



Schlussbericht vom 12. März 2024

WOGENO Stadthaus ECO

Dachintegrierte Luft/Wasser-Wärmepumpe mit
hybrid genutzter PV-Anlage in einem Stadthaus



Quelle: © Nievergelt 2020



W O G E N O

soltop
energie



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK

Datum: 12.3.2024

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

SOLTOP Energie AG
St.Gallerstrasse 3, 8353 Elgg
www.soltop-energie.ch

WOGENO, Genossenschaft selbstverwalteter Häuser
Hardturmstrasse 134, 8005 Zürich
www.wogeno-zuerich.ch

SPF Institut für Solartechnik
OST – Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil-Jona
www.spf.ch

Autoren:

Daniel Philippen, SPF, daniel.philippen@ost.ch
Ulrich Frei, SOLTOP Energie AG, u.frei@soltop-energie.ch
Georges Nievergelt, Wogeno, georges.nievergelt@wogeno-zuerich.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stephan Renz, info@renzconsulting.ch
Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502032-01

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



Zusammenfassung

Mit dem Projekt wurde die Energieversorgung eines 100-jährigen Mehrfamilienhauses in Zürich auf eine nachhaltige Energieversorgung umgestellt. Das Stadtbild vieler Schweizer Städte wird massgeblich von alten Gebäuden geprägt, die zwischen 1920 und 1960 entstanden sind. Die Herausforderung besteht darin, diese Gebäude zu dekarbonisieren, was aufgrund von markanten Fassaden, begrenzten Platzverhältnissen und Restriktionen bezüglich Wärmepumpeninstallationen innovative Lösungen erfordert. Die Genossenschaft WOGENO-Zürich als Eigentümerin des beschriebenen Hauses an der Denzlerstrasse 36, strebt die vollständige Dekarbonisierung ihres urbanen Gebäudebestands an. Das 8-Familien-Haus wurde bisher mit einer Gastherme beheizt, und die Renovierungsmassnahmen umfassen unter anderem die Wärmedämmung von Estrichboden und Kellerdecke, den Einbau von 3-fach verglasten Fenstern sowie die Aussendämmung der Hoffassade.

Die Besonderheit des Projekts liegt in der Umstellung der fossil betriebenen Wärmeerzeuger auf zwei Luft/Wasser-Wärmepumpen, die im Dachgeschoss des Gebäudes schallisoliert montiert wurden, und in der bauseitigen Installation einer PVT-Anlage auf dem Dach, die sowohl Strom als auch Wärme erzeugt. Das Dachgeschoss wird weiterhin als Estrich genutzt, weshalb die Wärmepumpenanlagen so kompakt wie möglich gestaltet wurden, um diese Nutzung nicht zu stark einzuschränken. Besondere Herausforderungen während der Umsetzung waren die Schallisolation der Wärmepumpen im Dachgeschoss wegen der angrenzenden Wohnungen. Die PVT-Anlage wärmt die Zuluft der Wärmepumpen in Luftkanälen vor, welche unter den PV-Modulen verlaufen. Die Kombination zielt darauf ab, die Effizienz der PV-Stromproduktion und den COP der Wärmepumpen zu verbessern. Ein Batteriespeicher mit einer Kapazität von etwa 14 kWh spielt eine wichtige Rolle beim Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage im Tagesverlauf.

Die Renovierung führte zu einem Netto-Nullenergie-Gebäude, obwohl nur eine Seite der Fassade gedämmt wurde. Die beiden Luft/Wasser-Wärmepumpen erreichen eine JAZ von 3.86, was mit den vorliegenden Rahmenbedingungen eine hohe Gesamteffizienz der Wärmebereitstellung bedeutet. Der Nutzen der PVT-Anlage, also die Kühlung der PV-Anlage bei gleichzeitiger Erwärmung der Zuluft der Wärmepumpen, erwies sich als gering. Das Sanierungskonzept zeigt jedoch mit den dachintegrierten Luft/Wasser-Wärmepumpen einen neuen Weg auf, wie Wärmepumpen für die Dekarbonisierung der Energieversorgung von Altbauten in städtischem Gebiet eingesetzt werden können. Energetische Optimierungen der vorliegenden Umsetzung werden diskutiert, darunter der Einbau eines effizienten Boilers und die Verwendung von PCM-Kapseln im Pufferspeicher.

