



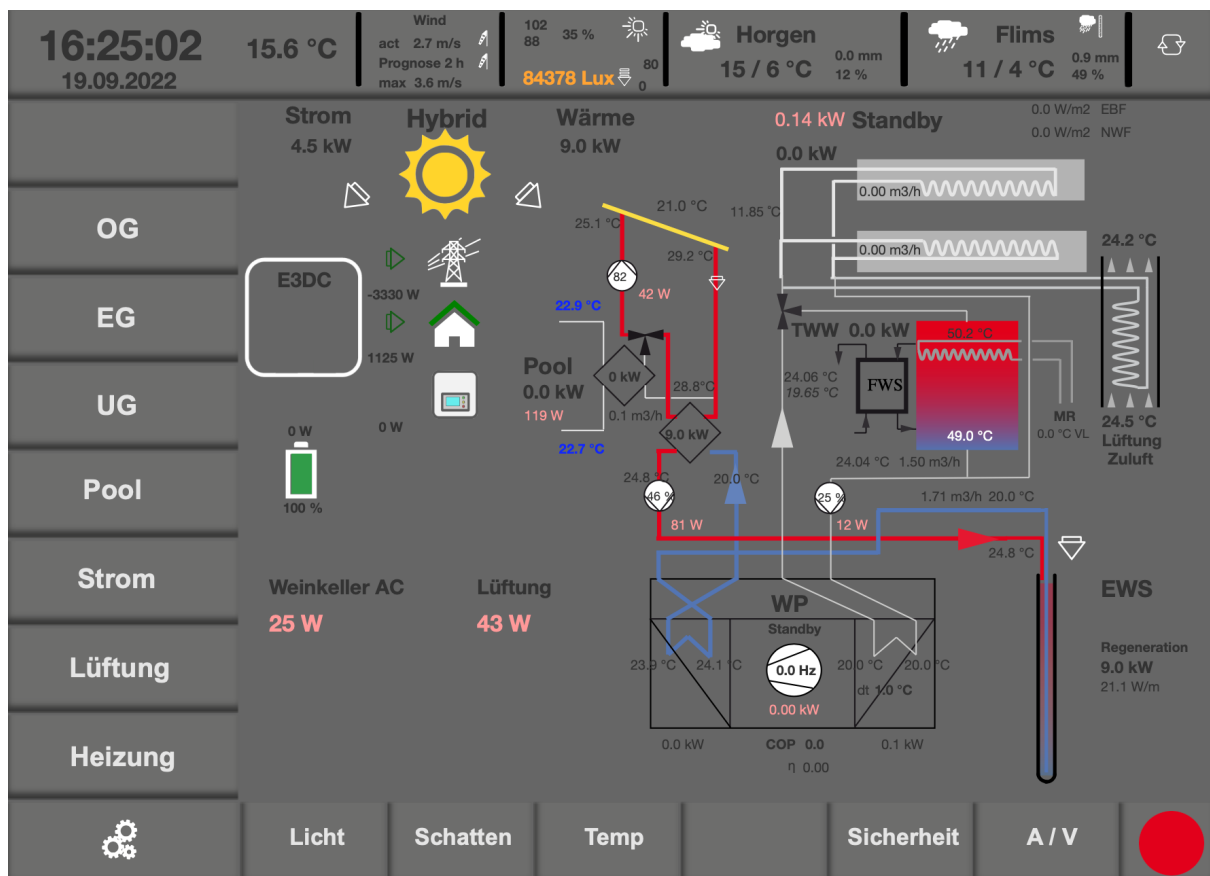
Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser,
Energie und Luft

Schlussbericht, 19.9. 2022

Erfolgskontrolle zum Pilotprojekt

2SOL EFH Ersatzneubau, Plattenstrasse 11, Horgen

PP 20-05 / BD00029040



Subventionsgeberin:
Kanton Zürich Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Abteilung Energie
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich



**Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser,
Energie und Luft**

Subventionsempfänger:
Isabelle Tiebout/Christian Binggeli
Plattenstrasse 11
8810 Horgen

Fachplaner:
OLOS AG, Baar, Jens Schielke
Begleitung des Projekts:
BS2 AG, Schlieren

Autor:
Ch. Binggeli

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

<i>Zusammenfassung.....</i>	<i>4</i>
<i>Einleitung.....</i>	<i>5</i>
<i>Ziele</i>	<i>5</i>
<i>Grundlagen.....</i>	<i>6</i>
Eckdaten des Projektes	6
Gebäude	7
<i>Methoden</i>	<i>11</i>
Datenakquisition	11
Datenprozessierung	13
Berechnungen	13
<i>Resultate.....</i>	<i>15</i>
Jahresbilanz	15
Monatsbilanzen	16
<i>Diskussion.....</i>	<i>21</i>
<i>Schlussfolgerungen.....</i>	<i>23</i>
<i>Referenzen.....</i>	<i>24</i>
<i>Glossar.....</i>	<i>25</i>
<i>Anhang.....</i>	<i>26</i>

Zusammenfassung

Hintergrund

Das 2SOL ZeroEmission-Low-Ex Konzept wurde mit dem Ziel vorgestellt, Gebäude CO₂-frei und mit wenig Exergiebedarf betreiben zu können. Nachdem es in Mehrfamilienhäusern erfolgreich erprobt worden ist, wurde es für die Anwendung in einem Einfamilienhaus weiter vereinfacht. Die Umsetzung erfolgt mit weitgehend vorhandener Technologie. Das System basiert darauf, dass auch in unseren Breitengraden übers ganze Jahr gesehen auf einem Grundstück mehr Sonnenenergie zur Verfügung steht, als verbraucht wird, allerdings tageszeitlich und saisonal sehr unterschiedlich.

Ziele des Projekts waren die Anwendung des obigen Konzepts in einem Einfamilienhaus mit Demonstration eines COP (coefficient of performance) der Wärmepumpe von > 7.5 im Heizbetrieb an den kältesten Tagen, eine komplette thermische Regeneration der Sonde und eine ausgeglichene elektrische Energiebilanz für das ganze Haus über die Messperiode.

Methoden

Im vorliegenden Projekt dient eine konventionelle, 420 m tiefe Doppel-U-Wärmesonde als geothermale Quelle für eine Niederhub-Wärmepumpe. Ein Hybridkollektor auf dem Dach erzeugt den Strom fürs Gebäude und Wärme, welche im Sommer in der Sonde saisonal gespeichert wird und mit der das Schwimmbad erwärmt werden kann. Der Strom wird für die Nacht in einer Batterie gespeichert. Fussboden- und Deckenregister nehmen im Sommer überschüssige Wärme im Gebäude auf und geben diese über die Wärmepumpe an die Sonde ab (aktive Gebäudekühlung zur Sondenregeneration) und sind im Winter Niedertemperatur-Heizsystem. Die Luftversorgung übernimmt eine CO₂-geführte Lüftung mit Wärmetauscher. Für die Auswertung wurden Massenströme, Temperaturen vor und nach Wärmeübertragung und elektrische Verbraucher gemessen und in einem Messsystem gespeichert.

Resultate

Der COP betrug über die Heizperiode 8.8, die Arbeitszahl 7.6 und am kältesten Tag 7.8 bzw. 6.9. Die thermische Regeneration der Sonde war mit 84 % nicht ganz vollständig. Gründe dafür sind der geringere thermische Ertrag des Hybridkollektors im Alltag, als unter Laborbedingungen und die Verwendung von Wärme für das Schwimmbad. Der elektrische Ertrag der Anlage betrug 13827 kWh, (87 %) des Jahresverbrauchs von 15918 kWh. Der Bedarf an Exergie für die Wärmeerzeugung war geringer als projiziert, der Stromverbrauch des Hauses deutlich höher.

Schlussfolgerung

Die Anwendung des Konzepts in dieser vereinfachten Form zeigt, dass es auch in einem Einfamilienhaus funktioniert und zur erwarteten, hohen Effizienz der Wärmeerzeugung führt. Wie bei vorigen Projekten ist der thermische Ertrag des Hybridkollektors geringer als erwartet. Der allgemeine Stromverbrauch des Hauses war deutlich höher als erwartet und die elektrische Bilanz damit nicht ganz ausgeglichen. Die übrige Gebäudetechnik ist dabei ein wesentlicher Stromverbraucher.

