft verhindert. Der Baustoff ist aus ökologischer Sicht (Graue Energie, Verarbeitung, etc.) ebenfalls zahlreiche Vorteile.

5. Grundlagen – Randbedingungen

5.1 Spiegelungseffekt durch das vorgelagerte PV-Feld

Im Rahmen eines KTI-Innovationscheck-Projektes [4] haben das Institut für Solartechnik SPF (Rapperswil) und Solar Campus mit OptiCAD Raytracing-Simulationen zur Ermittlung der Strahlungsintensivierung durch eine dem Kollektorfeld vorgelagerte, spiegelnde Fläche durchgeführt. Bei der mathematischen Beschreibung der Spiegelung ist die Polarisation des Lichtes zu berücksichtigen. Eine rein geometrische Analyse führt zu einer Überschätzung des Reflexionseffektes um 25%. Aufgrund dieser Berechnungen entwickelte Solar Campus ein Verfahren zur Optimierung von Anordnung und Neigungswinkeln und implementierte diese in das Simulations-Framework Tachion. Die Basis für diese Implementierung wurde bereits 2010 durch Solar Campus erarbeitet und am OTTI-Symposium in Stafelstein DE [5] präsentiert. Für unterschiedliche Winkel α und β resultieren folgende Erträge:

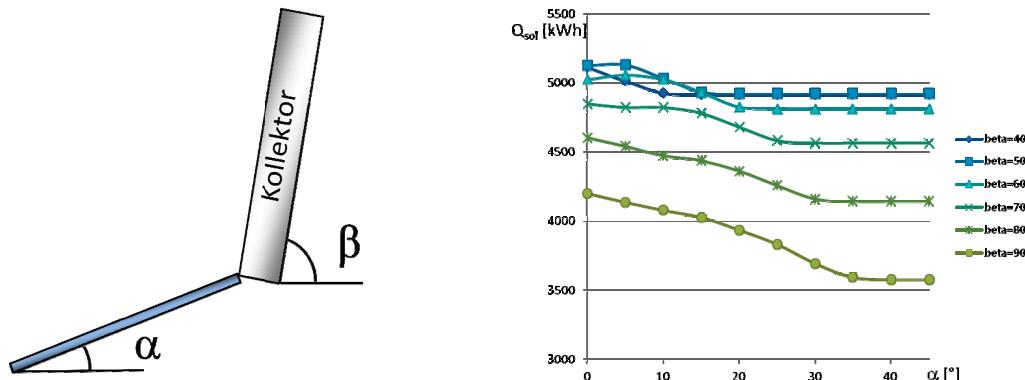


Abb. 3: Solarertrag einer heizungsunterstützenden Anlage eines 12 m^2 -Kollektorfeldes mit einer gleich grossen, vorgelagerten Photovoltaik-Anlage (genau südorientiert). Je nach Neigungswinkel steigt der Solarertrag um bis zu 17% im Vergleich zu einer Anlage ohne Reflexionen. Der Abwärmeeffekt ist bei dieser Ertragssteigerung noch nicht berücksichtigt. Bei grösseren PV-Feldern liegt das Maximum bei noch steileren Kollektorneigungswinkeln.

Als ideale und auch praxistaugliche Winkel haben sich bei Südorientierung 11° für die Photovoltaik-Anlage und 70° für die solarthermische Anlage herausgestellt. Dabei ist die PV-Anlage dachintegriert und dank 12 cm Abstand zwischen Modulen und Dachhaut gut hinterlüftet. Die Hinterlüftung führt im Dachknick direkt zum thermischen Feld über. Dadurch kommen die vorder- wie die rückseitige Abwärme der PV-Anlage dem thermischen Wirkungsgrad der Kollektoren zugute.

Gemäss Simulationen resultiert im Winter um die Mittagszeit eine Erhöhung der Strahlungsintensität um 10 – 15 %, bei verschneitem PV-Feld um bis zu 40%. Der Spiegelungseffekt tritt während sechs Monaten auf und verursacht dadurch im Sommer keine zusätzliche Überhitzung. Unter Berücksichtigung der erhöhten Lufttemperaturen resultiert im Winterhalbjahr ein zusätzlicher Energiegewinn von 20 %. Im Sommerhalbjahr tritt der Spiegelungseffekt in umgekehrter Richtung auf: die Kollektoren reflektieren morgens und abends einen Teil der Solarstrahlung auf den obersten Abschnitt der Photovoltaik-Anlage.

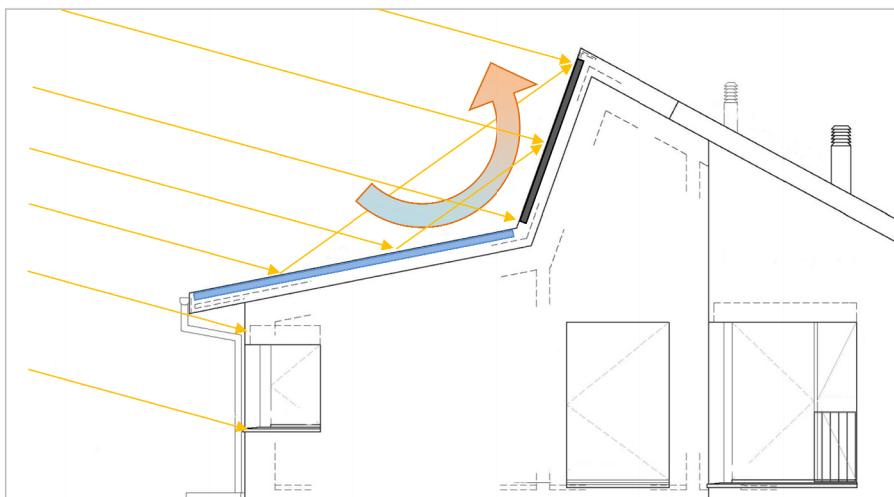


Abb. 4: Situation der Sonnen-einstrahlung am Mittag des 21. Dezember. Das von der PV-Anlage (blau) reflektierte Licht führt zu einer Erhöhung der Einstrahlung auf das thermische Feld (schwarz) um 15%. Zudem führt die Ab-wärme der PV-Anlage zu höheren Lufttemperaturen beim thermischen Kollektor-feld und damit zu höheren Solarerträgen während des Winterhalbjahres.

5.2 Solar- und Gebäudesimulationen mit Tachion

Eine umfassende Simulation der diversen Energiekonzepte (Betonkernaktivierung, Spiegelungseffekt, SunPattern, prädiktive Regelung) war 2012 und ist noch heute mit den gängigen Simulationstools (Tachion / Polysun / IDA) nicht möglich. Eine Simulation mit TRNSYS würde einen unverhältnismässig hohen Aufwand bedeuten. Um trotzdem eine Aussage über den solaren Deckungsgrad machen zu können haben wir das Gebäude mithilfe von Tachion simuliert und am OTTI [6] sowie an der EPFL [7] präsentiert. Eine Simulation mit kleinen Vereinfachungen (Spiegelung, Hydraulik, Betonkern) lässt sich mithilfe des auf Tachion basierenden Solarrechners von EnergieSchweiz [8] online durchführen:

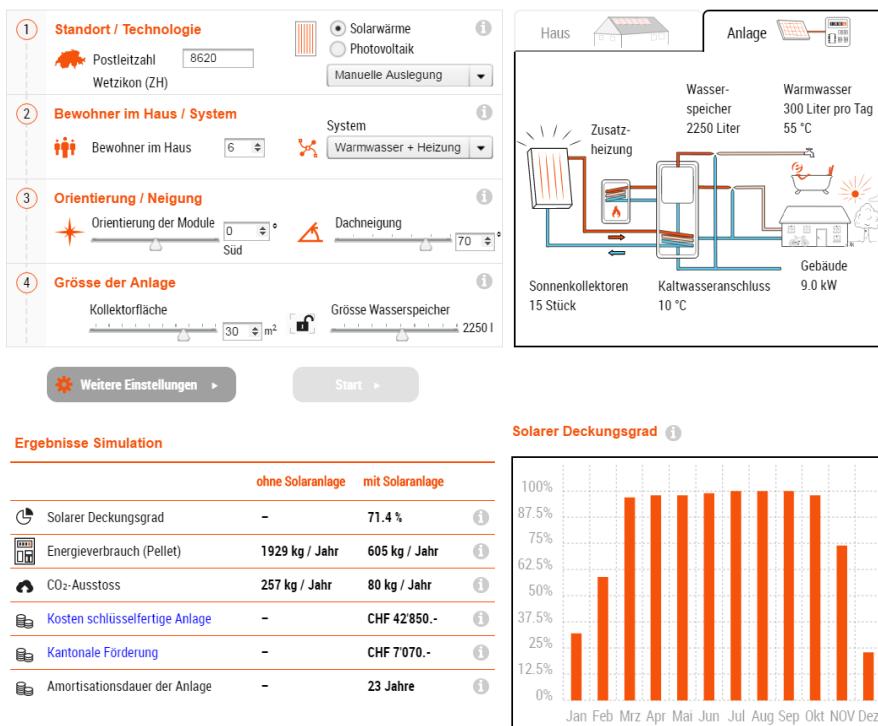


Abb. 5: Simulation der Anlage mithilfe des Solarrechners von EnergieSchweiz (seit 2014 online). Die Eckdaten des Projektes (Passivhaus, Warmwasserverbrauch, Dachsituation, Anlagengrösse) zeigen bereits das Potential dieser Konstellation. Dabei sind der Kollektortyp, der Spiegelungseffekt und die Betonkernaktivierung nicht Teil der Simulation.



In der Planungsphase wurde mithilfe von Tachion auch der Effekt der Reflexion durch das PV-Feld berücksichtigt. Damit resultiert ein Deckungsgrad von 75.3%. Ein Vergleich der Anlage mit einer Dachneigung von 45°, 70° und einer Neigung von 70° mit PV-Reflektor ergibt folgendes Diagramm:

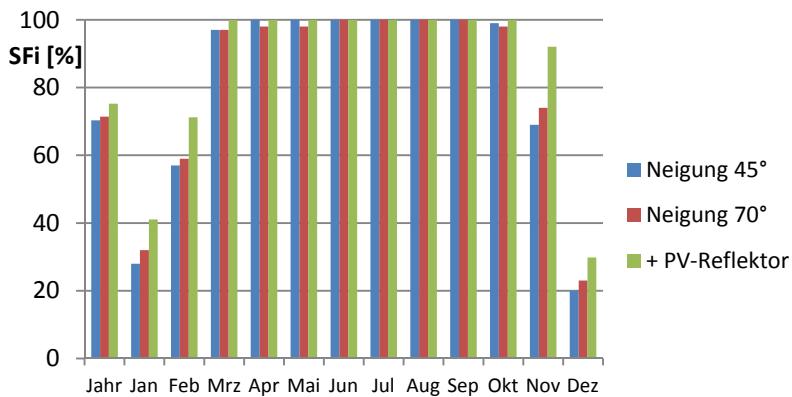


Abb. 6: Vergleich des solaren Deckungsgrades mit und ohne PV-Reflektor. Der Energieverbrauch und die Anlagengröße ist in allen drei Fällen identisch (30 m^2 Flachkollektor, 2250 Liter Speicher). Der Reflektor bewirkt nur im Winter eine Erhöhung des Solarertrages, nicht aber im Sommer. Dann verhindert das steile Kollektorfeld ein Überhitzen der Anlage.

5.3 Machbarkeit und Potential von SunPattern

Das 2012 zum Patent angemeldete Design für eine jahreszeitlich variable Transmission wurde mittels detaillierter Simulationen verfeinert. Hier soll anhand eines konkreten Beispiels gezeigt werden, welches Energie- und Kostensparpotential darin steckt.

Grundsätzlich eignet sich SunPattern für folgende Bereiche:

- Bürogebäude mit hohem Glasanteil (1)
- Produktionsgebäude mit hohem Glasanteil (2)
- Glasüberdachungen/Atrien (3)
- Wintergärten/Pergolen (4)
- Dachfenster (5)
- Sichtschutzglas, gegen aussen oder innen (6)

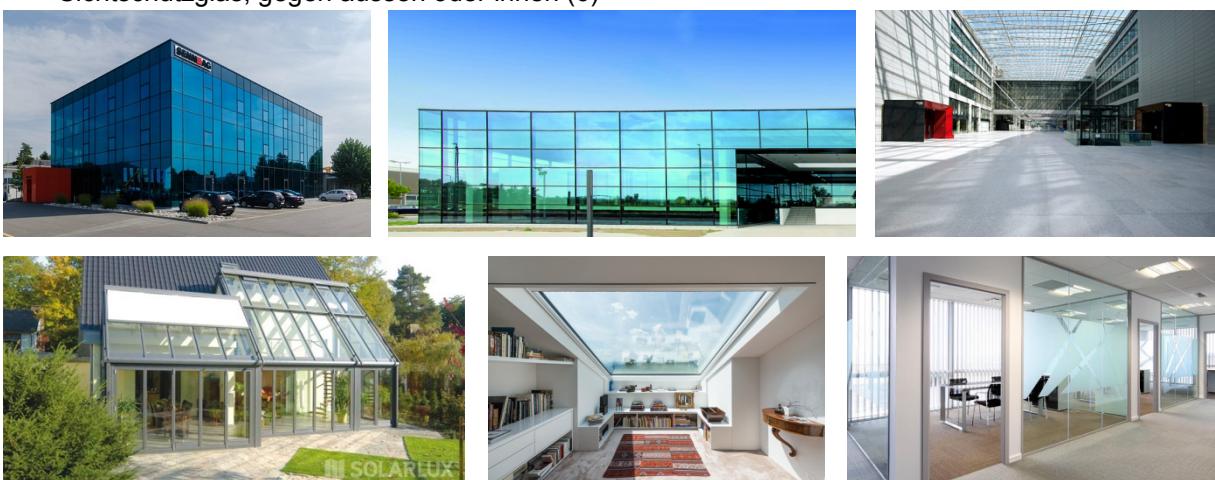


Abb. 7: Die gezeigten Beispiele sind ohne SunPattern. Aber hier überall könnte SunPattern sinnvoll zum Einsatz kommen.