Gesamtkosten und Amortisationsdauer des umgesetzten Konzepts sind hoch. Die Soltop Energie AG prüft deswegen Möglichkeiten, das Konzept einer dachintegrierten Luft/Wasser-Wärmepumpe ohne das PV-Hybrid-Dach zu vermarkten, um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Die Installation einer PV-Anlage, also ohne thermische Nutzung der Solarstrahlung, ist dabei zu empfehlen.

Résumé

Ce projet a permis de convertir l'approvisionnement énergétique d'un immeuble d'habitation centenaire à Zurich en un approvisionnement énergétique durable. Le paysage urbain de nombreuses villes suisses est en grande partie marqué par d'anciens bâtiments construits entre 1920 et 1960. Le défi consiste à décarboniser ces bâtiments, ce qui nécessite des solutions innovantes en raison des façades à protéger, de l'espace limité et des restrictions concernant les installations de pompes à chaleur. La coopérative WOGENO-Zurich, propriétaire de l'immeuble décrit à l'adresse Denzlerstrasse 36, vise la décarbonisation complète de son parc immobilier urbain. La maison de 8 familles était jusqu'à présent chauffée par une chaudière à gaz et les mesures de rénovation comprennent entre autres l'isolation thermique du sol des combles et du plafond de la cave, l'installation de fenêtres à triple vitrage ainsi que l'isolation extérieure de la façade sur cour.



La particularité du projet réside dans le remplacement des générateurs de chaleur à énergie fossile par deux pompes à chaleur air/eau, montées dans les combles du bâtiment et insonorisées, et dans l'installation par le maître d'ouvrage d'une installation PVT sur le toit, qui produit à la fois de l'électricité et de la chaleur. Les combles continuant à être utilisés comme grenier, les installations de pompes à chaleur ont été conçues de manière aussi compacte que possible afin de ne pas trop restreindre cette utilisation. L'isolation phonique des pompes à chaleur dans les combles a constitué un défi particulier lors de la mise en œuvre, en raison de la présence d'appartements adjacents. L'installation PVT préchauffe l'air d'alimentation des pompes à chaleur dans des conduits d'air qui passent sous les modules PV. Cette combinaison vise à améliorer l'efficacité de la production d'électricité photovoltaïque et le COP des pompes à chaleur. Un système de stockage par batterie d'une capacité d'environ 14 kWh joue un rôle important dans l'équilibrage de l'offre et de la demande d'électricité au cours de la journée.

La rénovation a permis d'obtenir un bâtiment à énergie nette zéro, bien qu'un seul côté de la façade ait été isolé. Les deux pompes à chaleur air/eau atteignent un COP de 3.86, ce qui, avec les conditions générales existantes, signifie une efficacité globale élevée de la mise à disposition de chaleur. L'utilité de l'installation PVT, c'est-à-dire le refroidissement de l'installation PV et le réchauffement simultané de l'air entrant des pompes à chaleur, s'est avérée faible. Le concept de rénovation montre toutefois, avec les pompes à chaleur air/eau intégrées au toit, une nouvelle voie pour l'utilisation des pompes à chaleur en vue de la décarbonisation de l'approvisionnement énergétique des bâtiments anciens en zone urbaine. Les optimisations énergétiques de la présente mise en œuvre sont discutées, notamment l'installation d'un chauffe-eau efficace et l'utilisation de capsules PCM dans le réservoir tampon.

Le coût total et la durée d'amortissement du concept mis en œuvre sont élevés. C'est pourquoi Soltop Energie AG étudie les possibilités de commercialiser le concept de pompe à chaleur air/eau intégrée au toit sans le toit hybride PV, afin d'améliorer la rentabilité. L'installation d'un système PV, c'est-à-dire sans utilisation thermique du rayonnement solaire, est alors recommandée.