Einleitung

Das 2Sol Konzept wurde bereits vor diesem Projekt in mehreren Mehrfamilienhäusern erfolgreich angewendet. Die dort gewonnenen Erkenntnisse resultierten in einer Vereinfachung des ursprünglichen Konzeptes. Das Ziel des vorliegenden Projektes war eine erste Anwendung der Technologie in einem Einfamilienhaus. Dazu wurde das System weiter vereinfacht und so skaliert, dass es zum geringeren Wärmebedarf eines Einfamilienhauses passte.

Das System basiert auf der Tatsache, dass auch in unseren Breitengraden deutlich mehr Sonnenenergie auf einem Grundstück «geerntet» werden kann, als übers Jahr zum Heizen benötigt wird. Damit kann auch bei gut oder durchschnittlich gedämmten Gebäuden eine sehr gute Energiebilanz mit einem niedrigen Anteil von Exergie erreicht werden. Damit der Anteil Exergie auch an den kältesten Tagen des Jahres niedrig bleibt, muss der Temperaturhub insbesondere in dieser Periode klein bleiben, was bedeutet, dass die Quelltemperatur hoch und die notwendige Temperatur auf der Wärmeabgabeseite klein bleiben muss («low temperature heating»). Das bedingt eine Wärmequelle, welche auch nach Jahren hohe Temperaturen liefern kann. Weil der Wärmefluss im Erdreich sehr träge erfolgt, beinhaltet das Konzept eine Regeneration der Erdwärmesonde im Sommer durch Hybridpanels, wodurch gleichbleibend hohe Quelltemperaturen über die Jahre zu erwarten sind. Die Abgabeseite benötigt grosse Flächen.

Das System basiert dabei zu einem grossen Teil auf vorhandener Technologie. Erdwärmesonden, Wärmepumpen, Wärmekollektoren in Verbindung mit einer Photovoltaikanlage existieren. Für das Projekt war ursprünglich eine neuartige Membran – Erdwärmesonde geplant. Diese hätte mehrere Vorteile gegenüber den meist verwendeten Doppel-U Sonden. Die Wärmeübertragung durch die Membran ist besser als durch die wesentlich dickeren Kunststoffwände, der thermische Kurzschluss ist geringer wegen des isolierten Zentralrohres und durch die Flussumkehr im Sommer und der hydraulische Widerstand ist geringer. Da die Membran – Erdwärmesonde 4 Jahre nach Fertigstellung des Gebäudes nicht marktreif entwickelt werden konnte, entschied sich die Bauherrschaft für den Einbau einer konventionellen Doppel – U Sonde in die ursprünglich geplante Tiefe.

Ziele

- Umsetzung eines 2Sol Systems in einem Einfamilienhaus
- COP (Coefficient of performance) > 7.5 für Heizbetrieb an den kältesten Tagen
- Komplette thermische Regeneration der EWS in der Jahresbilanz
- Ausgeglichene Energiebilanz (Produktion PV-T Anlage minus Stromverbrauch des Hauses inklusive Heizen und Warmwasser = 0) übers Jahr

Grundlagen

Eckdaten des Projektes

Annahmen vor Ausarbeitung der Pläne

Energiebezugsfläche: ca. 370 m²

Turbokompressor Wärmepumpe zur Erzeugung des Heizwassers

COP Heizen ≥ 7.5

Zweistufige Warmwassererzeugung (Warmwasser aus Rücklauf Bodenheizung)
COP zweite Stufe > 6.0

Quellentemperatur > 10 Grad C an kältesten Tagen

Heizwärmebedarf: 14060 kWh/a, 38 kWh/m² Wohnfläche (Schätzung vor Wärmeschutznachweis)

Warmwasserbedarf: 4000 kWh/a

Strombedarf Bewohner/Haustechnik ohne Heizen/Warmwasser: 7000 kWh/a

PV-T Anlage, ca. 70 m² Fläche:

Jahresertrag Strom: 11-12'000 kWh/a Strom

Jahresertrag Wärme: 33-36'000 kWh Wärme

Erdwärmesonde 420 m, Membran – EWS, Betrieb mit Wasser

Daten gemäss Projektierung und Energienachweis

Energiebezugsfläche: 475 m²

Heizwärmebedarf: 26780 kWh/a

Warmwasserbedarf: 6597 kWh/a

PVT Anlage 68 m² Hybrid (Meyer Burger Hybrid 290 Wp:

Jahresertrag Strom: 11570 kWh/a

Jahresertrag Wärme: 39220 kWh/a

Wechselrichter/Batteriespeichersystem: E3DC S10Pro mit 29.25 kWh nutzbarer Kapazität

Einstufige Warmwassererzeugung

BS2 Wärmepumpe NHWP 6-20U (ohne Turbokompressor), Umschaltventil für hydraulische Umschaltung für Kühlbetrieb/Regeneration EWS

Erdwärmesonde: 420 m 2U Sonde, Jansen Hipress, Jansen AG, CH

Gebäude

Wärme – und Kälteversorgung

Das Haus verfügt über eine BS2 Niederhub-Wärmepumpe (BS2 NHWP 6-20U) mit einer Heizleistung von 17.2 kW bei einer Leistungsaufnahme von 2.4 kW (W10/W30). Anders, als ursprünglich beabsichtigt, wird eine einzelne Wärmepumpe für die Heizwasserbereitstellung und für die Warmwasserbereitstellung verwendet. Als Wärmequelle wird eine 420 m lange, konventionelle Doppel U Sonde verwendet, hinterfüllt mit einem thermisch verbesserten Material. Ursprünglich war die Verwendung einer koaxialen Membran Erdwärmesonde geplant, welche vier Jahre nach Fertigstellung des Hauses nicht marktreif entwickelt war (Schwierigkeiten beim Einbau, sehr hohe Kosten). Die Temperatur des Erdreichs liegt im Bereich der Sonde zwischen 10 und 22 °C. Damit ist es möglich, die Sonde mit reinem Wasser zu betreiben. Da die ursprünglich geplante Sonde diffusionsoffen gewesen wäre, wurde die gesamte Heizanlage mit korrosionshemmenden Materialien ausgeführt. Bei der Sondenlänge wurde eine Reserve eingeplant, da im Demonstrationsprojekt B35 gezeigt wurde, dass aufgrund von thermischen Kurzschlüssen nicht ganz die erwarteten Quellentemperaturen erzielt werden konnten ⁽¹⁾. Die Kreisläufe der Quelle und Abgabeseite sind nicht systemgetrennt und teilen das Expansionsgefäss. Beim Umschalten vom Kühlbetrieb auf Warmwasserbereitung bzw. auf Heizbetrieb findet jeweils ein geringer Wasseraustausch vom einen in den andern Kreislauf statt. Das Dach ist mit einer Hybridkollektoranlage ausgestattet, bei welcher die 42 Panels mit einer Fläche von 68 m² 10 Grad gegen Süden geneigt sind. Der Kreislauf wird mit einer 35 % Glycolmischung betrieben. Der elektrische Ertrag wurde auf 11570 kWh berechnet, der thermische Ertrag gemäss Normbedingungen auf 39220 kWh. Der thermische Ertrag ist jedoch von den Betriebsbedingungen und -Einstellungen abhängig. Aufgrund des geringer als projektierten thermischen Ertrages im Demonstrationprojekt B35 ⁽¹⁾ und anderen ähnlichen Objekten (pers. Kommunikation M. Bättschmann, BS2) wurde die Kollektorfläche grösser bemessen. Ein weiteres, wichtiges Element für die Realisierung eines geringen Hubes und damit hohen Leistungszahl ist die Wärmesenke. Auf der Wärmeabgabeseite wurden grosse Austauschflächen realisiert, damit die benötigten Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb unter 30 °C bleiben können. Dazu wurden zusätzliche zu den eng verlegten Heizkreisen im Boden TABS (Thermo-Aktives-Bauteil-System) in den Decken gegen aussen verlegt. Die Heizkreise wurden wo möglich und sinnvoll (gleiche Rohrlänge und gleiche Zone) parallel verlegt und werden jeweils von einer Kleinpumpe (Deutsche Vortex BW155V) betrieben. Die Steuerung der Heizkreise erfolgt über ein Hausleitsystem. Einen Einfluss darauf haben neben der Raumtemperatur die Besonnung, Jahreszeit, Systemzustand und Wetterprognose. Eine Lüftungsanlage übernimmt den Luftwechsel. Sie verfügt über einen Wärmetauscher, ein elektrisches Vorheizregister für ausserordentlich kalte Tage zur Verhinderung von Frost im Wärmetauscher und über ein Nachheiz-/Kühlregister zur Temperierung der Frischluft. Das Register ist als separater Heizkreis in die Abgabeseite der Heizung / Kühlung integriert. Die Luft wird normalerweise überwiegend in den Nasszellen und Nebenräumen abgeführt, im Kochbetrieb hauptsächlich über den Dampfzug. Im Sommer können Wärmequelle und Senke hydraulisch vertauscht werden. Boden und Decke können damit aktiv gekühlt werden. Die Notwendigkeit der Kühlung ist