Primäre Kriterien für die Eignung von SunPattern

Simulationen haben gezeigt, dass die interne Last und die thermische Masse eines Bürogebäudes die entscheidenden Kriterien sind, ob sich *SunPattern* finanziell auszahlt, bzw. in welcher Weise es mit anderen Kühlmaßnahmen kombiniert werden sollte:

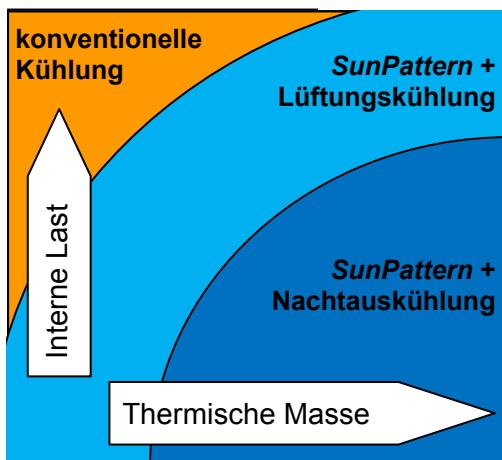


Abb. 8: SunPattern eignet sich insbesondere für Gebäudehüllen mit hohem Glasanteil. Das Konzept funktioniert rein passiv. Je nachdem, wie grosse die thermische Masse des Gebäudes ist und welche internen Lasten vorhanden sind, kann SunPattern in Kombination mit einer Nachtauskühlung und/oder einer Lüftungskühlung eingesetzt werden. Bei hoher Lasten und geringer Masse ist eine konventionelle Kühlung (Kühldecken, etc.) erforderlich.

Im Anhang wird anhand eines konkreten Bürogebäudes der Effekt einer SunPattern-Fassade berechnet und mit einem klassischen Sonnenschutzglas verglichen. Beim vorliegenden Minergie-P-Projekt ist zwar der Verglasungsanteil deutlich geringer, das rein passive SunPattern-System kann aber auch hier für Wärmegewinne im Winter und als Überhitzungsschutz im Sommer dienen. Die entsprechenden Muster wurden für den Standort Wetzikon und die Orientierung des Gebäudes optimiert.

5.4 Dynamisches Verhalten des Betonkerns

Um das dynamische Verhalten der Betonkernaktivierung zu untersuchen, wurde ein 17-Knotenmodell (eindimensional) erstellt. Damit konnten verschiedene Materialien und Dimensionen getestet werden.

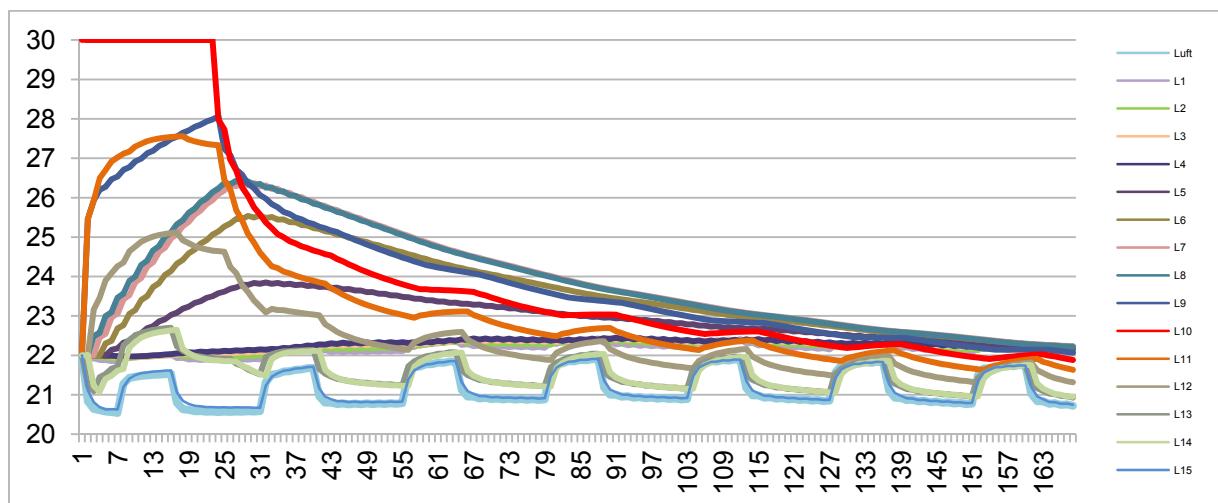


Abb. 9: Temperaturverlauf (°C) über eine Woche (168 Stunden). Dabei wird die ersten 24 Stunden der Betonkern auf 30°C erwärmt. Es werden keine internen und nur minimale passive Gewinne angenommen. Die Lufttemperatur variiert zwischen Tag und Nacht nur um 1 K. Der Effekt des warmen Betonkerns hält über eine ganze Woche an.



6. Konzept – Anlagenbeschrieb

6.1 Einleitung

Die Planung eines Gebäudes ist bekanntlich eine komplexe, vielschichtige Angelegenheit. Es gilt dabei folgende Gesichtspunkte „unter ein Dach“ zu bringen:

Art der Nutzungen (Wohnung, Büro), Mass an Flexibilität für zukünftige Nutzungen

Platz- und Wohnbedürfnisse (Anzahl der Zimmer, Raumgrößen, Konstellation)

energetische Rahmenbedingungen (normative, gesetzliche, verfügbare Netze und Zuleitungen, Bodenbeschaffenheit, klimatisch-meteorologische Voraussetzungen, Gebäudeorientierung, nutzbare Dach- und Fassadenflächen, Passivenergienutzung)

Charakter des Gebäudes, Ästhetik, Bauökologie, Baubiologie, Akustik

Beziehung zur Nachbarschaft und Umgebung (Aussicht)

Anforderungen an den Umschwung (Garten, Abstellflächen, geschützte Bereiche, etc.)

Optimale Ausnutzung der Grundstückfläche (gesetzliche Vorgaben, Erweiterbarkeit, etc.)

Rückbaubarkeit, Graue Energie, Statik, Erdbebensicherheit, etc.

Diese Liste ist wohl in mancherlei Hinsicht erweiterbar und je nach Situation und Bauherr liegen die Prioritäten unterschiedlich. Die hier gezeigte Liste entspricht in etwa unserem Anforderungskatalog. Was hier nicht explizit erwähnt ist, aber natürlich von grundlegender Bedeutung, sind die finanziellen Rahmenbedingungen. Da Investitionen in die Energietechnik auch langfristige finanzielle Auswirkungen haben, sind sie anders zu beurteilen als „statische“ Konsuminvestitionen.

Die gesamte Aufgabe erhält dadurch noch weitere Komplexität, dass im Gebäudebereich zahlreiche technische Innovationen und Komponenten entwickelt werden, diese „Komponenten“ aber untereinander unterschiedlich kompatibel sind und die Kosten für ungewohnte Kombinationen im Vorfeld nur schwer absehbar sind.

Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Konzepte in unserem Fall zur Anwendung kamen.

6.2 Gebäudekonzept

Als Teil des Gebäudekonzeptes werden die Geometrie (Form, Flächen, Orientierungen), die Beschaffenheit von Gebäudeteilen (Transparenz, Kapazitäten, etc.) und deren funktionaler Nutzen (Wärme-/Stromgewinnung, Dämmung, Speicherung) verstanden:

- Nutzung als Wohnung (6 ½ Zimmer), Studio (1 Zimmer) und Büro (2 Zimmer)
- Kubatur brutto 1167 m^3 , netto 934 m^3 , Energiebezugsfläche 395 m^2 (raumhöhenkorrigiert)
- Ausrichtung der Südseite (= Kollektorausrichtung = Photovoltaikausrichtung) genau nach Süden

- Kollektorneigung 70° (senkrechte Einstrahlung am 21. Dezember)
- Photovoltaik-Neigung 11° (hohe Sommererträge, viel Reflexion auf die Kollektoren im Winter)
- Grosse Fensterflächen südseitig, kleine Fensterflächen nordseitig
- Schieferboden im Wohn-/Esszimmerbereich zur Absorption und Speicherung der Einstrahlung
- Zwei Dachfenster nordseitig zur Nachtauskühlung im Sommerhalbjahr
- Nutzung der Wärmekapazität der Betonböden als Wärmespeicher
- Gebäude als Leichtbau ausgeführt, abgesehen von einer Holz-Beton-Verbunddecke im OG
- Dämmung rund um das gesamte Gebäude inkl. Untergeschoss (zu ca. 60% im Erdreich)
- Gedeckter Sitzplatz (süd-)westseitig angebracht (volle Passivgewinne im Winter)
- Gebäudehülle in gutem Passivhausstandard (U-Wert Wände 0.1 W/m²/K, Dach 0.09 W/m²/K)

6.3 Gebäudetechnik

Als Teil der Gebäudetechnik werden alle aktiven und passiven Komponenten verstanden, die auf das Raumklima einen Einfluss haben, aber nicht Teil des Gebäudekonzeptes (6.2) oder der Heiztechnik (6.4) sind:

Lehmplatten (mit Lehmputz) auf allen Aussenwänden und Lehmputz auf allen Innenwänden regulieren die relative Luftfeuchtigkeit im Gebäudeinnern. Bei rascher Luftherwärmung (z.B. durch Sonneneinstrahlung) geben die Wände Feuchtigkeit an die Innenluft ab. Diese bremst deren Temperaturanstieg und ihr Austrocknen. Bei einem Überschuss an Feuchtigkeit in der Luft wird dieser von den Wänden absorbiert.

- Mit verstärktem Trittschall sowie Deckendämmungen wird eine zu rasche Wärmeabgabe des Betonkerns an die Innenräume verhindert. Der Wärmedurchgang wird für jeden Raum einzeln dimensioniert um eine möglichst gleichmässige Raumtemperatur zu gewährleisten.

Wärmedurchgang:

- Wärme nach oben
- Wärme nach unten
- Ventilationsverluste
- Transmissionsverluste
- Räume gleichmäßig warm

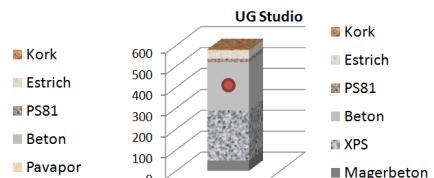
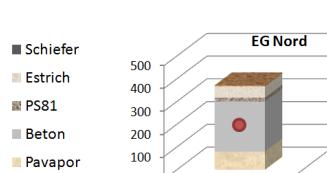
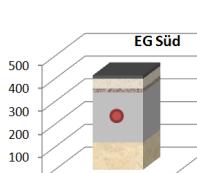
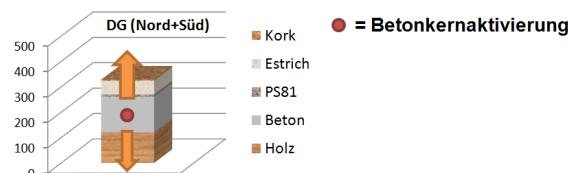


Abb. 10: Drei Beispiele des Bodenaufbaus in Millimeter im Dachgeschoß (DG) und im Erdgeschoß (EG). Allen gemeinsam ist, dass der Betonkern oben und unten durch eine Wärmedämmung zum Raum hin getrennt ist.



- Um die Luftfeuchtigkeit auf angenehmem Niveau zu halten, kommt bei der kontrollierten Lüftung ein Enthalpietauscher zu Einsatz. Dieser überträgt nicht nur einen Grossteil der Wärmeenergie, sondern auch die in der Abluft enthaltene Feuchtigkeit auf die Zuluft.
- Wandheizungen erlauben es, die Komforttemperatur (Luft- + Strahlungstemperatur) punktuell und kurzzeitig anzuheben. Die Wandheizungen sind in die Lehmplatten eingebettet.
- Das Aussenluftansaugrohr wird als 2 x 20 m-Bodenregister durch das Erdreich geführt. Dadurch wird die Aussenluft im Winter vorgewärmt und im Sommer vorgekühlt.
- Die kontrollierte Belüftung nutzt die Überströmung vom Schlaf- zum Wohn-/Arbeits- und zum Badzimmer-/Küchenbereich. Der Wärmetauscher ist ein Zehnder Comfoair 550 B-E mit Enthalpie-Kreuz-Gegenstromwärmetauscher, der einen Wärmerückgewinnungsgrad von über 90% und eine Feuchtigkeitsrückgewinnung von bis zu 70% aufweist.
- Aktivkohle-Filter für die Herdlüftung um die Wärmeenergie im Haus zu halten.
- SunPattern kommt wie in (4.2) beschrieben ost-, süd- und westseitig zum Einsatz.
- Die Jalousien können über eine zentral programmierbare Steuerung individuell gesteuert werden.
- Bewegungsmelder erhellen Treppenbereiche, Veloraum und Waschküche automatisch.
- Die Heiztechnik soll für die Bewohner möglichst unauffällig oder sogar unsichtbar sein.