Summary

The energy supply of a 100-year-old apartment block in Zurich was converted to a sustainable solution within this pilot and demonstration project. The urban landscape of many Swiss cities is largely characterised by old buildings constructed between 1920 and 1960. The challenge is to decarbonise these buildings, which requires innovative solutions due to façades worthy of protection, limited space, and restrictions on heat pump installations. The WOGENO-Zurich cooperative, which owns the building described at Denzlerstrasse 36, is aiming to completely decarbonise its urban building stock. The 8-family house was previously heated with a gas boiler. The renovation measures include thermal insulation of the attic floor and basement ceiling, the installation of triple-glazed windows and external insulation of the courtyard façade.

The special feature of the project is the conversion of the fossil-fuelled heat generators to two air/water heat pumps, which were installed in the attic of the building with sound insulation, and the on-site installation of a PVT system on the roof, which generates both electricity and heat. The top floor continues to be used as a scree, which is why the heat pump systems were designed to be as compact as possible so as not to restrict this use too much. A particular challenge during realisation was the sound insulation of the heat pumps in the attic due to the neighbouring flats. The PVT system preheats the supply air for the heat pumps in air ducts that run under the PV modules. The combination aims to improve the efficiency of PV electricity production and the COP of the heat pumps. A battery storage system with a capacity of around 14 kWh plays an important role in balancing electricity supply and demand throughout the day.

The renovation resulted in a net zero energy building, even though only one side of the façade was insulated. The two air/water heat pumps achieve a SPF of 3.86, which means a high overall efficiency of the heat supply under the existing framework conditions. The benefit of the PVT system, i.e. the cooling of the PV system with simultaneous heating of the supply air of the heat pumps, proved to be



low. However, with the roof-integrated air/water heat pumps, the refurbishment concept shows a new way in which heat pumps can be used to decarbonise the energy supply of old buildings in urban areas. Energy optimisations of the present implementation are discussed, including the installation of an efficient boiler and the use of PCM capsules in the buffer storage tank.

The total costs and amortisation period of the implemented concept are high. Soltop Energie AG is therefore examining options for marketing the concept of a roof-integrated air/water heat pump without the PV hybrid roof in order to improve the economic viability. The installation of a PV system, i.e. without thermal utilisation of solar radiation, is recommended.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele.....	8
2 Vorgehen und Methode	9
2.1 Anlagenplanung	9
2.2 Messkonzept.....	13
3 Ergebnisse und Diskussion	15
3.1 Realisation	15
3.2 Auswertung des Energie-Monitorings	17
3.2.1 Effekt der Hinterlüftung auf die Effizienz der Wärmepumpe	17
3.2.2 Effekt der Hinterlüftung auf die Effizienz der PV-Anlage	19
3.2.3 Energetische Kenngrößen des Gebäudes	21
3.3 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit	23
3.3.1 Investitionskosten.....	23
3.3.2 Amortisation	23
4 Schlussfolgerungen und Fazit.....	24
5 Ausblick und zukünftige Umsetzung	26
6 Publikationen	26
7 Anhang	27
7.1 Schema des PVT-Dachs.....	27
7.2 Monatliche Histogramme	28
7.3 Leistungszahlen (COP) der eingesetzten Wärmepumpen	31
7.1 Messmittelliste.....	32



Abkürzungsverzeichnis

COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
EBF	Energiebezugsfläche
PCM	Phase change material (Phasenwechselmaterial)
PV	Photovoltaik
PVT	Photovoltaisch-thermisch
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ZEV	Zusammenschluss zum Eigenverbrauch