eng mit der Sonneneinstrahlung verknüpft und erfolgt daher ausschliesslich mit Eigenstrom.

Die Warmwasseraufbereitung erfolgt in einer Frischwasserstation. Das Warmwasser wird dabei im Durchflussverfahren von ca. 14 °C auf 42 °C erwärmt. Die notwendige Wärme dafür stammt aus einem 800 l fassenden technischen Speicher, der normalerweise auf 48 °C erwärmt wird, bei Überschüssen aus der PV Anlage auf 50 °C überwärmt wird (Lastverschiebungen).

Das Gebäude wird durch ein selbst entwickeltes und programmiertes Automatisierungssystem gesteuert. Das System kontrolliert anhand von Daten der Sensoren (Temperatur, Feuchtigkeit, Präsenz in Räumen, Stromproduktion, Daten des Schwimmbades, Daten der Heizung, Lüftung) und von Wetterprognosen oder Hagelwarnung neben weiteren Aufgaben alle Heizkreise, Beschattung, Beleuchtung und veranlasst Lastverschiebungen zur Optimierung des Eigenverbrauchs oder legt die Warmwasseraufbereitung in ein Zeitfenster, in dem die Quelltemperatur wegen laufender Regeneration hoch ist. Auf Details wird hier nicht weiter eingegangen.

Die Gebäudesteuerung weist folgende Hauptbetriebszustände auf:

- 0 Standby
- 1 Heizen
- 2 Warmwasserbereitung
- 3 Kühlen
- 4 Regeneration (alleine oder in Kombination 1, 2 oder 3)
- 5 Schwimmbad heizen (alleine oder in Kombination 1, 2 oder 3)

Abbildung 1 zeigt das vereinfachte Prinzipschema der Gebäudetechnik, visualisiert auf dem Hausleitsystem.

Energieverbrauch und Erträge gemäss Projekt pro Jahr			
Quelle 10 C	Senke 30/45 C	COP 7.5/4.5	JAZ 6.7 / 4.0
EBF = 475 m ² , Sondenlänge 420 m			
Wärmebedarf = 71 kWh/m ² *a * 475 m ² EBF =		33689 kWh/a	
Dachfläche 68 m ² ; el. Wirkungsgrad 17.7 %, thermischer Wirkungsgrad 53 %			
	Nutzwärme	Strom	Anergie
WP HW	27039 kWh/a	4054 kWh/a	22985 kWh/a
WP WW	6650 kWh/a	1464 kWh/a	5186 kWh/a
total	33689 kWh/a	5517 kWh/a	28172 kWh/a
Stromverbrauch Haus		7000 kWh/a	
total		12517 kWh/a	
Elektrischer Ertrag		12499 kWh/a	
Thermischer Ertrag			37498 kWh/a
Bilanz		-18 kWh/a	9326 kWh/a

Tabelle 1: Eckdaten gemäss Projektierung, Energienachweis

Methoden

Die Datenakquisition erfolgt auf einem kleinen Rechner mit einem Stromverbrauch von 1-2 W. Der Rechner ist für die Hausautomatisation zuständig und gleichzeitig Gateway zu allen integrierten Peripheriegeräten und ebenfalls der Webserver für die Visualisierung. Tabelle 2 listet Messobjekte, Messmittel und Messpunkte auf.

Datenakquisition

- Rechner: Logic Machine5 Power DW1, embedded systems SIA, Riga, Litauen
- Datenspeicherung für die Auswertung:
 - Wärme und Strom:
 - Sampling: 1/min, gespeichert alle 15 Minuten als Mittelwerte über 15 Minuten.
 - Datenspeicherung PV Anlage:
E3DC Portal (Produktion, Hausverbrauch, Netzbezug, Einspeisung, Batterie)
 - Aussentemperatur stündlich (als mean)
 - Systemzustand: alle 5 Minuten gespeichert (aktueller Wert)

Die Speicherintervalle mussten aus Speicherkapazitätsgründen relativ lang gewählt werden, da alle Trends im Arbeitsspeicher Platz finden müssen. Der Systemzustand wird alle 5 Minuten aufgezeichnet.

Diese Anordnung hat zur Folge, dass die Restwärme nach Ausschalten der Wärmepumpe jeweils nicht mehr gezählt wird. Der Stromverbrauch wird damit voll gezählt, wogegen die Wärmeproduktion und damit die Effizienz leicht unterschätzt wird.

Die Strommessung für den Kompressor erfolgt in der Wärmepumpe, ebenso wie die Temperaturmessungen und Volumenstrommessungen für die Sonde, die Wärmeabgabeseite und den Solarkreis. Die Werte werden auf dem ModBus ausgelesen. Temperatur und Volumenstrom fürs Schwimmbad werden separat gemessen (techem multical 6M2, Volumenmessteil MTH 6m³/h). Die Messung der Nebenaggregate erfolgt über einen 3-phasigen Stromzähler (KNX Energiezähler, 3ph, Standard EZ-EMU-DSTD-D-REG-FW, Lingg & Janke OHG | Zeppelinstraße 30 | D-78315 Radolfzell)

Sondenkreis, Abgabeseite und Solarkreis werden separat gezählt. Die Aufschlüsselung kann nach Systemzustand erfolgen. Auf das System kann von aussen via VPN Verbindung zugegriffen werden.

Die Daten werden als Monatsbilanzen ausgewertet und präsentiert.

Messobjekt	Messmittel	Messpunkte
Elektrische Leistung Wärmepumpe Aufschlüsselung nach • Heizen • Warmwasser • aktiv Kühlen	Stromzähler	Elektroanschluss WP (integriert)
Thermische Leistung Wärmepumpe (Quelle) Aufschlüsselung nach • Heizen • Warmwasser • aktiv Kühlen	Temperaturdifferenz Durchflussmenge WT	Durchflussmenge WT Sondeneintrittstemperatur Sondenaustrittstemperatur
Thermische Leistung Wärmepumpe (Senke) Aufschlüsselung nach • Heizen • Warmwasser • aktiv Kühlen	Temperaturdifferenz Durchflussmenge WT	Durchflussmenge WT Temperatur Vorlauf Temperatur Rücklauf
Solarleistung thermisch Aufschlüsselung nach • Regeneration Sonde • Schwimmbad	Temperaturdifferenz Durchflussmenge WT Solar Durchflussmenge WT Sonde	Temperatur Vorlauf Solar Temperatur Rücklauf Solar Durchflussmenge Solar (soleseitig) Temperatur vor/nach WT Solar (wasserseitig) techem Multical
Solarleistung elektrisch Hausverbrauch	Stromzähler	E3DC S10 Pro (via modbus)
Elektrische Leistung separat für • Pumpe Sonde • Wärmeverteilung • Pumpe Solarkreis Aufschlüsselung nach • Heizen • Warmwasser • aktiv Kühlen	Stromzähler Lingg Janke 3-P Zähler	Elektroanschluss Pumpen
Systemzustand 0 Standby 1 Heizen 2 Warmwasser 3 aktiv Kühlen 4 Regeneration (komb. mit 1,2 oder 3) 5 Schwimmbad heizen (komb. mit 1,2 oder 3)		Systemzustand WP
Umgebungsbedingungen	Temperaturfühler	Aussentemperatur (Aussenluft) Solare Einstrahlung (PV Anlage)

Tabelle 2: Messobjekte, Messmittel und Messpunkte

Datenprozessierung

Vollständigkeit der Daten:

Fehler in den Aufzeichnungen:

1.3.2022, 12:15 bis 16:00: Speicherung der Werte von 12:15 von 12:15 bis 16:00.