6.4 Heiztechnik / Photovoltaik-Anlage

Als Teil der Heiztechnik werden alle unmittelbar an der Energiebereitstellung beteiligten Komponenten verstanden:

- Solarthermische Anlage mit 26.8 m² Absorber- und 30.4 m² Bruttofläche (7.7% der EBF). Das genau südorientierte Feld ist 70° geneigt. Dank Antireflex-Glas erreicht der Kollektor einen optischen Wirkungsgrad von 86%. Die Drainback-Anlage wird mit (entmineralisiertem) Wasser betrieben. Akkurat verlegte Solarleitungen sorgen dafür, dass das Kollektorfeld vollständig entleert, sobald die Umwälzpumpe stoppt.
- Die Zusatzheizung ist ein kondensierender, von 4 – 12 kW modulierender Pelletkessel. Das Silo ist 1.7 x 1.7 m gross und fasst 2'200 kg Pellets, was für ca. 3 Jahre reicht.
- Die 10.2 kW (65.8 m²) netzgekoppelte Photovoltaikanlage besteht aus 48 ZRE 212 W-Modulen mit einem Wirkungsgrad von 15.5%, die auf drei Wechselrichter geführt werden. Die Installation ermöglicht keinen Eigenverbrauch. Der flache Neigungswinkel von 11° ergibt im Vergleich zu einer optimal geneigten Anlage (35°) einen um etwa 6% geringeren Solarertrag.
- Die Solar-, Pellets-, Betonkern-, Wandheizungs- und Konvektorkreise werden alle mit demselben Wasser betrieben, wodurch keine Wärmetauscher nötig sind. Die Kreisläufe arbeiten mit relativ tiefen Durchsatzmengen, wodurch die Speicherschichtung über lange Zeit stabil bleibt und minimale Exergieverluste resultieren. Im Kollektorfeld hat Wasser gegenüber Glykogemischen den Vorteil, dass es über eine höhere Wärmekapazität und einen höheren Turbulenzgrad verfügt, somit also auch einen effizienteren Energietransport bewirkt.



6.5 Wärmeverbraucher

Folgende Kreisläufe und Verteilnetze dienen der Versorgung der Wärmeverbraucher:

- Der Betonkernaktivierung deckt das UG (bis auf einen kleinen Keller, den Velo- und Technikraum), das gesamte EG und DG ab. Gesamthaft sind ca. 60 m³ Beton aktivierbar. Dies entspricht einem 20 m³ Wasserspeicher (dabei wird für Wasser die doppelte Temperaturspreizung angenommen: 25 → 45°C gegenüber 25 → 35°C beim Betonkern). Der Betonkern wird auf 30 – 35 °C erwärmt.
- Der Kreislauf der Wandheizungen versorgt 9 Zimmer (Schlaf-/Wohn-/Ess-/Arbeits-/Sitzungszimmer und Büro), welche sich über Raumthermostaten individuell regeln lassen. Die Flächen sind etwa dreimal keiner dimensioniert, als wenn die Räume nur über Wandheizungen beheizt würden. Die Vorlauftemperatur liegt bei 35 – 40°C. Ab einer Wandoberflächentemperatur von über 28 °C lässt sich eine spürbar warme Abstrahlung feststellen.
- Die Warmwasserverteilung erfolgt ohne Zirkulationsleitung. Dank der kompakten Anordnung der Entnahmestellen resultieren Ausstosszeiten von 2 – 10 Sekunden, somit auch geringe Ausstossverluste für Energie und Wasser. Die Küchenleitung ist mit 5 mm gedämmt, um ein zu rasches Auskühlen der Leitung zu verhindern. Der Geschirrspüler und die Waschmaschine sind direkt am Warmwasser angeschlossen.
- In der Warmwasserverteilung zweigt vor dem Verbrühungsschutz eine (hochtemperaturbeständige) Leitung zur Küche ab. An einem separaten Quooker-Hahn mit „Kindersicherung“ kann die maximale Speichertemperatur in der Küche genutzt werden.
- Als rein hydraulische Sauna-Heizung kommt ein 10-kW-Konvektor zum Einsatz. Die Anschlüsse dafür befinden sich im oberen Teil des Speichers. Die Pumpe schaltet über eine Zeitschaltuhr automatisch nach einer Stunde ab. Die Sauna ist noch nicht eingebaut. Der Konvektor dient im Moment als überdimensionierte Badezimmerheizung.
- Über einen Deckenstrahler kann der Sitzplatz beheizt werden. Dies geschieht mit 4 Klimadecken mit einer Fläche von total 8.2 m². Der Kreislauf ist mit 25% Glykol betrieben, da die Module frost-sicher sein müssen. Der Wärmetauscher dazu befindet sich im unteren Drittel des Speichers. Dieser Teil ist nur durch Sonnenenergie beheizbar.



6.6 Schematische Darstellung des Heizsystems

Kurzbeschreibung des Systems:

- Kollektorfläche (Apertur) 27.1 m², 70° geneigt
- Speicher 2500 Liter Inhalt, Tank-In-Tank
- Kondensierender Pelletkessel mit Silo
- Heizgruppe Betonkernaktivierung
- Heizgruppe Wandheizungen
- Warmwasserverteilung (ohne Zirkulation)
- Heisswasseranschluss für die Küche
- Konvektor für Sauna 10 kW
- Strahlungsdecke Sitzplatz 8.2 m² (glykolgeföhrt)

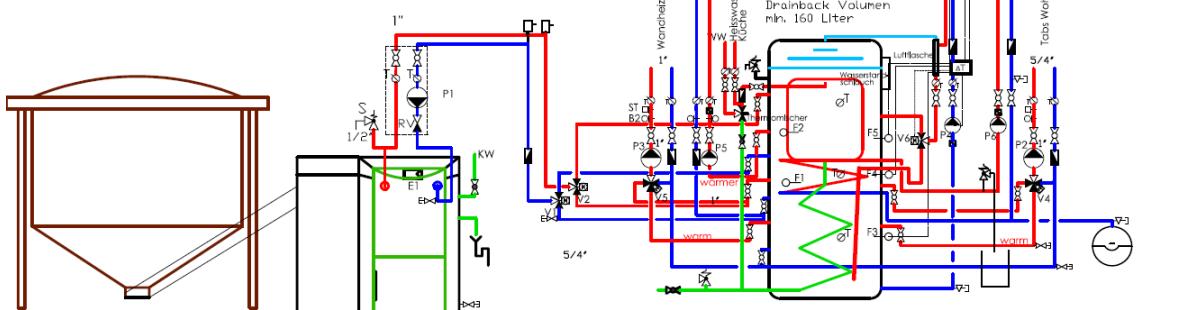


Abb.11: Prinzipschema des Heizsystems mit (von links nach rechts): Pelletsilo, Pelletkessel, Wandheizverteilung, Saunakonvektor, Warmwasserverteilung, Kombispeicher (gleichzeitig Drainbackgefäß), Solarkreis, Deckenstrahler und Betonkernkreis.

Am Projekt sind folgende Firmen beteiligt und wurden folgende Produkte eingesetzt:

Gewerk	Produkt	Firma
Thermischer Kollektor	COBRA Evo X 2.8	Soltop Schuppisser AG
Pelletkessel	PESK-12 Pelematic-Plus kondensierend	OekoFEN AG
Deckenstrahler Sitzplatz	Deckenstrahlplatten aus Edelstahl AVE	Energie Solaire S.A.
Sauna-Konvektor	Konvektor stratos CS (2000 mm)	Zehnder Comfosystems AG
Kontrollierte Lüftung	Comfoair 550 B-E, Enthalpietauscher	Zehnder Comfosystems AG
Betonkern	Uponor TAB System	Uponor AG
Photovoltaik-Anlage	ZRE 212 GEF 50M (+)Z-QL (GSS)	Installation: LEC Leutenegger
Vordach Südseite	Spezialglas SunPattern Vordach	Glas Trösch AG
Grosse Ost-/Westfenster	Spezialglas SunPattern Isolierglas	Galvolux SA

Tabelle 5: Eingesetzte Komponenten und beteiligte Firmen



7. Vorgehen / Methode

7.1 Übersicht der eingesetzten Messgeräte

Im vorliegenden Projekt stehen Fragen zu sehr unterschiedlichen Themen zur Untersuchung: Energieflüsse in der Jahresbilanz zur Beurteilung des Solardeckungsgrades, Ertrag der Photovoltaikanlage, Komfortsituation im Innern, Systemdynamik und Transmissionsmessungen bei SunPattern. Aufgrund dieser Heterogenität der Aufgaben erschien es sinnvoll, auf die jeweiligen Fragestellungen zugeschnittene Messlösungen einzusetzen. Einige Fragestellungen erfordern eine konstante Aufzeichnung der Messdaten (z.B. Wärmeflüsse), andere Messungen können nur bei bestimmten Strahlungsbedingungen durchgeführt werden (z.B. Reflexion am PV-Feld) und/oder sind an bestimmten Daten (z.B. Sommersonnenwende) besonders interessant.

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die eingesetzten Messsysteme, ihre Einsatzgebiete und die Häufigkeit der Messung:

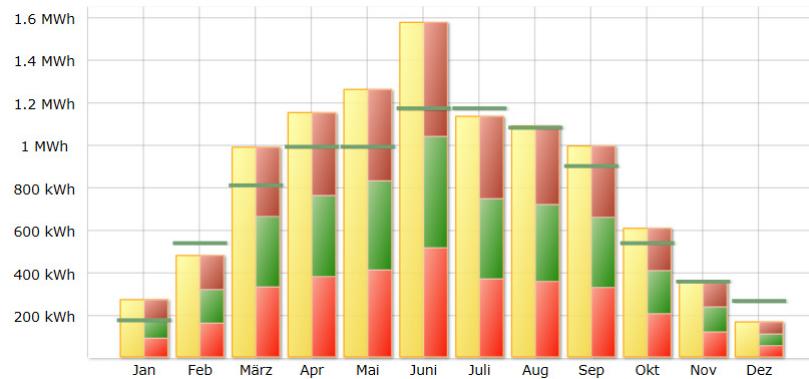
Bereich	Firma/Gerät	Messgrößen	Frequenz
Photovoltaik	SolarLog	3 Wechselrichter: AC-Produktion	10 Minuten
Wärmeflüsse	ista	Wärmeflüsse folgender 6 Kreise: Solar, Betonkern, Wandheizung, Konvektor, Deckenstrahler, Durchflusszähler Warmwasser	1 Monat
Systemtemperaturen	Technische Alternative / UVR1611	8 x Speicher- und Systemtemperaturen; 5 x Schaltzustände	5 Minuten, Auslesung sporadisch
Raumtemperaturen, rel. Luftfeuchtigkeit	Adhoco / EnOcean	13 x Raumtemperaturen und Luftfeuchtigkeit; 3 x Helligkeiten im Innern; Wetterstation (nicht operativ)	1 Stunde, Auslesung sporadisch
Strahlungsmessung Reflexion	Prototyp in Zusammenarbeit mit LEC Leutenegger	Einstrahlung der 3 Photozellen zur Messung des Reflexionsanteils	Auslesung sporadisch
mobiles Strahlungsmessgerät	Optec / HT 204	Transmission der Einstrahlung bei den 4 SunPattern-Gläsern	Messung sporadisch
Wasserzähler	GWF	Gesamtwasserverbrauch	1 Monat
Stromzähler	Landis + Gyr	Haushaltverbrauch / PV-Einspeisung	1 Monat

Tabelle 6: Eingesetzte Messgeräte und -Systeme

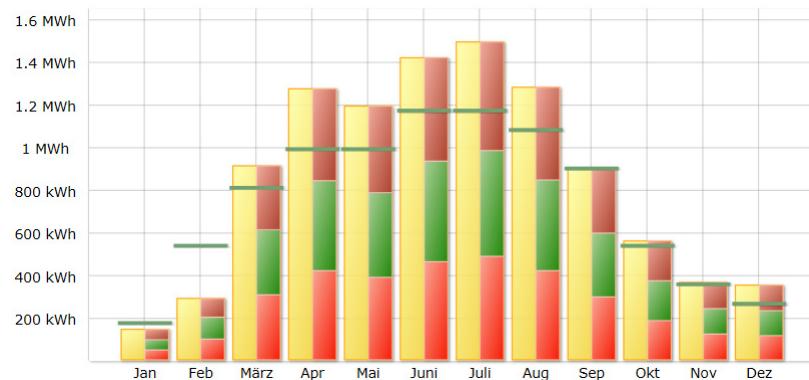
7.2 Strahlungsmessung

Aufgrund einer detaillierten und praktisch lückenlosen Strahlungsmessung ergibt sich ein genaues Bild über die klimatischen Bedingungen. Insbesondere Abweichungen von langjährigen Mittelwerten sind interessant, da die Simulationen auf solchen basieren. Die folgenden drei Grafiken zeigen die Jahre 2014 – 2016 (wovon 2016 ohne Dezember, November nur zur Hälfte):

2014:



2015:



2016:

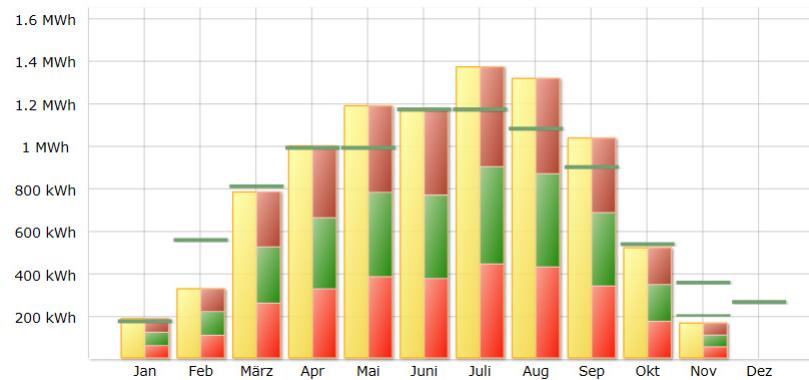


Abb.12: Monatlicher Verlauf der PV-Erträge über die Jahre 2014 – 2016. Die horizontalen grünen Linien zeigen die Erwartungswerte für den Ertrag (Standardwetterjahr). Die rote, grüne und braune Säule zeigen die Erträge des oberen, mittleren und unteren Strings. Das Jahr 2014 liegt um 11%, 2015 um 12% über dem Durchschnitt. 2016 liegt zurzeit im Durchschnitt.