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Das Stadtbild vieler Schweizer Städte ist geprägt durch einen alten Gebäudebestand, mehrheitlich entstanden zwischen 1920 und 1960. Die Dekarbonisierung dieser Gebäude ruft nach innovativen Lösungen, da die meist markanten Fassaden nicht beliebig wärmedämmbar werden können und der nachträgliche Einsatz von Wärmepumpen an vielen Standorten eingeschränkt oder nicht zulässig ist. Erdsonden können aus Platzgründen oder wegen des Grundwasserschutzes oft nicht realisiert werden und Luft/Wasser-Wärmepumpen sind oft aus Lärmschutzgründen keine Option. Das hier beschriebene 100-jährige 8-Familien Haus an der Denzlerstrasse 36 in 8004 Zürich ist im Besitz der 'Genossenschaft selbstverwalteter Häuser' WOGENO-Zürich. Das Haus ist Bestandteil einer Blockrandbebauung und wurde bis anhin mit Gastherme beheizt. Estrichboden und Kellerdecke sind seit längerem wärmedämmbar, 3-fach verglaste Fenster kamen kürzlich ins Haus, die Hauseingangs- und Estrichtüren wurden luftdicht gemacht (Unterbindung Kamineffekt im Treppenhaus) und die Hoffassade wurde im Zuge dieses Projekts aussen wärmedämmbar. Der Jahresverbrauch für Heizung und Warmwasser lag bislang bei 82 kWh/m² (EBF 690 m²), die Heizkreis-Vorlauftemperatur bei max. 49 °C bei -8 °C Aussentemperatur.

1.2 Motivation des Projektes

Die Genossenschaft WOGENO besitzt weitere gleichartige Liegenschaften wie diese in der Stadt Zürich, die ebenfalls in Quartieren stehen wo sich übliche Installationen von Wärmepumpen (Erdsonden / Luft) nicht anbieten, da sie entweder nicht bewilligungsfähig sind oder zu wenig Landfläche vorhanden ist. Mit dem Engagement in dieses Pilotprojekt will die Genossenschaft herausfinden, wie sie ihren urbanen Gebäudebestand in die Energiezukunft bringt.



Abbildung 1: Südost-Fassade des Wohnhauses in der Denzlerstrasse, Zürich (links). Wärmepumpen-Ausblasgitter im Nordwest-Solardach (rechts).

1.3 Projektziele

Im Vordergrund der Projektstrategie stand die vollständige Dekarbonisierung ohne Feinstaubemissionen (keine Pelletsheizung), hohe Anlagenwirkungsgrade, minimaler Betriebsaufwand und hohe Autarkie. Die Umsetzungs-Massnahmen sollen einem «reduce to the max»-Ansatz folgen, z.B. knappe



technische Auslegungen ohne Wärmekomforteinbussen im Betrieb und sinnvolle Beibehaltung bestehender Anlage-Komponenten wie Warmwasser-Speicher (inkl. WW-Zirkulation), Heizgruppen und Heizverteilung. Keller- und Windenabteile der BewohnerInnen müssen uneingeschränkt vorhanden bleiben, die bestehenden Velo- und Geräteeinstellräume nicht eingeschränkt werden. Es sollen keine Bauarbeiten in den Wohnungen stattfinden, alle Heizungsradiatoren bestehen bleiben, die charakteristische Südost-Fassade zur Strasse hin nicht angerührt werden, die Bewohnerinnen und Nachbarinnen vor Geräuschen im Heizbetrieb verschont bleiben und ein Zusammenschluss zum Eigenverbrauch ZEV entstehen. Die wegfallenden Nischen für Brutvögel, in der alten Dachkonstruktion, sollen durch Nistkästen für Mauersegler ersetzt werden.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Anlagenplanung

Wärmeerzeuger

Der Einsatz einer Wärmepumpe für die Substitution des Gaskessels war von Beginn an gesetzt. Alternativen wie beispielsweise ein Pellets-Kessel scheitern am Platzangebot und an der Feinstaubthematik im städtischen Raum. Erdsonden als Wärmequelle für die Wärmepumpe sind am Standort der Liegenschaft nicht erlaubt (Grundwasser). Eine Fernwärme-Anschlussmöglichkeit ist nicht in Sicht.