21.1.2022: 10:15 bis 17:00: 0 für Wärmestrom Sonde und Abgabeseite, 0 für Verbrauch Kompressor

Vollständigkeit 99.9 %

Berechnungen

Mit den Massestrommessern im Verdampfer – und Kondensatorkreis sowie im Solarkreis und separat im Schwimmbadkreis sowie den Temperaturmessungen vor und nach den Wärmetauschern werden die Wärmeströme berechnet.

Die Wärmeströme werden wie folgt berechnet:

(Konvention: Erwärmen einer Komponente: $Q > 0$, Kühlen: $Q < 0$)

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

Q: Wärmestrom

m: Massenstrom

c_p : spezifische Wärmekapazität

ΔT : Temperaturspreizung

Die Wärmeenergiebilanz der Quellenseite wird wie folgt berechnet:

$$\Delta E = E_{EWS,HW} + E_{EWS,WW} + E_{EWS,K} + E_{EWS,PVT}$$

ΔE : Wärmeenergiebilanz Erdwärmesonde

$E_{EWS,HW}$: E Erdwärmesonde Heizwasser

$E_{EWS,WW}$: E Erdwärmesonde Warmwasser

$E_{EWS,K}$: E Erdwärmesonde aktiv Kühlen

$E_{EWS,PVT}$: E Erdwärmesonde von Hybridkollektor

Elektrische Energiebilanz:

$$\Delta W = W_{PV} - W_{Haus} - W_{WP,HW} - W_{WP,WW}$$

ΔW : elektrische Energiebilanz Haus

W_{PV} : Stromproduktion PV Anlage

W_{Haus} : Stromverbrauch Haus

$W_{WP,HW}$: Stromverbrauch WP Heizwasser

$W_{WP,WW}$: Stromverbrauch WP Warmwasser

Der Stromverbrauch der Pumpen im Betriebszustand Heizen, Warmwasseraufbereitung oder Kühlen in Kombination mit Regeneration der Sonde wird jeweils dem Zustand Heizen, Warmwasseraufbereitung bzw. Kühlen zugeordnet. Alleinige Regeneration wird separat gezählt.

Die Leistungszahlen und Arbeitszahlen werden für die gesamte Messperiode präsentiert (SCOP, JAZ) und separat als Werte für jeden Monat sowie für den kältesten Tag.

Die Leistungen der Pumpen Quelle, Solar und der Wärmeabgabeseite (inklusive Aktiv-Heizkreisverteiler) werden separat gemessen.

Leistungszahl, Coefficient of Performance (COP):

$$COP_{HW} = Q_{HW} / P_{el, WP HW}$$

$$COP_{WW} = Q_{WW} / P_{el, WP WW}$$

$$EER_K = Q_K / P_{el, WP K}$$

Arbeitszahl, (AZ):

$$AZ_{HW} = Q_{HW} / (P_{el, WP HW} + P_{el, P})$$

$$AZ_{WW} = Q_{WW} / (P_{el, WP WW} + P_{el, P})$$

$$AZ_K = Q_K / (P_{el, WP K} + P_{el, P})$$

COP_{HW} : COP Heizwasser

COP_{WW} : COP Warmwasser

EER_K : EER Kühlen

Q_{HW} , Q_{WW} , Q_K : Wärmestrom Heizwasser, Warmwasser, Kühlen

$P_{el, WP HW}$: Elektrische Leistung WP Heizwasser

$P_{el, WP WW}$: Elektrische Leistung WP Warmwasser

$P_{el, WP K}$: Elektrische Leistung WP Kühlen

$P_{el, P}$: Elektrische Leistung Pumpen

Resultate

Die Messperiode wurde aufgrund der Verzögerungen in der Entwicklung der Membran Erdwärmesonde und dem Einbau einer alternativen Doppel U EWS und Inbetriebnahme der Heizung von ursprünglich geplanten 24 Monaten in Rücksprache mit dem AWEL auf 12 Monate reduziert und dauerte von September 2021 bis August 2022. Die jeweils notwendigen Optimierungen einer Anlage nach Inbetriebnahme erfolgten bereits zwischen 2016 und 2021, als das Haus mit einer provisorischen Luft-Wasser Wärmepumpe beheizt wurde.

Jahresbilanz

Haus, Lastseite

Der Heizwärmebedarf des Hauses fiel mit 24138 kWh geringer aus, als im Wärmenachweis berechnet. Dies entsprach einem Heizwärmebedarf von 50.8 kWh/m² EBF. Der Wärmebedarf für Warmwasser war mit 5538 kWh, bzw. 11.7 kWh/m² EBF ebenfalls etwas geringer, als projektiert.

Der Wärmeentzug aus Fussboden- und Deckenregister zur aktiven Kühlung des Hauses betrug - 7331kWh (- 15.4 kWh/m² EBF).

Der SCOP betrug über die Heizperiode für Heizen 8.8, die JAZ 7.6, für Warmwasser über die gesamte Messperiode 5.4 bzw. 5.0). Im Kühlbetrieb resultierten eine SEER von 14.0 und eine JAZ von 10.5.

EWS, Quelle

Der Wärmeentzug aus der EWS betrug für den Heizbetrieb - 22959 kWh, bzw. - 48.3 kWh/m² EBF, für die Warmwasseraufbereitung - 4471 kWh, bzw. - 9.4 kWh/m² EBF. Die PVT Anlage trug 15579 kWh (32.8 kWh/m² EBF) zur Regeneration bei, die Fussboden- und Deckenregister 7534 kWh (15.9 kWh/m² EBF). Der Hybridkollektor regenerierte die Sonde zu 57 %, die aktive Kühlung trug 27 % bei, was die Sonde über die Messperiode insgesamt zu 84 % regenerierte.

Hybridkollektor

Der Hybridkollektor produzierte insgesamt 21445 kWh thermische und 13827 kWh elektrische Energie. Von der thermischen Energie wurden 73 % zur Regeneration der Sonde und 27 % zur Erwärmung des Schwimmbades verwendet.

Strombilanz

Der Strombedarf fürs gesamte Haus betrug (Ladestation für Elektromobilität ausgenommen) 15918 kWh. Davon wurden 2745 kWh für die Heizwasserproduktion benötigt (6.9 kWh/m² EBF) und 1033 kWh für die Warmwasserproduktion (2.3 kWh/m² EBF). Zur Kühlung des Hauses und aktiven Regeneration der Sonde wurden 525 kWh, bzw. 1.5 kWh/m² EBF benötigt.

Die Photovoltaikanlage produzierte in der gleichen Zeit 13827 kWh Strom. In der Jahresbilanz trug die Photovoltaikanlage 86.7 % Strom zum Gesamtverbrauch bei.

Die Autarkie betrug dabei über die gesamte Messperiode 59 %, während der Heizperiode 45 %.

Aussentemperatur

Die mittlere, monatliche Aussentemperatur zeigte ein Minimum von 2.2 °C im Januar 2022 und ein Maximum von 22.3 °C im Juli 2022.

Monatsbilanzen

Lastseite

Abbildung 2 zeigt die monatliche Bilanz auf der Lastseite. Der Wärmebedarf für Warmwasser ist ziemlich konstant über die Messperiode. Die Heizperiode dauerte während der Messperiode von Mitte Oktober bis Anfang Mai. Ab Mai wird das Gebäude über die Fussboden- und Deckenregister aktiv gekühlt und die Sonde damit regeneriert.