Für die Beurteilung der thermischen Solarertrages, bzw. der Erforderlichen Zusatzenergie, sind aber nur die Wintermonate November – Februar relevant. Hier zeigen die Daten, dass die Einstrahlungssituation in allen drei Jahren unterdurchschnittlich war.

7.3 Technische Umsetzung: Betonkernaktivierung

Die Betonkernaktivierung in den beiden unteren Stockwerken wurde zwischen die beiden Armierungs-lagen platziert, im DG kommt eine Holz-Beton-Verbunddecke zum Einsatz, was in Kombination mit einer Kernaktivierung noch nicht oft realisiert wurde. Das folgende Bild zeigt die eingelegten Rohrleitungen, aufgelegt auf Abstandhaltern. Um den Zug vom Beton auf den Holzstapel zu übertragen, werden danach unzählige massive Schrauben schräg in das Holz getrieben und einbetoniert. Die Abfolge dieser Arbeitsschritte muss sorgfältig geplant sein.



Abb.13: Vorbereitung zum Betonieren der Holz-Beton-Verbunddecke: Der Unterbau besteht aus einem 12 cm dicken Brettstapel, der lediglich durch runde Querhölzer zusammengehalten wird. Beim Betonieren quillt das Holz auf, wodurch Ritzen verschlossen werden. Um Verformungen der Decke beim Betonieren zu vermeiden sollte der Brettstapel gespleist werden bis der Beton ausgehärtet ist. Die Betonlage wird 14 cm dick.

Nebst der statischen Zug-Druck-Funktion der Holz- und Betonlage übernehmen diese Bauteile hier mehrere weitere Funktionen: Der Beton dient als Wärmespeicher ($\rho_{\text{Beton}} * cp_{\text{Beton}} = 2'400 \text{ kJ/K/m}^3$) mit hoher Wärmeleitung ($\lambda_{\text{Beton}} = 2.3 \text{ W/m/K}$), das Holz ist teils Wärmespeicher ($\rho_{\text{Holz}} * cp_{\text{Holz}} = 1'380 \text{ kJ/K/m}^3$), teils Wärmedämmung ($\lambda_{\text{Holz}} = 0.12 \text{ W/m/K}$). Die sichtbare Holzdecke hat zudem eine ästhetische Funktion. Durch den abwechslungsweisen Versatz der Bretter im Brettstapel könnte der Raum auch akustisch positiv beeinflusst werden (leider hatten wir dies erst im Nachhinein realisiert).



Abb.14: Die Konterlattung vom flachen zum steilen Dachabschnitt sind so angelegt, dass eine zusammenhängende Hinterlüftung entsteht. Im flachen Teil erwärmt sich die Luft hinter den PV-Modulen. Die vorgewärmte Luft führt beim thermischen Kollektor zu höheren Erträgen. Durch den Kameneffekt wird stetig neue Luft angesaugt, welche die PV-Module kühlt und so dort ebenfalls eine Ertragssteigerung bewirkt. Auf der Vorderseite der Module entsteht zudem eine warme Luftsicht. Bei geringer Windgeschwindigkeit bewirkt diese eine weitere Erhöhung des solarthermischen Ertrages.



7.4 Speicher und Hydraulik

Das Herzstück der Anlage ist ein „Tank-in-Tank“-Speicher. Über ihn gehen sämtliche Energieflüsse:

- Er besitzt ein maximales Fassungsvermögen von 2'500 Litern
- Der innenliegende 250-Liter-Trinkwasser-Boiler befindet sich im oberen Teil des Energiespeichers. Ihm vorgelagert ist ein 2 m²-Wendel im unteren Teil zur Vorwärmung der Kaltwassers.
- Der Energiespeicher ist mit 2'000 Liter entmineralisiertem (Betriebs-)wasser gefüllt. Dasselbe Wasser strömt durch den Kessel, das Heizsystem und auch das Kollektorfeld.
- Die obersten 250 Liter des Speichers dienen als Expansions- und Drainback-Gefäß. Beim Start der Kollektorpumpe wird das Kollektorfeld befüllt (während 5 Minuten mit einer Zusatzpumpe). Sobald die Pumpe abstellt, läuft das Wasser aus dem Kollektorkreis zurück in den Speicher. Das Volumen ist mit Stickstoff gefüllt.
- Der Solarkreis übergibt die Wärme (ohne Wärmetauscher) an den Speicher. Über ein Ventil erfolgt die Beladung oben oder unten in den Speicher. Wasser hat gegenüber der Glykolkomposition zahlreiche Vorteile (Wärmeleitung, Wärmekapazität und Turbulenzgrad) und degradiert nicht.
- Der einzige glykolgeführte Kreis ist der Sitzplatzstrahler. Der Wärmetauscherwendel sitzt unten im Energiespeicher, nutzt also nur Solarwärme. Da der Strahler in der Pergola im Außenbereich liegt, muss hier ein Frostschutz vorhanden sein.
- Der Betonkern- und Wandheizkreis sind über eine ETA-Gruppe angeschlossen: die Wärme kann jeweils an drei Positionen entnommen und auf die gewünschte Vorlauftemperatur gebracht werden. Dadurch bleibt die Schichtung im Speicher sehr gut erhalten.
- Der Sauna-Konvektor ist im obersten Teil des Energiespeichers angeschlossen. Der Rücklauf führt (ohne Bypass) 30 cm unter dem Vorlauf wieder in den Speicher.

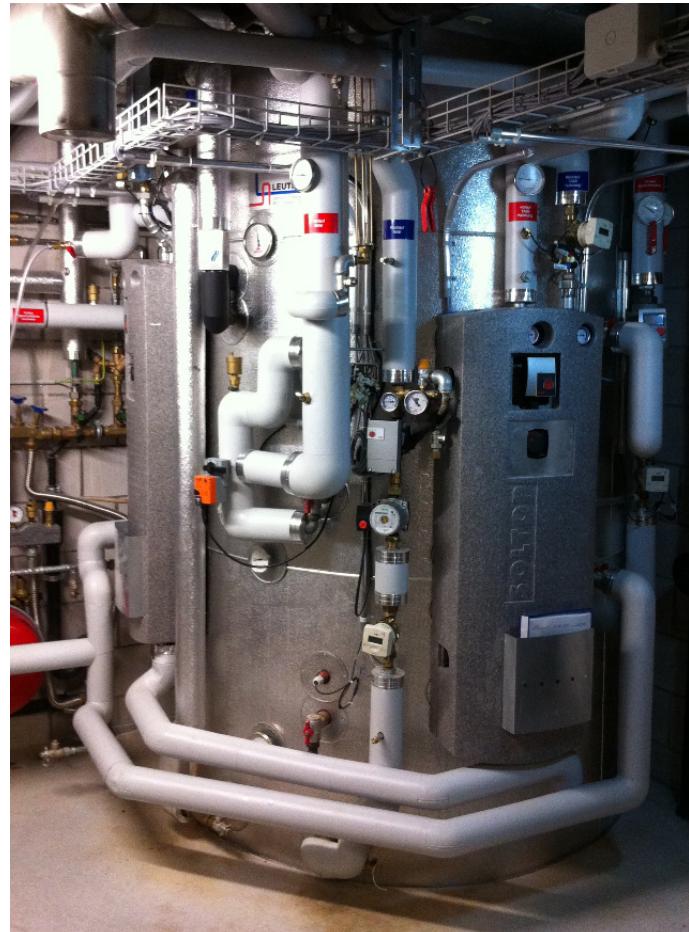


Abb.15: Tank-in-Tank-Speicher und Hydraulikanschlüsse des Speichers. Am Speicher sind 7 Kreisläufe (total 18 Stutzen) und 20 Messgeräte angeschlossen.

8. Ergebnisse

8.1 Hauptresultat: Der solarthermische Deckungsgrad SFi

Die zentrale Grösse, die die Gesamteffizienz aller getroffenen Massnahmen widerspiegelt, ist der solar(-thermische) Deckungsgrad: Wie viel Energie wird vom Solarkreis an den Speicher abgegeben im Vergleich zum gesamten, an den Speicher übertragenen Energie (Sonne und Pellet). Für diese Messung werden also genau zwei Wärmezähler benötigt.

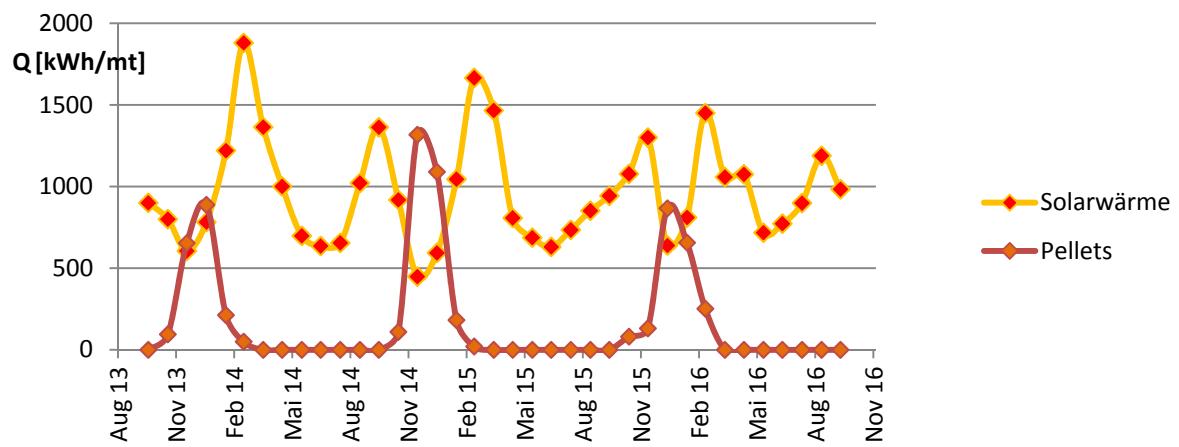


Abb.16: Verlauf der monatlichen Solarerträge und Pelletenergieabgabe an den Speicher seit Beginn der Messungen im Oktober 2013. Deutlich erkennbar sind die beiden Maxima beim Solarertrag, einmal im Frühling und einmal im Herbst: in dieser Zeit kann Wärme an das Haus (den Betonkern) abgegeben werden. Mit 500 – 600 kWh ist der monatliche Solarertrag im Winter etwa gleich gross wie im Sommer.

Der Solardeckungsgrad SFi (Solar Fraction input) über die drei Jahre zeigt folgendes Bild:

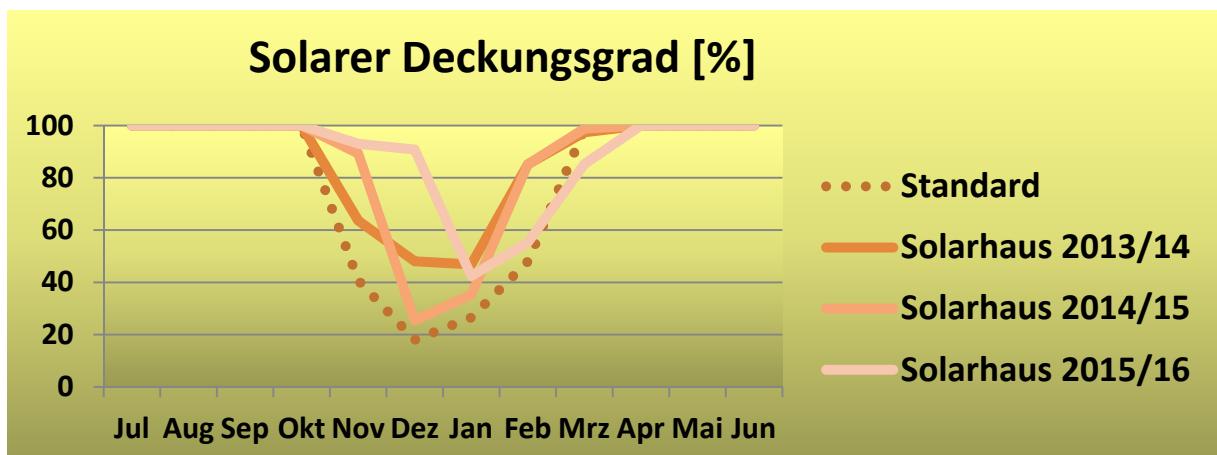


Abb.17: Verlauf des Solaren Deckungsgrades in einem Sommer-Sommer-Diagramm. Das Diagramm zeigt die vergangenen drei Winter und vergleicht diese mit dem Verlauf des Solardeckungsgrades ohne Betonkernspeicher und Spiegelungseffekte durch die PV-Anlage. Es ist gut erkennbar, dass der Solaranteil im Winter signifikant höher ist als beim Vergleichssystem.