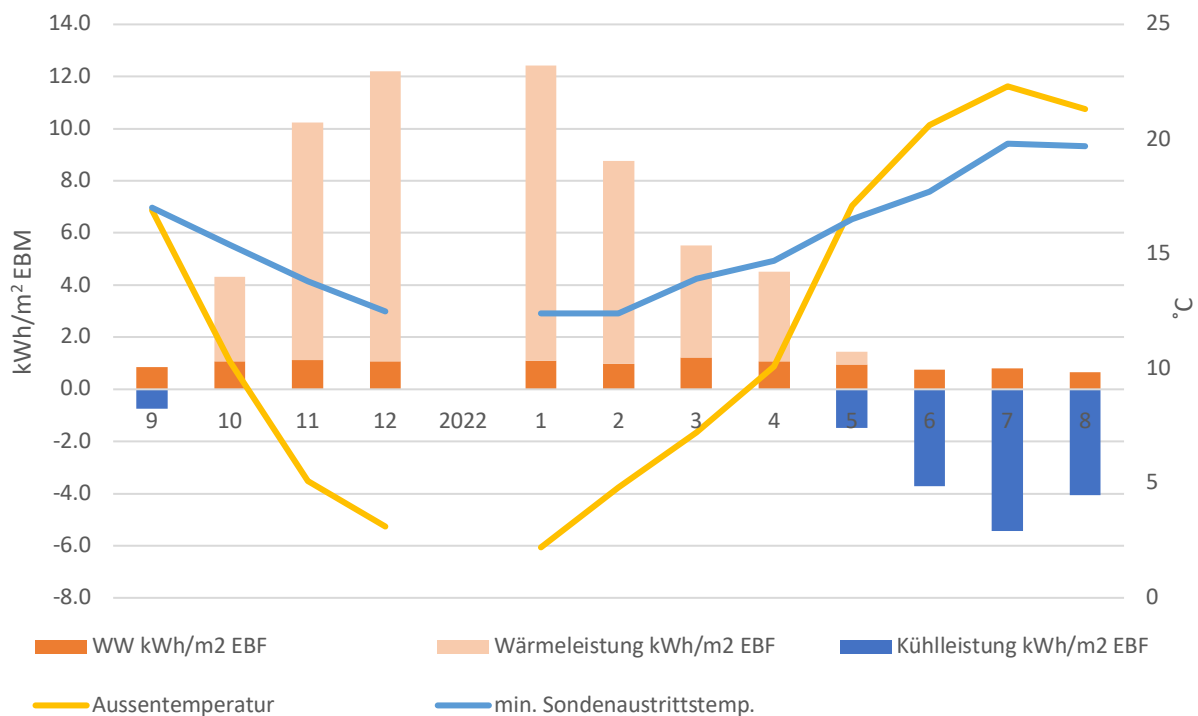


Abbildung 2: Monatliche Heizleistung für Heizwärme, Warmwasser und Kühlleistung sowie Aussentemperatur und die minimale Sondaaustrittstemp. Kühlleistung Haus negativ dargestellt.

Abbildung 3 zeigt die saisonalen Koeffizienten der Wärmepumpe und die mittlere Aussentemperatur. Der COP ist zu Beginn der Heizperiode am höchsten, fällt auf ein Minimum von 8.1 ab im Januar 2022 und steigt zum Ende der Heizperiode wieder an auf 8.8. Die COP Werte für Warmwasser bewegen sich zwischen 5.0 und 6.2 im Sommer. Die EER Werte im Kühlbetrieb bewegen sich zwischen 13.5 und 17.1. Die entsprechenden Arbeitszahlwerte zeigt Abbildung 4.

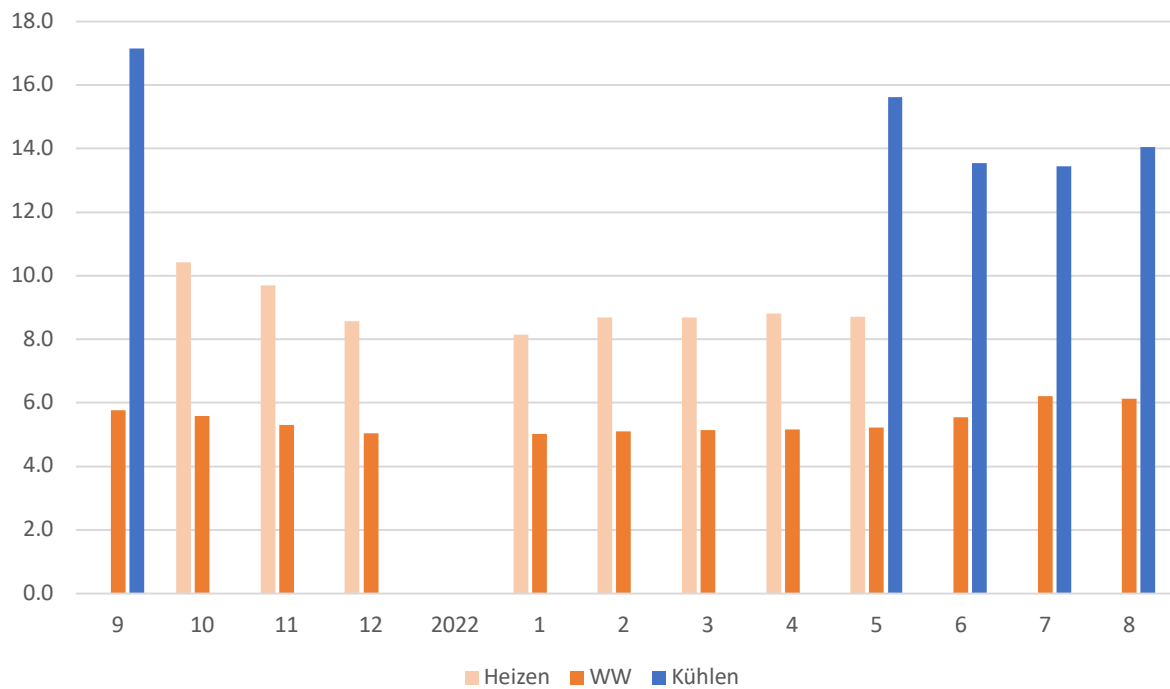


Abbildung 3: Monatliche COP für Heizbetrieb, Warmwasseraufbereitung und und EER für aktiv Kühlen

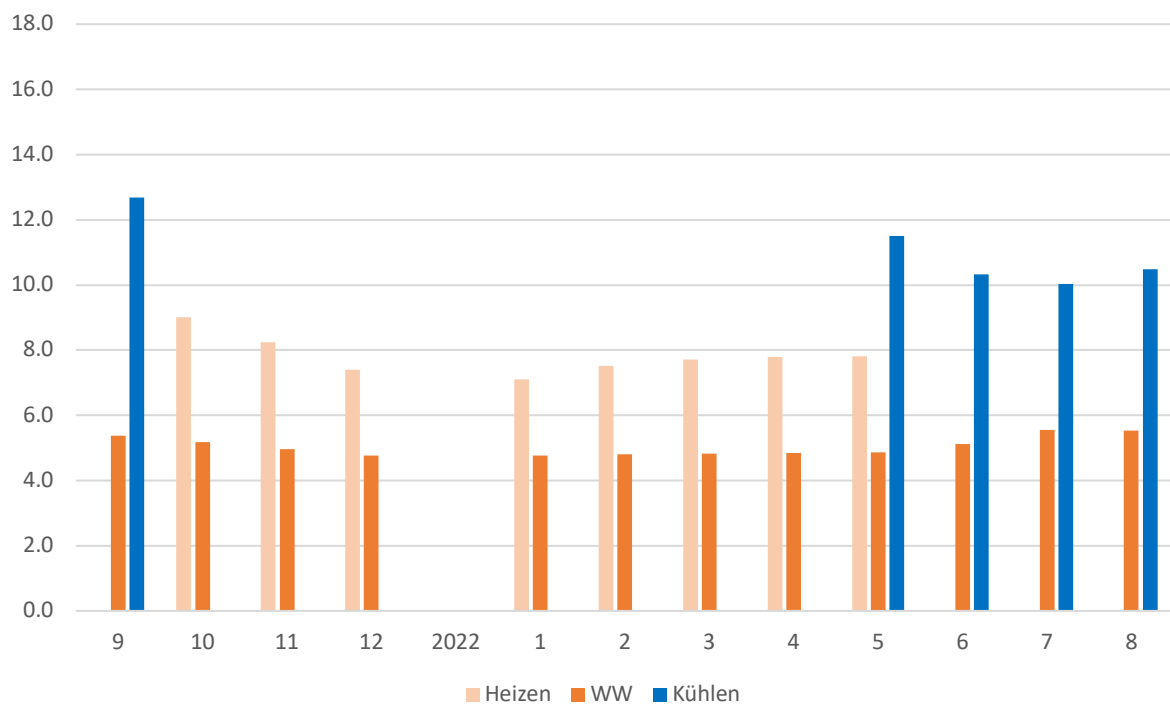


Abbildung 4: Monatliche AZ für Heizen, Warmwasser und Kühlen

Quelle

Der Wärmeentzug erfolgt überwiegend von November bis Februar, von Mai bis September war die Bilanz positiv mit einem Netto Eintrag in die Sonde. Der grössere Regenerationsanteil stammt dabei vom Hybridkollektor. Bereits ab Februar wird Wärme in die Sonde eingetragen (Abb. 5).

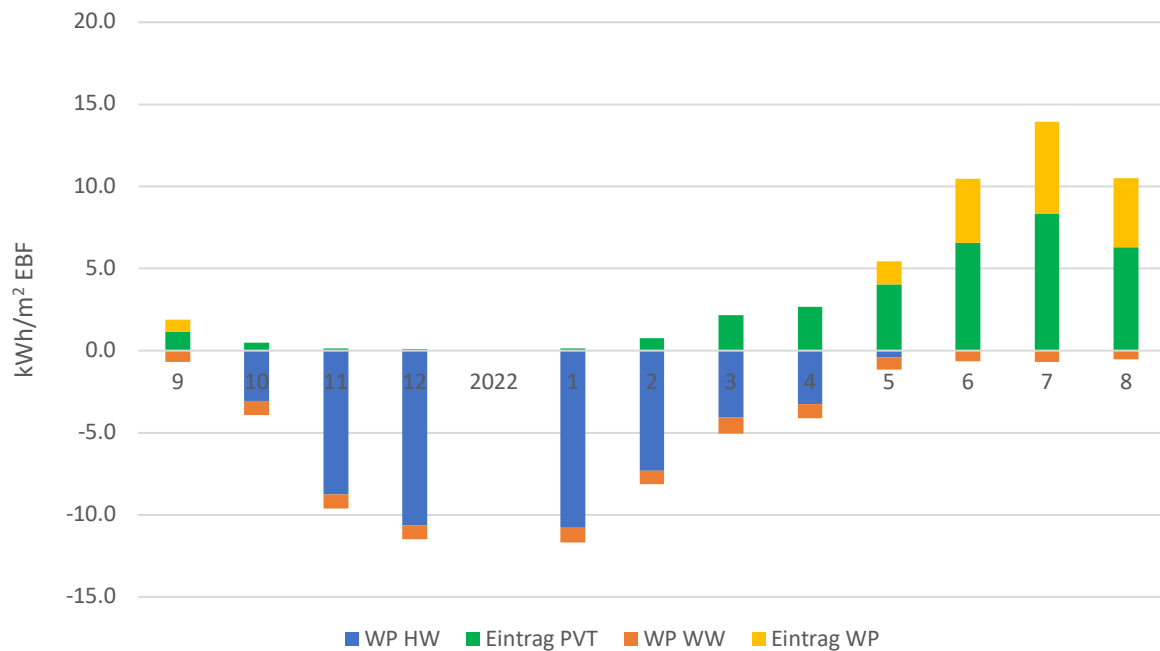


Abbildung 5: Bilanz EWS, normiert auf die EBF. Wärmeentzug negativ, Wärmeeintrag positiv. WP HW: Entzug über WP Heizen; WP WW: Entzug über WP Warmwasser; Eintrag WP: aktive Regeneration über WP; Eintrag PVT: solare Regeneration

Die minimale Eintrittstemperatur der EWS betrug von Mitte Januar 2022 bis Mitte Februar 2022 zwischen 12.0 °C und 12.6 °C (min 12.0 °C am 15.1.2022).

Die Sonde wird während der Heizperiode im kältesten Monat Januar mit durchschnittlich 18.32 W/m (Heizen 16.94 W/m; Warmwasser 1.38 W/m) belastet. Die Regenerationsleistung ist im Juli 2022 am höchsten mit durchschnittlich 21.9 W/m (solare Regeneration 13.1 W/m, aktiv Kühlen 8.8 W/m). 73 % der thermischen Leistung der PVT Anlage wurde zur Sondenregeneration verwendet, 27 % zur Erwärmung des Schwimmbades.

Hybridkollektor

Abbildung 6 zeigt die elektrische und thermische Leistung des Hybridkollektors pro Quadratmeter Hybridkollektorfläche. Von November bis Januar wird praktisch keine thermische Energie abgegeben. Hauptsächlich im Frühling und Herbst wurden insgesamt 27 % des thermischen Ertrages für die Schwimmbaderwärmung verwendet.

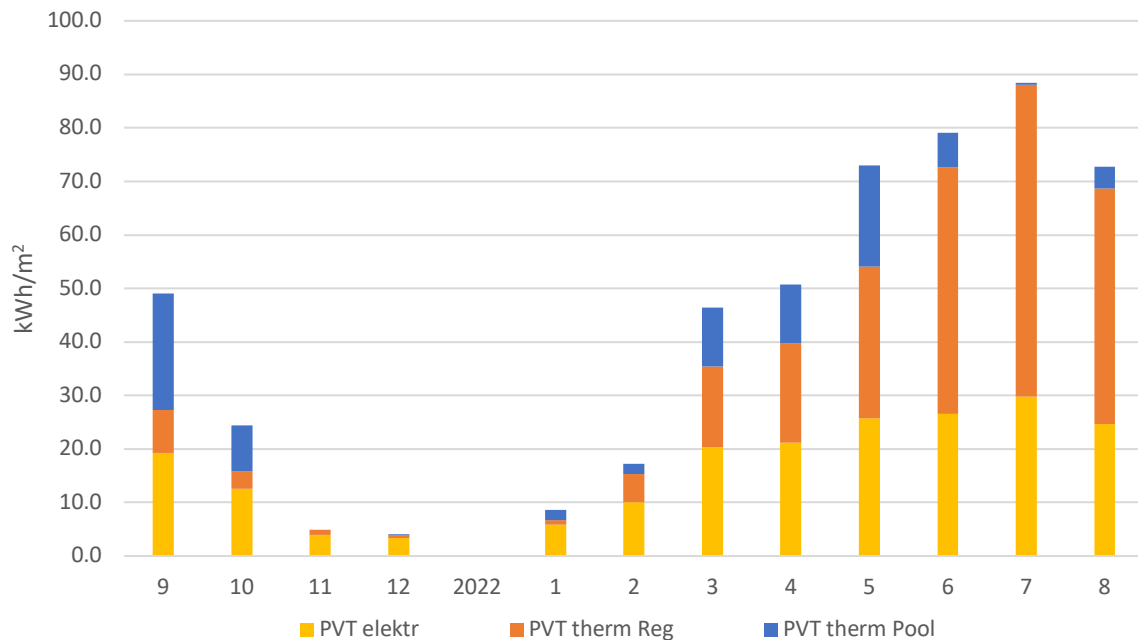


Abbildung 6: Ertrag Hybridkollektor pro m² Kollektorfläche: elektrischer Ertrag (gelb), thermischer Ertrag zur Sonde (orange) und thermischer Ertrag zum Schwimmbad (blau)

Strom

Der Stromverbrauch des Hauses ohne Wärmepumpe variierte über das Jahr relativ wenig und betrug knapp 1.5 kWh/m² bis 2.2 kWh/m² EBF. Der Stromverbrauch für die Warmwasseraufbereitung war über die Messperiode relativ konstant, im Sommer etwas geringer, als im Winter (Abb. 7).