8.2 Energieverbraucher

Über vier weitere Wärmezähler werden die Energieaufnahme von Betonkern, Wandheizung, Strahler und Konvektor, sowie der Warmwasserbezug in Liter gemessen und in kWh umgerechnet. Das nachfolgende Diagramm zeigt deutlich, dass der Betonkern nur ausserhalb der Sommermonate, d.h. von Oktober bis April, genutzt wird. Kleine Einträge treten aber auch im Mai und September auf, um die Raumtemperatur auf angenehmem Niveau zu halten. Falls es in dieser Zeit im Haus zu warm wird, sorgt der Bypass der Lüftung (Umgehung des Wärmetauschers) für die nötige Abkühlung.

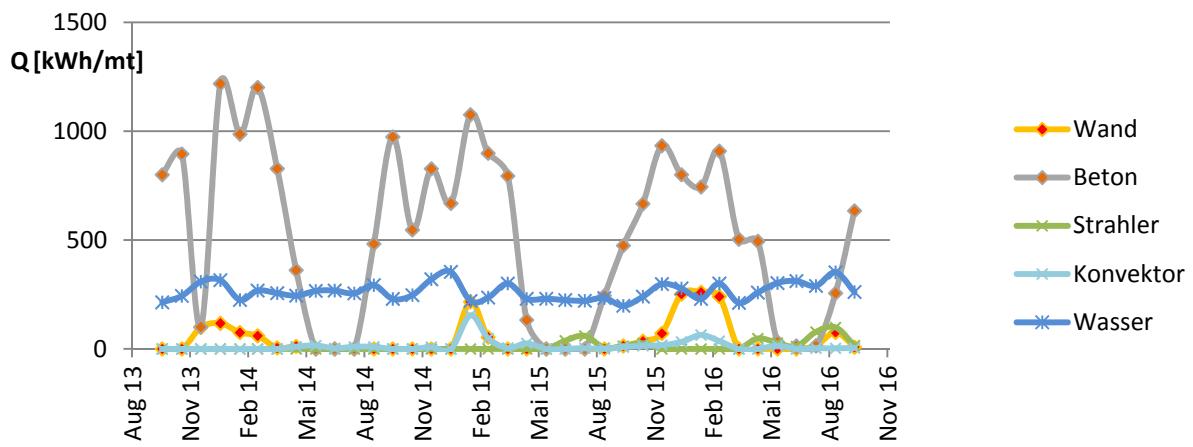


Abb.18: Verlauf der monatlichen Energieflüsse zur Wandheizung, zum Betonkern, Strahler (Sitzplatz) und Konvektor (Badezimmer), und Warmwasserbezug. Der Strahler stand ab Juli 2015 zur Verfügung, der Sitzplatz wurde aber erst im November 2015 fertiggestellt. Der Konvektor im Badezimmer ist seit April 2014 verfügbar. Da die Sauna aber noch nicht installiert ist, wird er zurzeit nur sporadisch als überdimensionierte Badezimmerheizung benutzt.

8.3 Solare Deckungsgrade

Der solarthermische Deckungsgrad wird anhand der Energieabgabe des Solar- und Kesselkreises an den Speicher berechnet. Im Zeitraum 01.11.2013 bis 31.10.2016 wurden 34'787 kWh Solarwärme und 6'605 kWh Pelletwärme an den Speicher abgegeben. Dies ergibt einen Solaranteil von 84.0%. Als Zusatzenergie waren 1'826 kg Pellets erforderlich. Die Solarstromproduktion in diesen drei Jahren betrug 29'700 kWh. Der Stromverbrauch 15'189 kWh. Dies Ergibt einen Produktionsanteil von 196%. Mithilfe der pauschalen KBOB-Daten [9] für Primärenergie und Treibhausgasemission beträgt der Verbrauch nicht-erneuerbare Primärenergie -7'850 kWh/a und eine THG-Emission von -565 kgCO_{2eq} pro Jahr.

8.4 SunPattern

Die ursprüngliche Idee, die gesamte opake Gebäudehülle mit SunPattern zu verglasen, wurde aufgrund der Kosten verworfen. Zu Demonstrationszwecken wären die Investitionen zu hoch gewesen, zumal SunPattern primär auf Bürogebäude und nicht auf Wohnbauten ausgerichtet ist. Dennoch ist das Konzept bei zwei Ost- und einem Westfenster zum Einsatz gekommen, sowie als Vordach auf der Südseite. Die Streifenmuster der Verglasung wurden individuell berechnet und durch die Firmen Galvolux und Glas Trösch realisiert.

SunPattern beim Vordach im Süden

Das Vordach im Süden besitzt eine doppelte Funktion: Zum einen bildet es einen gewissen Schutz vor Regen, zum andern soll im Sommer verhindert werden, dass Direktstrahlung in den Wohn-/Esszimmerbereich gelangt. Im Winter hingegen ist die Einstrahlung erwünscht. Genau diese saisonal selektive Transmission bietet SunPattern.

Abb. 19 und 23 zeigen, wie sich der Effekt von SunPattern optisch äußert. Indizien dafür sind die Intensität des Schattenwurfs und der Diffusstreuung. Die Änderungen beim Effekt sind allein jahreszeitlich bedingt, so wie es sich auch mit den Heiz- und Kühlbedürfnis verhält.

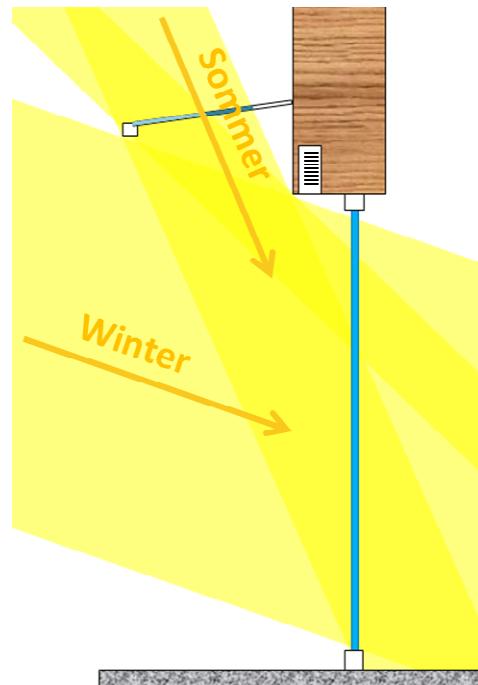


Abb.19: Einstrahlung auf der Südseite am 21. Dezember und 21. Juni, jeweils mittags. Im Winter hält das Vordach keine Einstrahlung ab. Im Sommer wird die Einstrahlung praktisch vollständig blockiert.



Abb.20: Schattenwurf an der südlichen Hausfassade am 21. März (links) und am 4. Mai. Im März beträgt die Transmission ca. 50% (roter Kreis) im Mai nur noch ca. 25%. Dafür wird die diffuse Streuung am Glas (oranger Kreis) deutlich intensiver. Am 21. Juni beträgt die Transmission sogar nur noch 2% der Sonneneinstrahlung.

Messung der Transmission am 23. Juni 2016

Kurz nach der Sommersonnenwende zeichnete sich ein wolkenloser Tag ab: Ideal, um die Wirkung von SunPattern im Südvorhang zu vermessen. Das Vorhang besteht aus 12 einzelnen Gläsern aus Verbundsicherheitsglas (VSG) mit 2 x 6 mm Stärke. Auf der Unterseite beider Gläser sind äquidistante Streifen angebracht. Diese sind so zueinander verschoben, dass sich bei Sonnenhöchststand die Streifen abwechseln und somit kein Licht durchlassen. Bei flacherem Sonnenstand fällt Lücke auf Lücke und 50% des Lichtes gelangen durch das Glas.

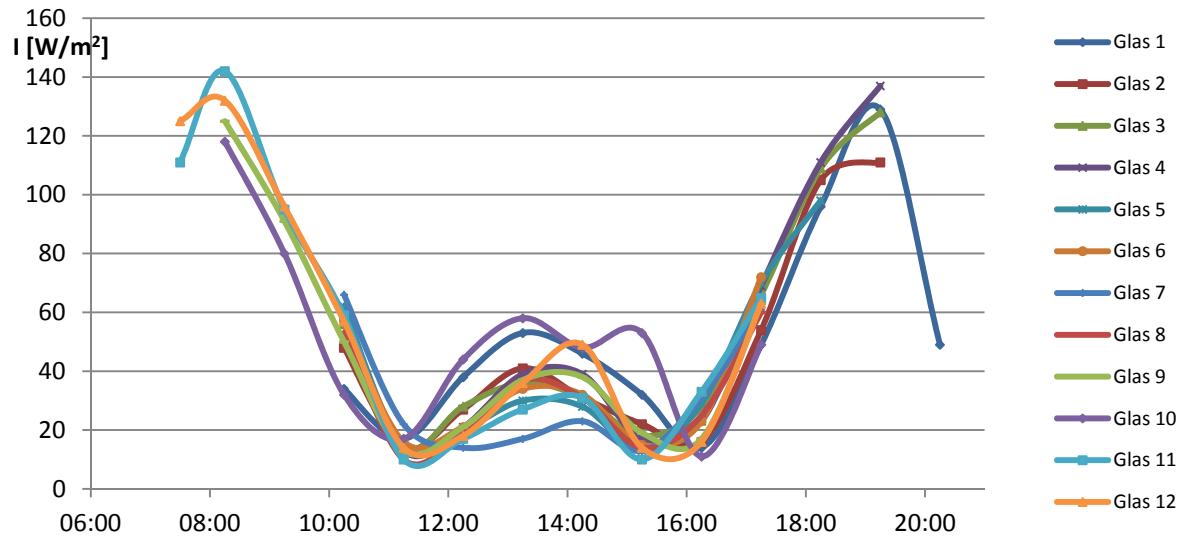


Abb.21: Intensität der direkten Sonneneinstrahlung durch die 12 Gläser des Südsvordaches. Je nach Schattenwurf des Hausdaches waren morgens oder abends einige Gläser nicht besonnt. Die 12 Gläser zeigen eine sehr hohe Synchronizität. Dies ist nicht selbstverständlich, da bereits Abweichungen von Millimeterbruchteilen beim Bedrucken und Verbinden der Gläser das Winkelverhalten beeinflusst.

Die Transmission der einzelnen Gläser kann zu einer Gesamttransmission addiert und mit der solaren Direktstrahlung verglichen werden. Dies ergibt folgenden Tagesverlauf:

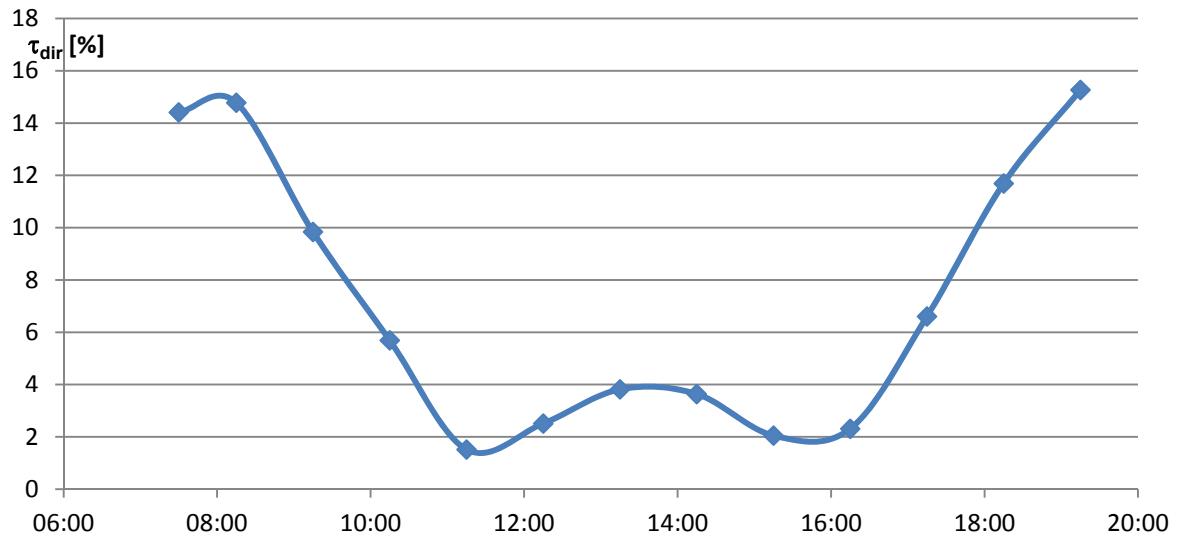
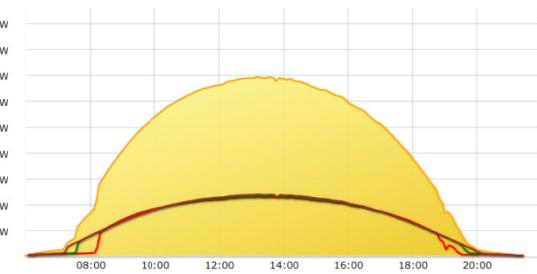


Abb.22: Transmission des Vordaches für solare Direktstrahlung: Da am Mittag die Sonneneinstrahlung am intensivsten ist, wirkt die hohe Absorption und Streuung der Einstrahlung durch das SunPattern-Glas besonders gut.



Abb.23: Rechts: Optische Wirkung von SunPattern im Gebäudeinnern: Die Sonne steht genau im Zenit. Die Ellipsen markieren die Bereiche von vier Vordachgläsern. Man erkennt, dass die Abschattung fast vollständig ist (vergleiche rote Ellipse) und bei allen Gläsern etwa die gleiche Intensität besteht. Der helle Lichtstreifen kommt von einem kleinen Berechnungsfehler bei der absoluten Position der Gläser.

Unten: Das Diagramm zeigt den PV-Ertrag vom 23.06.2016, an dem die Messungen vorgenommen wurden. Es handelte sich um einen der sonnigsten Tage. Die Direktstrahlung verlief von 819 W/m² um 7:30 h auf 979 um 14:15 h auf 715 um 20:15 h.



SunPattern beim Ost- und West-Fenster

SunPattern gibt es in vielen verschiedenen Variationen. Beim Südvor dach werden einfache, weisse Streifen verwendet. Bei den grossen Korridorfenstern Richtung Ost und West wird ein anderes Prinzip angewendet: spiegelnde und sandgestrahlte Streifen. Zudem ist die ganz andere Lage der Sonnenbahn bei diesen Orientierungen zu berücksichtigen, damit auch hier ein saisonaler und nicht ein tagszeitlicher Effekt auftritt. Das Prinzip funktioniert folgendermassen:

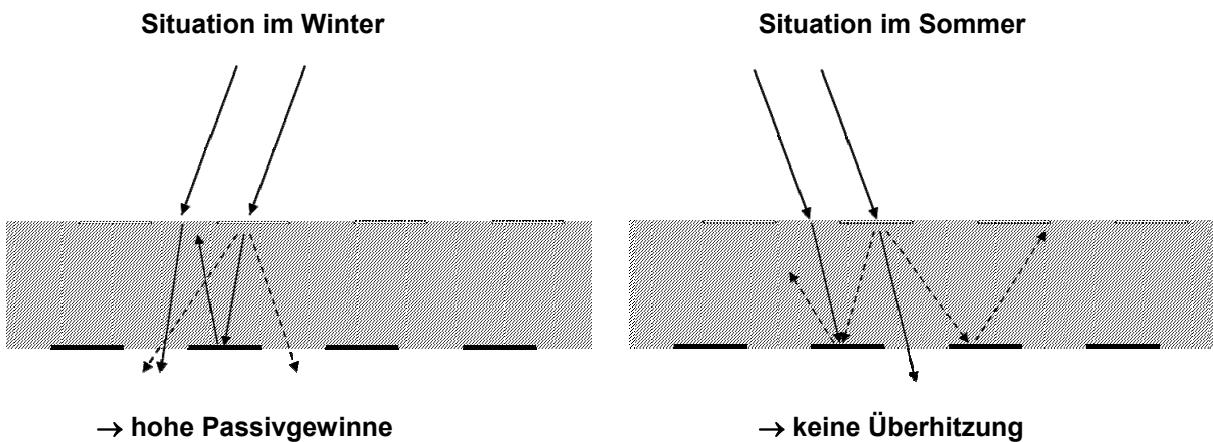


Abb.24: Links: Die Ausrichtung der Streifen auf den beiden Glasseiten ist so gewählt, dass die Sonneneinstrahlung im Verlauf der Sonne immer aus dieser Richtung kommt. Die sandgestrahlten Flächen auf der Glasaußenseite streuen das einfallende Licht und dieses wird teilweise an den Spiegel (Glasinnenseite) vorbeigestreut. Rechts: im Sommer wird das ungehindert eintretende Licht bei den Spiegeln reflektiert. Auch ein Teil des Lichtes, das auf den sandgestrahlten Teil fällt, wird zurückgeworfen.



Ansichten mit unterschiedlichem Blickwinkel



Abb.25: Fenster auf der Ostseite mit SunPattern (unterer Bereich). Das linke Bild zeigt eine Blickrichtung, bei der die äusseren, sandgestrahlten Streifen das Licht diffus streuen. Das rechte Bild zeigt an demselben Fenster eine Blickrichtung, bei der die Sandstrahlung durch die Spiegelstreifen verdeckt ist und die klaren Bereiche eine klare Durchsicht erlauben.



Abb.26: Je nach Einfallswinkel des Lichtes gelangt direktes Sonnenlicht zwischen den klaren Stellen des Glases hindurch (links) oder die sandgestrahlten und spiegelnden Streifen wechseln sich so ab, dass die Transmission von direktem Sonnenlicht um einen Faktor dreimal reduziert wird. Der Neigungswinkel, die Breite und der Versatz der Streifen werden je nach geografischer Breite und Orientierung des Fensters individuell optimiert und auf die Heiz-/Kühlbedürfnisse angestimmt.

8.5 Reflexion durch die Photovoltaik-Anlage

Zur Messung des Anteils an reflektierter Strahlung durch das Photovoltaik-Feld wurde in Zusammenarbeit mit der Firma LEC Leutenegger Energy Control ein neues Messgerät entwickelt, das in der Ebene der thermischen Kollektoren die folgenden drei Einstrahlungen misst:

1. Gesamthaft einfallende Strahlung (direkt + reflektiert)
2. Ausschliesslich direkte Strahlung (ohne PV-Reflexion)
3. Ausschliesslich vom Photovoltaik-Feld reflektierte Strahlung

An jeder Position sind 3 PV-Zellen platziert. Damit können Stör-effekte durch Verunreinigungen herausgefiltert werden.

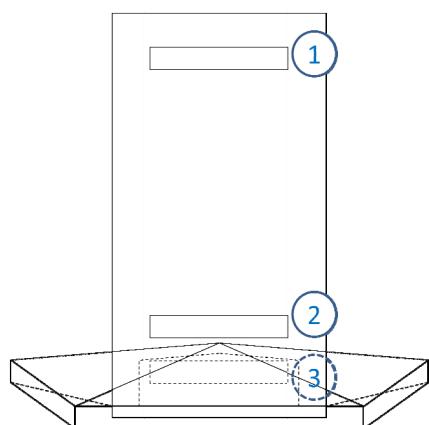




Abb.27: Messgerät zur Messung der direkten und der vom PV-Feld reflektierten Einstrahlung. Durch eine Blende werden die beiden Gesichtsfelder getrennt. Zellen am oberen Rand des Messgeräts messen die Gesamteinstrahlung. Das Messgerät befindet sich 50 cm über dem Photovoltaik-Feld, praktisch im Zentrum.

Ergebnisse der Einstrahlungsmessung vom 9. Februar 2015

Bei flachem Einstrahlungswinkel gegenüber dem PV-Feld wächst der Reflexionsanteil stark. Es ist aber zu bemerken, dass diese Momente nur kurz sind, wie in Abb. 27 erkennbar. Über den Tag gesehen ist der Reflexionsanteil geringer und liegt im Bereich 10 – 15%.

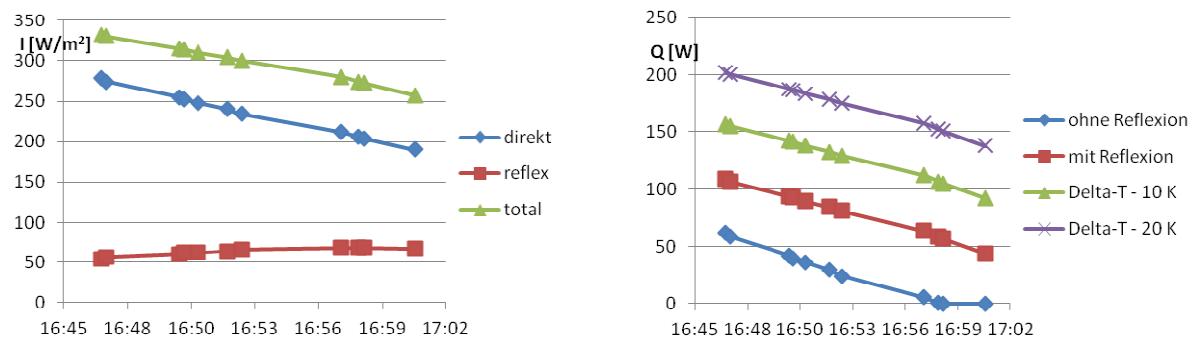


Abb.28: Das linke Diagramm zeigt die direkte, reflektierte und gesamte Einstrahlung kurz vor dem Sonnenuntergang. Das Verhältnis von reflektierter zur direkten Einstrahlung wächst dabei von 19% auf 35%, was gut mit den theoretischen Werten übereinstimmt. Im rechten Diagramm wird der resultierende Solaretrag für 4 Situationen berechnet: Ertrag ohne Reflexion, mit Reflexion und ohne Erwärmung der Luft um den Kollektor, sowie mit einer Erwärmung der Luft um 10 K und um 20 K.

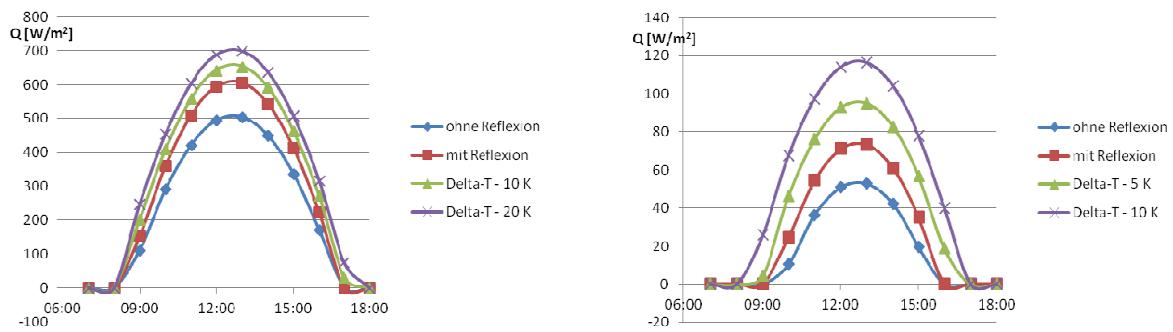


Abb.29: Erhöhung des Solarertrages an einem sonnigen Tag (links) und an einem bewölkten Tag (rechts). Nebst der Reflexion trägt auch die Abwärme des Photovoltaik-Feldes zu erhöhten Erträgen bei. Der relative Effekt ist bei schlechtem Wetter noch grösser. Es kann auch vorkommen, dass die Anlage ohne die Reflexion nicht laufen würde. Die absoluten Erträge fallen an solchen Tagen aber dennoch gering aus, im Vergleich zu einem sonnigen Tag.



8.6 Prädiktive Regelung

Bei der Planung des Gebäudekonzeptes erkannten wir rasch, dass der Betonkern thermisch sehr träge reagiert, und ein übermässiges Auskühlen vermieden werden sollte. Schliesslich soll der Betonkern als Speicher genutzt werden, und da er pro Kelvin etwa 50 kWh Wärme speichert (so viel wie das Haus im Auslegungsfall verbraucht), war eine Wärmespeicherung über ca. eine Woche das Ziel. Aufgrund der hohen Trägheit soll somit die Regelung dafür sorgen, dass mit ein paar Tagen Verzögerung das Gebäude genau die Energie erhält, die es benötigt.

Das ursprüngliche Konzept

Die ursprüngliche Idee war, die Aussentemperatur der kommenden 48 Stunden mithilfe von Wetterprognosen zu benutzen und damit die Vorlauftemperatur für den Betonkernkreis zu bestimmen. Aufgrund der Zeitverzögerung der Wärmeausbreitung würde dann der Betonkern zum richtigen Zeitpunkt die Räume erwärmen. Dieses Konzept löst aber gleich mehrere Probleme nicht:

- Die Einstrahlung kann der Regelung einen Strich durch die Rechnung machen: Oft korrelieren im Winter tiefe Temperaturen mit hoher Einstrahlung.
- Die Wärmeausbreitung vom Betonkern bis zu den Boden-/Deckenoberflächen kann nicht einfach durch eine Phasenverschiebung beschrieben werden. Es treten immer Vermischungen zwischen unterschiedlich hohen Temperaturen auf.
- Im Zeitpunkt, in dem Vorlaufwärme benötigt wird, ist diese im Speicher vielleicht gerade nicht verfügbar. In diesem Fall müsste die Zusatzheizung einspringen.
- Umgekehrt kann viel Wärme im Speicher sein, der Betonkern fordert aber keine Wärme an.
- Mit dem Konzept können keine kurzfristigen Einwirkungen auf das Raumklima vorgenommen werden.