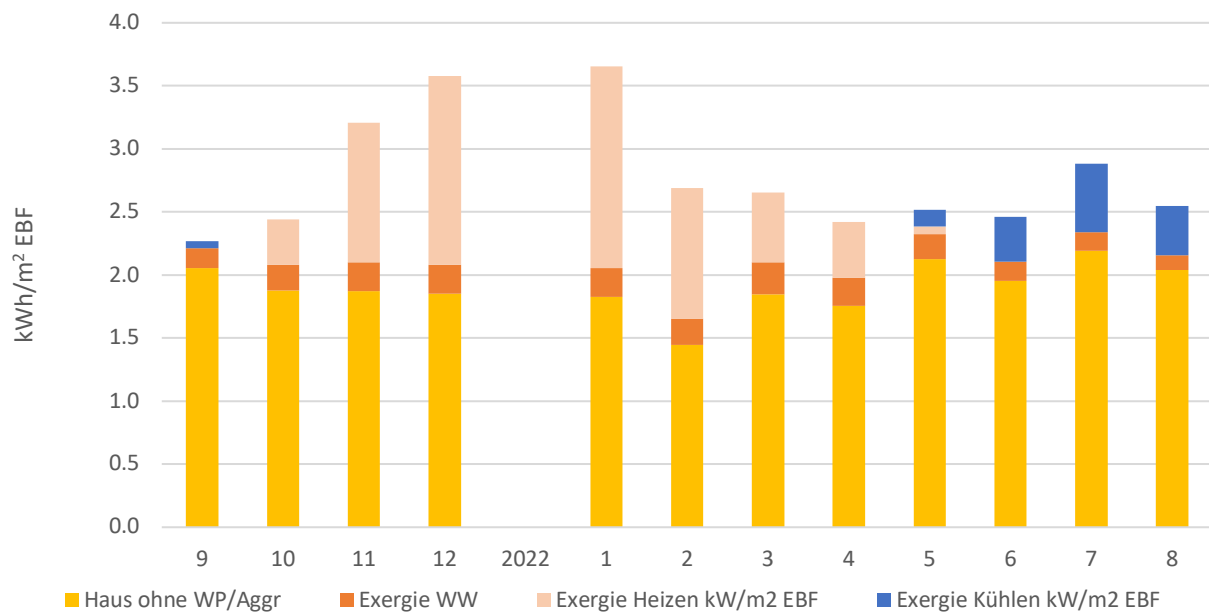


Abbildung 7: Stromverbrauch pro m² Energiebezugsfläche für Haus ohne Wärmepumpe/Aggregate und separat für die Zustände Heizen, Warmwasser und Kühlen

Spezielle Situationen: Kältester Tag und Beginn Heizperiode

Am kältesten Tag (13.1.2021) betrug die durchschnittliche Aussentemperatur -1.6 °C. Der COP für Heizen betrug dabei 7.8, die AZ 6.9, für die Warmwasseraufbereitung 5.1, bzw. 4.8.

Zu Beginn der Heizperiode war die Sondenaustrittstemperatur über mehrere Wochen höher, als die unbelastete Temperatur nach Einbau der Sonde. Grund dafür war der Wärmestrom zur Sonde über den Sommer. Die mittlere Temperatur in der Sonde betrug vor Inbetriebnahme betrug ca. 16 °C. Die minimalen Ein- und Austrittstemperaturen sanken im Heizbetrieb allmählich ab auf das Minimum zwischen Mitte Januar 2021 und Mitte Februar 2021 (minimale Sondenaustrittstemperatur 12.0 °C, minimale Eintrittstemperatur 8.0 °C) und stiegen danach mit abnehmendem Wärmebedarf und zunehmender Regeneration wieder an.

Diskussion

Der Vergleich mit Daten aus der zuvor installierten Luft-Wasser-Wärmepumpe zeigt, dass der Wärmebedarf sowohl für Heizen als auch Warmwasser im Bereich der Vorjahre liegt (Heizwasser 2018/2019: 24690 kWh, 2019/2020: 22340 kWh, Warmwasser 2018/2019: 3950 kWh, 2019/2020: 4590 kWh). Die aktuellen Werte fügen sich in diese Reihe ein und erscheinen damit plausibel.

Der Stromverbrauch der provisorischen Wärmepumpe war nicht bekannt, konnte aber wegen des ansonsten ziemlich konstanten Stromverbrauchs des Hauses grob geschätzt werden und wird im Durchschnitt während der Heizperiode auf ca. 1200 kWh zusätzlich pro Monat und total ca. 6000 kWh pro Heizperiode geschätzt. Das ergäbe eine JAZ von knapp 4 für die Luftwasser-Wärmepumpe im Heizbetrieb, was tendentiell hoch, aber angesichts der niedrigen Vorlauftemperaturen und des oft niedrigen Hubes ebenfalls plausibel erscheint.

Der Stromverbrauch wird am Hausübergabepunkt fürs gesamte Haus gemessen und im aktuellen Mess-Setting im Haus separat für den Kompressor der Wärmepumpe, die Hilfsaggregate und weitere Verbraucher. Der Gesamtverbrauch erhöhte sich in den Wintermonaten hauptsächlich um den Verbrauch der Heizung, womit der Stromverbrauch der Heizung plausibel erscheint.

Wärmepumpe

Die benötigte Wärmemenge sowohl für Heizen als auch Warmwasserbereitung waren mit 89.3 % bzw. 83.3 % geringer als projiziert. Die erreichten COP und JAZ Werte sind sowohl für den Heizbetrieb (8.8, bzw. 7.6) als auch den Warmwasserbetrieb (5.4, bzw. 5.0) im Vergleich anderen Felddaten sehr hoch und besser als erwartet (2).

Der COP und die AZ waren in jedem Monat deutlich höher als erwartet (Minimum im Januar 2021 8.1, bzw. 7.1) und im Durchschnitt über die gesamte Messperiode ebenfalls deutlich höher (8.8, bzw. 7.6) und sanken auch am kältesten Tag nicht unter 7.8 bzw. 6.9 ab.

Damit war der Exergiebedarf ebenfalls geringer, als projiziert (67.7 % für Heizwasser, 70.6 % für Warmwasser). Der Exergiebedarf betrug für Heizwasser für die Messperiode 6.7 kWh/m² EBF. Der Verbrauch war im Januar 2021 mit 1.60 kWh/m² EBF am höchsten, betrug aber immer noch weniger als 50 % des Stromverbrauches des Hauses. Die Effizienz des Systems blieb auch am kältesten Tag der Heizperiode hoch (COP 7.8, AZ 6.9), was zeigt, dass die Effizienz des Systems praktisch unabhängig von der Aussentemperatur ist. So ist der Stromverbrauch des gesamten Hauses im kältesten Monat (Januar 2022) nur gut 50% höher, als im September 2021.

In die AZ eingerechnet ist zusätzlicher Stromverbrauch der Solarpumpe und ein erhöhter Stromverbrauch der Sondenpumpe, um die Eintrittstemperatur in die Sonde zu begrenzen (s. Absatz Diskussion, Erdwärmesonde). Im Hochsommer benötigt die Sondenpumpe bis zu 300 W, um die anfallende Wärme des Hybridkollektors und der Wärmepumpe bei Sondentemperaturen < 38 °C abzugeben, was die etwas grössere Differenz zwischen EER Werten und AZ im Kühlbetrieb erklärt.

Strom

Der Strombedarf für die Warmwasseraufbereitung betrug 2.2 kWh/m² EBF und war im Sommer geringer als im Winter. Der Grund dafür dürfte die Tatsache sein, dass die Ladung des technischen Speichers vorzugsweise tagsüber und während Regenerationsbetrieb erfolgte, wo die Sonde deutlich höhere Temperaturen aufwies (typischerweise > 20 °C) und die Wärmepumpe effizienter arbeitete. Der Zeitpunkt der Speicherladung wird vom Hausleitsystem gesteuert.