Alternative Lösung und Erkenntnisse

Aus diesen Gründen wurde ein weiteres Heizkonzept entwickelt und installiert: Eine Wandheizung. Mit dieser lässt sich innerhalb weniger Minuten eine angenehme Wärmestrahlung erzeugen, und zwar spezifisch in den bewohnten Räumen. Bei Abwesenheit kann darauf verzichtet werden. Die Wandheizung kann deutlich kleiner dimensioniert werden als wenn das gesamte Gebäude so beheizt werden müsste. In unserem Fall wurde ein Drittel der sonst erforderlichen Fläche eingebaut.

Aus den Erfahrungen von drei Jahren konnten wir punkto prädiktive Regelung und Regelung der Betonkerns folgende Erkenntnisse machen:

- Passivhäuser mit einer gewissen thermischen Trägheit verhalten sich sehr „gutmütig“: Temperaturänderungen laufen sehr langsam ab (unter Auslegungsbedingungen um ca. -1 K pro Tag).
- Wir haben oft versucht, die Wetterprognosen manuell in die Regelung des Anlage einfließen zu lassen: Ein grosses Problem war dabei, dass bei unsicheren Wetterlagen die Prognosen nicht zu treffend waren: Schön bei Schlechtwetter-Ansage, schlecht bei Schönwetter-Ansage.
- Bei genügend Solarenergie in der Periode Oktober bis April kann getrost jede Kilowattstunde, die nicht für Warmwasser benötigt wird, in den Betonkern geladen werden.



- Es reicht aus, den Betonkernkreis anzustellen, wenn am Morgen die Sonne scheint: Bei einer Umwälzung von 1000 l/h lässt sich der Speicherbereich für die Heizung innert einer Stunde in den Betonkern verschieben. Der Betonkern lässt sich ebenso gut anhand der aktuellen Wetterlage bewirtschaften.
- Die Wandheizungen werden aufgrund des dazugehörigen Thermostaten automatisch aktiviert. Dies aber nur morgens und abends.
- Für (solaraktive) Passivhäuser genügt es, das Heizsystem auf eine Außentemperatur von -5°C auszulegen. Tiefere Außentemperaturen treten nur bei klaren Wetterverhältnissen auf und die Passivgewinne und Solarerträge reichen, um dies Wärmeverluste zu kompensieren.

8.7 Passivhauskonzepte

Die folgenden Bilder zeigen weitere Geräte und Gewerke, die die thermische Energie des Speichers nutzen und dadurch helfen, Strom einzusparen:



Abb. 30: Geschirrspüler (links) und Waschmaschine sind beide am Warmwasser angeschlossen. In einem Haushalt mit vier Kindern sind die Geräte praktisch täglich im Einsatz. Auch dann sollte darauf geachtet werden, dass die Geräte möglichst in der obersten Klasse des Energieetiketts sind.



Abb. 31: Am Heisswasserhahn mit Sicherheitsdrehknopf fliesst bis zu 95°C heißes Wasser direkt aus dem Speicher (nicht via den Verbrühungsschutz). Damit lassen sich Tees oder Suppen direkt ab dem Hahn zubereiten, Gläser für Konfitüren sterilisieren oder einfach Wasser fürs Kochen zapfen. Ca. 6 Monate im Jahr ist das Wasser über 90°C, weitere 3 Monate über 70°C.



Abb. 32: Konvektor im Badezimmer. An dieser Stelle ist eine Sauna geplant, wenn der Wickeltisch einmal nicht mehr gebraucht wird. Der Konvektor kommt aber schon jetzt zum heizen des Badezimmers oder Vorwärmen der Frotteewäsche (minutenweise) zum Einsatz.

Bei Messungen hat der Konvektor bei maximaler Speichertemperatur (95°C) ein Leistung von bis zu 15 kW abgegeben. Das ist doppelt so viel, wie das Haus im Auslegungsfall benötigt.

Ziel ist es, die Sauna alleine mit dem Konvektor beheizen zu können.



Abb. 33: Wärmestrahler in der Pergola. Im Sommer liefert die Solaranlage deutlich mehr Energie als benötigt wird. Aber auch im Sommerhalbjahr gibt es an Abenden oder verregneten Wochenenden Momente, wo zusätzliche Wärme willkommen ist.

Bei einer Messung mit einer Außentemperatur von 17 °C und 83 °C Vorlauftemperatur erzeugte der Strahler auf voller Stufe innert 10 Minuten eine Raumtemperatur von 27 °C, nach weiteren 10 Minuten von 33 °C. Die abgegebene Leistung betrug anfänglich 17 kW. Nach dem Ausschalten klang die Temperatur innert 2 Stunden wieder auf 22 °C ab.

Weitere umgesetzte Konzepte:

- Natürlicher Außenkühlenschrank: Da das gesamte UG gedämmt ist, treten im Keller kaum Temperaturen unter 20 °C auf. Um Getränke oder Lebensmittel kühn zu stellen, wurde im Waschküchenfenster ein Gestell eingerichtet und eine transparente Abdeckung mit Lüftungsgittern gegen den Schacht sorgt für eine gute Auskühlung während der Nacht. Im Sommer können so die Temperaturen konstant zwischen 15 – 20 °C gehalten werden, im Winter liegen sie dank der Abwärme des Fensters um 10 °C.
- Katzentüre beim Velokeller: Als Minergie-P-gerechte Katzentüre dient eine Schleuse mit 2 Türchen. Unser Kater hat sich daran gewöhnt.
- Aktivkohlefilter beim Küchenabzug: Damit lassen sich im Winter beträchtliche Wärmeverluste einsparen. Der Filter muss periodisch gereinigt und von Zeit zu Zeit erneuert werden.
- Entlüftungsstutzen für die Badezimmer: die Entlüftung geschieht über den Estrich.

8.8 Messung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit

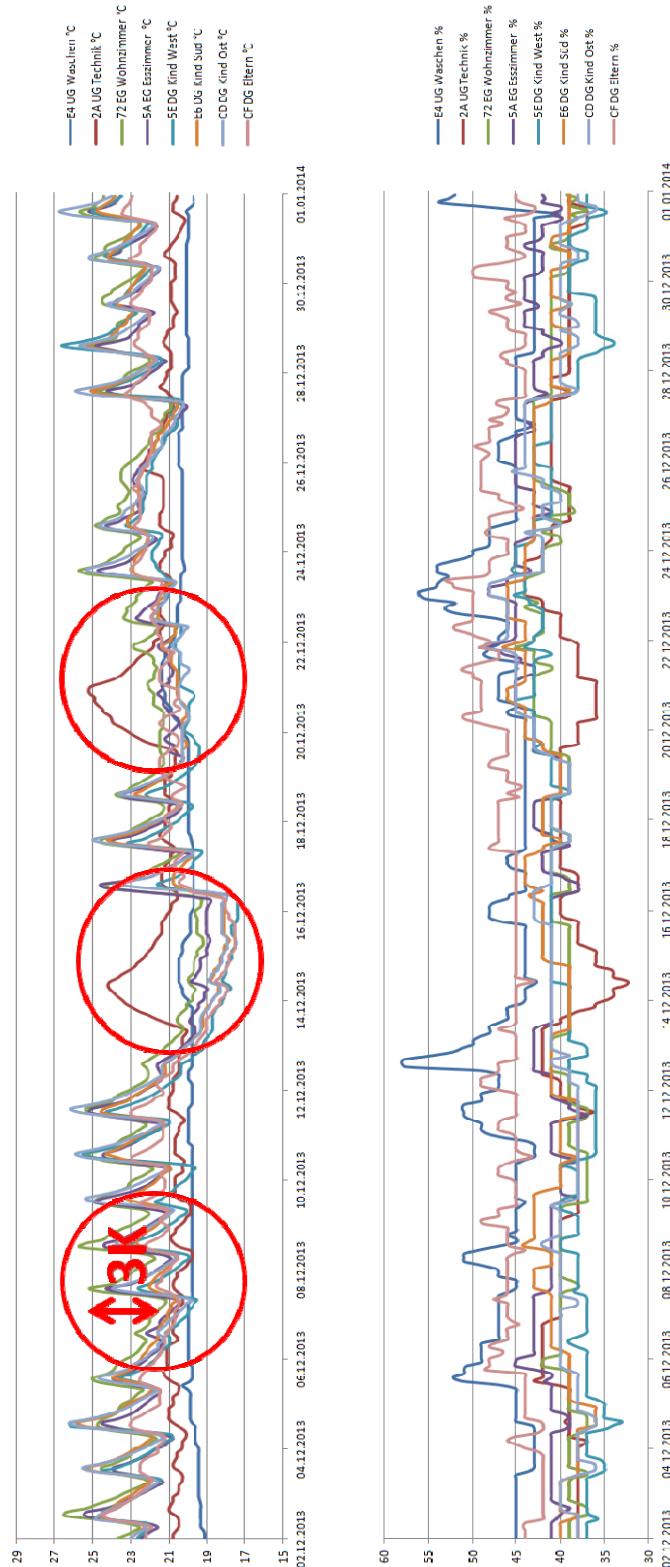


Abb. 34: Die beiden Grafiken zeigen den Temperatur und Feuchtigkeitsverlauf im Dezember 2013 in acht Räumen des Hauses. Dieser Dezember war überdurchschnittlich sonnig. Es ist erkennbar, dass bei voller Sonneneinstrahlung die Raumtemperaturen zwischen Tag und Nacht nur um 3 K variierten. Am 14./15.12. waren die Bewohner bei schlechtem Wetter abwesend und die Raumtemperatur sank um 2 K ab. Am 21./22.12. bei ebenfalls schlechtem Wetter waren die Bewohner anwesend und die Raumtemperaturen lagen wieder in er Komfortzone.

Die untere (rechte) Grafik zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit. Diese hielt sich in der bewohnten Räumen in allen drei Winter konstant bei 40 – 45%. Durch die etwas andere Benutzung des Büros (kein Kochen, Duschen, weniger Personen/Präsenzzeiten) sank dort die Luftfeuchtigkeit auf 35 – 40%.



8.9 Photovoltaik-Erträge

Mithilfe des SolarLog konnte eine bisher praktisch lückenlose Messreihe der PV-Erträge und somit auch der Einstrahlungssituation erstellt werden. Hier sollten ein paar Besonderheiten bei den Messungen zusammengefasst und erläutert werden.

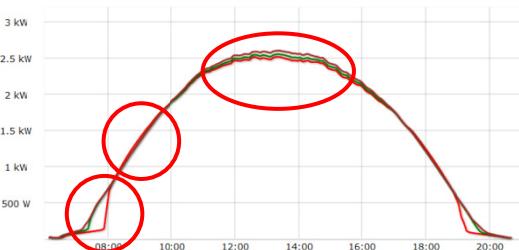
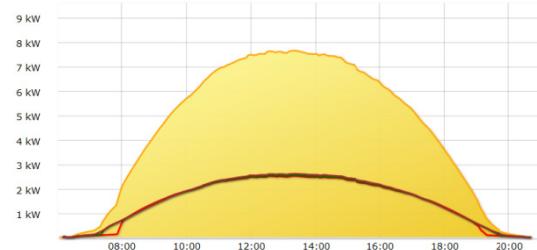


Abb. 35: Der 5.5.2016 war mit 64.97 kWh der bisher ertragreichste Tag. Ein wolkenloser Himmel und relativ kühle Außentemperaturen haben dazu beigetragen. Das rechte Bild zeigt die Beiträge der drei Wechselrichter (rot: oben, grün: Mitte, braun: unten). 1. Kreis: der oberste Streifen wird durch den Kollektor noch teilweise beschattet. 2. Kreis: durch Reflexion am Kollektor ist der Ertrag auf dem obersten Streifen am höchsten. 3. Kreis: durch die hohen Modultemperaturen sinkt der Ertrag von oben nach unten.

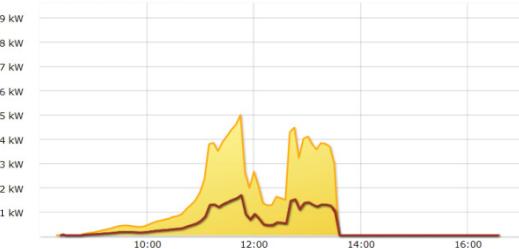
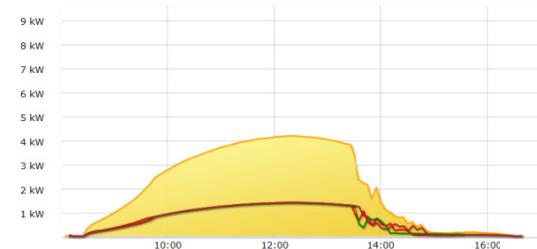


Abb. 36: 16.12.2013: Schatten eines Baumes im Nachbargarten, welcher während 6 Monaten im Jahr den Ertrag leicht reduziert. 18.12.2013: Abrupter Schneefall um 13:30 h.

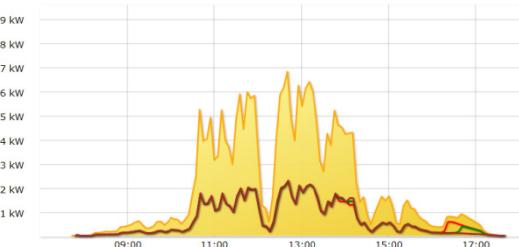
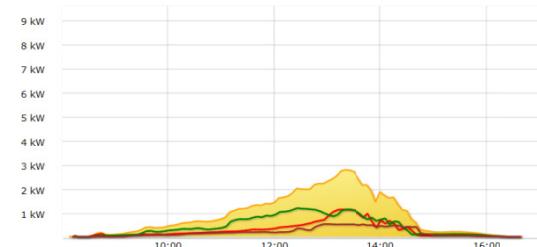


Abb. 37: 27.12.2013: Schnee des Vortages rutscht langsam ab. 9.2.2014: wechselhaftes Wetter.

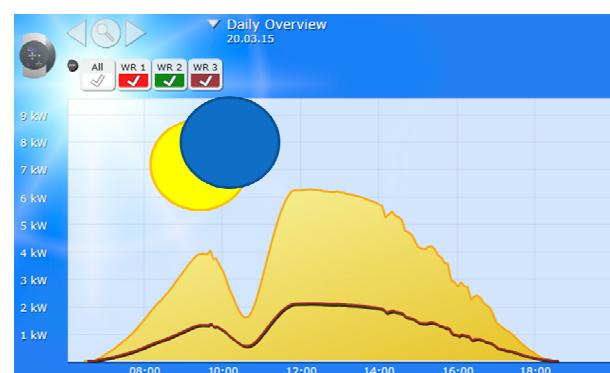


Abb. 38: 20.03.2015: Ein seltenes Ereignis: eine partielle Sonnenfinsternis, die sich bei perfektem Sonnenschein ereignete. Von Auge war das Ereignis nicht sehr intensiv wahrnehmbar, der Solarertrag registrierte die partielle Abdeckung der Sonnenscheibe sehr deutlich.



9. Schlussfolgerungen

Das Prinzip des Betonkerns als Solarspeicher hat sich nach unseren Erfahrungen sehr bewährt. Als Wärmespeicher auf Wochenbasis lässt er sich bei einem Neubau gut jedes Heizkonzept integrieren. Die Regelbarkeit ist gut, der Komfort ebenfalls. Wenn man die Kerntemperatur nicht zu weit absinken lässt, könnte auch auf eine Zweitheizung (wie die Wandheizung bei uns) verzichtet werden. Dafür büsst man dadurch etwas an Wärmespeicherkapazität ein.

Alternativ zum Betonkern können auch andere Wärmespeicher wie eine mit dem Betonboden thermisch gekoppelte Fussbodenheizung, oder ein aktivierbares Steinbett im Fundament des Gebäudes in Betracht gezogen werden. Die zusätzliche Graue Energie, die eine Betonkernaktivierung erfordert, sollte bei den Erwägungen berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist ein Leichtbau sehr viel ökologischer als ein Massivbau.

Die zentrale Voraussetzung für hohe Solardeckungsgrad ist aber mit Sicherheit der effiziente Umgang mit der Energie: ein hoher Dämmstandard und ein sparsames Warmwassersystem sind wichtig.

Der Nutzen einer prädiktiven Regelung ist für ein solaraktives Minergie-P-Gebäude nicht gegeben.

Die Optimierung des solarthermischen Ertrages im Winter ist kostenaufwändig. Auch hier sollten Aufwand und Nutzen schon beim Vorprojekt überschlagsmäßig abgeschätzt werden.

Alternativ zur Solarthermie kann auch der Einsatz von Photovoltaik mit einer Wärmepumpe in Betracht gezogen werden, auch in Kombination mit dem Betonkern. Diese Variante hat aber zur Solarthermie einen grundlegenden Unterschied: Der Umgang mit dem Strom wird immer haushälterisch sein. Statt eines Überschusses wird man (wohl auch in Zukunft) ins Netz einspeisen. Der „Wärmeüberschuss“ hat aber seine positiven Seiten, indem er Anwendungen ermöglicht, die sonst so nicht möglich wären.



10. Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

10.1 Erhöhung des Verbrauchs

Eine Erhöhung des Verbrauchs scheint keine sehr ökologische Strategie zu sein. Im vorliegenden Fall verhält es sich aber in der Tat anders: Die thermische Solaranlage liefert während ca. 8 Monaten mehr Energie, als gebraucht wird. Diese kann auf verschiedene Weise genutzt werden:

- Deckenstrahler (Pergola) wurde erst kürzlich fertiggestellt. Wird künftig deutlich öfter gebraucht.
- Sauna-Konvektor: wird erst richtig gebraucht, wenn die Sauna erstellt ist.
- Warmwasser: der Verbrauch liegt bei knapp 150 l/d. Wenn die Kinder etwas grösser sind, werden diese voraussichtlich mehr Warmwasser verbrauchen.

Die Grössenordnung dieses Mehrverbrauchs dürfte bei ca. 4'000 kWh/a liegen. Etwa 80% davon sollte sich über die Solaranlage abdecken lassen. Der Solardeckungsgrad dürfte also dadurch weder positiv noch negativ beeinträchtigt werden.

10.2 Erhöhung der Effizienz

Anhand der detaillierten Analysen über drei Jahre konnten verschiedene Beobachtungen gemacht werden, die zu einer Verbesserung der Effizienz führen könnten:

- Die Speicherverluste sind relativ hoch, insbesondere im Sommer aufgrund der hohen Speichertemperaturen. Hier wird eine Verbesserung der Speicherwärmung evaluiert.
- Der Wirkungsgrad des Pelletkessels liegt unter den Erwartungen. Hier können womöglich Verbesserungen vorgenommen werden.
- Der Haushaltstromverbrauch liegt trotz sparsamster Geräte und Lampen über den Erwartungen. Hier sollen Messungen Klarheit schaffen, wo die grossen Energiefresser sind.

Eine Verbesserung in diesen Bereichen würden einen erhöhten Solardeckungsgrad und einen geringeren Pelletverbrauch zur Folge haben

10.3 Verbesserte Regelung

Mit der Fertigstellung der Anlage werden auch die Steuerungen nochmals überarbeitet. Hier gibt es Potential für kleine Effizienzverbesserungen.

Insgesamt sollte es also möglich sein, den Solarertrag noch weiter zu steigern und den Pellet- und Stromverbrauch zu verringern. Die Optimierung der Energieflüsse geht weiter.

11. Anhang

Beispiel: SunPattern bei einem Bürogebäude

Anhand eines Bürogebäudes in Schweizer Mittelland mit durchschnittlichen internen Last und thermischer Masse haben wir untersucht, wie weit *SunPattern* das Kühlsystem entlasten könnte. Die folgende Grafik zeigt den Kühlenergiebedarf über die Sommermonate:

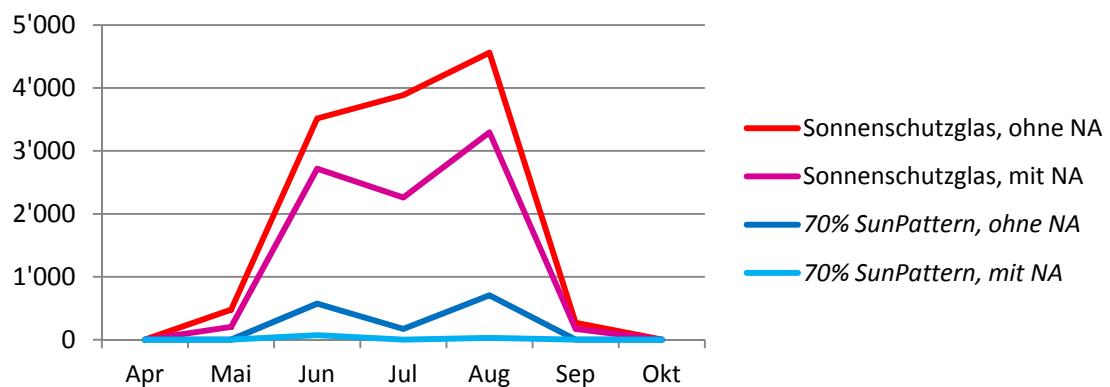


Abb. 39: Kühlenergiebedarf in kWh pro Monat im Sommerhalbjahr bei Verwendung von Sonnenschutzglas oder 70%-SunPattern mit und ohne Nachtauskühlung (NA). Dank SunPattern kann auf ein aktives Kühsystem vollständig verzichtet werden.

Ohne dass dies bisher erwähnt worden wäre, ist der Heizenergiebedarf für alle gerechneten Fälle immer gleich gross. D.h. die Verringerung des Kühlbedarfs geht nicht auf Kosten der Passivgewinne im Winter. Dies ist auch deutlich im folgenden Diagramm zu erkennen:

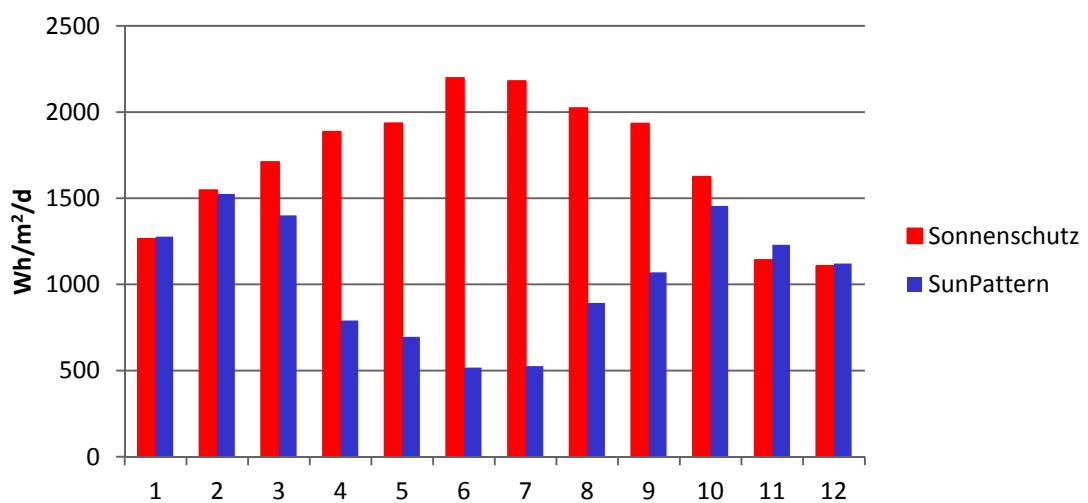


Abb. 40: Passivgewinne im gerechneten Beispiel jeweils an einen sonnigen Tag für jeden Monat, für Sonnenschutzglas und SunPattern.

In der Grafik zeigt deutlich, dass die mittleren Passivgewinne im Winter bei SunPattern genau so hoch sind, wie beim Sonnenschutzglas, im Sommer aber nur etwa 30% davon.



12. Referenzen

- [1] www.sonnenendach.ch, Bundesamt für Energie, 2016.
- [2] Stephan A. Mathez, Walter Sachs: Winkel Selektive Einstrahlungsdämmung an einer Gebäudehülle, 33 Seiten, EP-Patentanmeldung 11 17 0686.7, 2011.
- [3] Stephan A. Mathez, Walter Sachs: Glazing Structures With a Maximum Seasonal Contrast Ratio And the Simulation of Such Building Envelopes, Proceedings, CISBAT, International Conference, EPFL Lausanne, 2011.
- [4] Stefan Brunold (Institut für Solartechnik SPF), Stephan A. Mathez (Solar Campus GmbH): Simulation und Optimierung von Reflektoren für heizungsunterstützende Solarsysteme, 11886.1 INNO-IW KTI-Innovationscheck, 2011.
- [5] Stephan A. Mathez, Optimierung der Einstrahlung durch adaptive Anordnung bzw. Nachführung mit dem Simulations-Framework Tachion, Proceedings, OTTI, 20. Symposium Thermische Solarenergie, Seite 434-439, 2010.
- [6] Stephan A. Mathez, Synergie-Effekte zwischen Solarthermie, Photovoltaik und Solararchitektur mit Hilfe des Simulationsframeworks Tachion modellieren und sichtbar machen, Proceedings, OTTI, 22. Symposium Thermische Solarenergie, 2012.
- [7] Stephan A. Mathez, Optimized Building Geometry for Photovoltaic and Solar Thermal Fields to Obtain Maximum Seasonal Yields, Proceedings, CISBAT, International Conference, EPFL Lausanne, 2013.
- [8] www.energieschweiz.ch/solarrechner, Bundesamt für Energie, 2014.
- [9] KBOB – eco-bau – IPB, Ökobilanzdaten im Baubereich, 2009/1:2014.

13. Danksagung

Dem BFE und insbesondere Herrn Dr. Charles Filleux, Herrn Rolf Moser und Frau Yasmine Calises möchte ich für Ihr Vertrauen herzlich danken und anmerken, dass das Projekt ohne diese Unterstützung in der vorliegenden Form nicht realisiert worden wäre.