Die Stromproduktion war wie auch die Jahre zuvor etwas höher als projiziert (111 % der Prognose), unter anderem durch die Kühlung der PV Module und entsprach den Werten der vorangegangenen Jahre. Allerdings ist der Verbrauch des Hauses deutlich höher als die geschätzten 7000 kWh/a. Relevante Verbraucher sind im Sommer die Umwälzpumpe des Schwimmbades mit ca. 180 kWh/Monat und die Klimaanlage des Weinkellers mit ebenfalls ca. 75 kWh/Monat sowie ganzjährig die Komfortlüftung, welche trotz CO₂ Führung zwischen 56 und 86 kWh/Monat benötigt. Trotz normgerechter Auslegung und Abgleich der Lüftung ist ein einzelner Raum dafür verantwortlich, dass die Lüftung nachts jeweils stark hochgeregelt wird und der Stromverbrauch auf das 3 – fache des Jahresmittelwert ansteigt. Eine Rohrdimensionierung für solche Räume, welche über die Normen hinausgeht, könnte den Stromverbrauch der Lüftung relevant reduzieren, in obigem Projekt wahrscheinlich halbieren. Die obigen Verbraucher benötigen ca. 20 % des Stromes übers Jahr. Die Hausautomatisation und das Netzwerk verbrauchen konstant knapp 300 W, was einen hochgerechneten Verbrauch von ca. 2500 kWh/Jahr (ca. 17%) ergibt (kein separater Zähler). Damit konnte das Ziel einer ausgeglichenen Strombilanz des Hauses über das Jahr nicht ganz erreicht werden (87 % Stromproduktion vor Ort des Gesamtverbrauchs).

Erdwärmesonde

Die Erdwärmesonde wurde insgesamt zu 84 % regeneriert und die angestrebte komplette Regeneration wurde somit nicht ganz erreicht. Der Hybridkollektor trug 57%, die Wärmepumpe (aktive Kühlung) 27% dazu bei. Das Ziel einer vollständigen thermischen Regeneration der Sonde könnte mit der bestehenden Anlage leicht erreicht werden, wenn im Frühling und Herbst keine Wärme zur Schwimmbaderwärmung (27% des thermischen Ertrags des Hybridkollektors) verwendet würde. Eine kleine Optimierungsmöglichkeit für den thermischen Ertrag sind die Masseströme der Solepumpe und Sondenpumpe.

Die Temperaturen auf der Sondenseite waren wie erwartet relativ hoch und auf der Abgabeseite wurden keine Vorlauftemperaturen > 30 °C benötigt, sodass der Hub auch an den kältesten Tagen meist < 20 °K blieb.

Im kombinierten Kühl-/Regenerationsbetrieb zeigte sich, dass die Sonde an den wärmsten Tagen sehr warm wurde mit gegen 40 °C Sondereintrittstemperatur, oder aber der Massenstrom der Sondenpumpe auf einen so hohen Wert eingestellt werden musste, dass eine konstant hohe Leistungsaufnahme und damit ein hoher Stromverbrauch der Sondenpumpe resultierte. Der Grund dafür ist, dass die Drehzahl der Sondenpumpe in diesem Betriebszustand fix eingestellt ist. Das Programm wurde im August 2021 so angepasst, dass dieser Fixwert im

Betriebszustand aktiv Kühlen + solare Regeneration in Abhängigkeit der Sondereintrittstemperatur durch das Hausleitsystem so geregelt werden konnte, dass die Sondereintrittstemperatur meist unter 35 °C gehalten und die Leistungsaufnahme der Sondenpumpe bei weniger hohen Solartemperaturen beschränkt werden konnte. Zusätzlich wurde die Warmwasseraufbereitung bei genügend Eigenstrom (gemäss lokaler Wetterprognose) in die Tagestunden mit den höchsten Solartemperaturen gelegt. Damit konnte dem Sondenkreis zur heissesten Periode des Tages Wärme entzogen werden, was ebenfalls zur Senkung der maximalen Sondereintrittstemperatur beitrug und die Leistungszahl bei der Warmwasserproduktion war um ca. 20 % höher wegen der höheren Quellentemperatur.

Auch bei diesem Projekt war die thermische Solarleistung insgesamt tiefer als erwartet, was aber den mittlerweile vorhandenen Erfahrungen entspricht. Die Sonde konnte im Sommer überwärmt werden und die mittlere Sondentemperatur blieb zu Beginn der Heizperiode über mehrere Wochen wärmer, als die ungestörte Temperatur im Erdreich. Die Temperatur war am Ende des Sommers vor und nach der ersten Heizperiode ähnlich überhöht, sodass es sich wahrscheinlich nicht um einen einmaligen Effekt mit Beginn der Aufzeichnung am Ende einer Regenerationsphase ohne vorangegangene Heizphase handelt.

Schlussfolgerungen

Die Implementierung des vorgestellten Systems in einem Einfamilienhaus funktioniert zuverlässig und das System erreicht die angestrebte Effizienz. Eine über das Jahr ausgeglichene Strombilanz konnte nicht ganz erreicht werden. Grund dafür war ein deutlich höherer Stromverbrauch des Hauses, als angenommen. Die Gebäudetechnik umfasst dabei relevante Verbraucher. Der Hybridkollektor produziert mit 68 m² Fläche und bei einer EBF von 475 m² genügend thermische Energie für eine vollständige Regeneration der Sonde.

Referenzen

- 1) Bundesamt für Energie BFE, " Erfolgskontrolle – ZeroEmission-LowEx- Mehrfamilienhaus B35 Zürich, 20.1.2014
- 2) Bundesamt für Energie BFE, Projekt V0697 Zürich, Tièchestrasse 51-57, «Vergleich verschiedener Energieerzeugungs- konzepte in vier Mehrfamilienhäusern», 6.12.2018

Glossar

EBF	Energiebezugsfläche
EWS	Erdwärmesonde
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
COP	Coefficient of performance (Leistungszahl)
EER	Energy Efficiency Ratio
JAZ, AZ	Jahresarbeitszahl, Arbeitszahl
LowEx	Low Exergy

Anhang

	Sep.21	Oct.21	Nov.21	Dec.21	Jan.22	Feb.22	Mar.22	Apr.22	May.22	Jun.22	Jul.22	Aug.22
Wärmeenergiebilanz Lastseite [kWh]												
WP heizen	0	1541	4336	5281	5381	3691	2042	1631	235	0	0	0
WP TWW	403	508	530	513	518	469	575	512	454	361	385	311
WP kühlen	-351	0	0	0	0	0	0	0	-703	-1761	-2582	-1934
Wärmeenergiebilanz Quelle [kWh]												
EWS heizen	0	-1447	-4167	-5057	-5122	-3480	-1942	-1551	-193	0	0	0
EWS TWW	-329	-415	-401	-401	-418	-381	-463	-410	-364	-300	-330	-259
EWS kühlen	346	0	0	0	0	0	0	0	665	1848	2671	2004
EWS Sol Reg	545	224	65	36	65	365	1023	1260	1924	3128	3956	2988
Elektrische Energiebilanz [kWh]												
WP heizen	0	148	447	617	661	425	235	185	27	0	0	0
WP TWW	70	91	100	102	103	92	112	99	87	65	62	51
WP kühlen	21	0	0	0	0	0	0	0	45	130	192	138
Stromproduktion	1311	852	268	228	395	680	1383	1441	1753	1807	2029	1680
Gesamtstromverbrauch	1086	1164	1524	1701	1736	1282	1274	1163	1208	1183	1378	1219
Wärmebedarf Schwimmbad [kWh]												
Wärme Pool	1479	581	0	16	129	123	749	752	1284	444	28	281
Kennzahlen Wärmepumpe												
COP Heizen		10.41	9.7	8.56	8.14	8.68	8.69	8.82	8.7			
AZ Heizen		9.01	8.25	7.41	7.09	7.52	7.72	7.79	7.81			
EER Kühlen	17.14								15.62	13.55	13.45	14.06
AZ Kühlen	12.69								11.51	10.32	10.03	10.49
COP TW	5.77	5.6	5.3	5.04	5.03	5.1	5.13	5.17	5.22	5.55	6.21	6.12
AZ TW	5.37	5.18	4.96	4.76	4.76	4.81	4.82	4.85	4.87	5.12	5.56	5.53

Tabelle Anhang: Monatliche Daten für Lastseite, Quellenseite, Elektrische Energiebilanz, Wärmebedarf Schwimmbad und Kennzahlen WP