Es bleibt der Einsatz einer Luft/Wasser-Wärmepumpe, wobei die lokalen Gegebenheiten für den Einsatz einer konventionellen aussen- oder innenaufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpe im Wesentlichen aus Lärm- und Platzgründen nicht geeignet waren. Diese spezifischen Randbedingungen sind im städtischen Siedlungsgebiet, insbesondere bei älteren Liegenschaften, sehr häufig anzutreffen. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen wurde als Innovation beschlossen, die Wärmepumpen ins Dach zu integrieren. Im vorliegenden Gebäude wird das Dachgeschoss als klassischer Estrich (Stauraum) und für die Wäschetrocknung genutzt. Damit war klar, dass die Wärmepumpenanlage möglichst kompakt in das Dachgeschoss zu integrieren ist, um die bisherige Nutzung nicht allzu stark einzuschränken.

Bauseits ausgeführtes PVT-Dach mit Luftvorwärmung für die Wärmepumpen

Da auch die Installation eines vollflächigen PV-Solardachs beabsichtigt war, wurde als weitere innovative Massnahme die Einrichtung einer Zuluft-Vorwärmung für die Wärmepumpen beschlossen. Dies wurde umgesetzt, in dem bauseits Luftkanäle geschaffen wurden, in denen die Zuluft unter den PV-Modulen entlanggeführt wird. Die Übergänge zwischen den PV-Modulen wurden luftdicht ausgeführt und der Luftraum zwischen Dach und PV-Modulen mit leicht erweiterter Höhe realisiert. Der Lufteinlass ist bei beiden Dächern auf Höhe der Traufe. Die vorgewärmte Luft wird am First in einen grossen, mit Holzplatten ausgeführten Kanal gesogen und gelangt dann zu den Wärmepumpen. Es wurden zusätzliche Ventilatoren eingebaut, die den Druckverlust der Luftvorwärmung ausgleichen. Mit der bauseits installierten PVT-Anlage kann also Wärme von den PV-Modulen zu den Wärmepumpen abgeführt werden, was sowohl die Effizienz der PV-Stromproduktion erhöhen soll, da die Module durch den Wärmeentzug kälter sind, als auch den COP der WP verbessern soll, da die Temperatur der Zuluft angehoben wird.



Komponenten/Ausrüstung

Alle weiteren berücksichtigten Kriterien wie Schall, eigene Stromproduktion, hoher Eigenverbrauch und hohe Autarkie haben zu folgendem Lösungsansatz geführt:

- Luft/Wasser-Wärmepumpen-Kaskade mit zwei M-Tec WPLK 618, drehzahlregelt, Leistung pro WP (in kW @ T_a/T_{VL}): 13 kW @ -7/52, 17 kW @ 2/35, Minimalleistung: 3.3 kW @ 2/35, 5.8 kW @ 2/55.
- Soltop-Energiedach, vollintegrierte PV-Anlage, 24.2 kW_p, verteilt auf das Südostdach (11.8 kW_p) und das Nordwestdach (12.4 kW_p), ausgebildet als Luftkollektor (hinterlüftete PV-Module).
- Abschattungseffekte, bedingt durch die Satteldachgauben, werden durch den Einsatz von Modul-Optimizer minimiert.
- Getrennte WP-Zuluftkanäle mit minimalem Druckverlust für die beiden Dachhälften im Giebelbereich.
- Frischluft-Eintrittsgitter im Traufbereich stellen den grössten Druckverlust im System dar und sorgen damit für eine gleichmässige Durchströmung des gesamten Hybrid-Kollektors.
- Jede Dachhälfte verfügt über einen drehzahlvariablen Axialventilator für die Zuführung der Luft zu den Wärmepumpen.
- Ein Druckdifferenz-Sensor liefert den Sollwert für die Drehzahlregulierung der beiden Axialventilatoren – der Druck auf der Eintrittsseite der Wärmepumpen wird im Betrieb auf Umgebungsdruck gehalten (+/- ca. 3 Pa).
- Wärmespeicher 2'000 Liter mit der Möglichkeit zum Befüllen mit PCM-Kapseln.
- Bestehender Warmwasserspeicher 500 Liter mit einem Wärmetauscher von 6 m². Dieser wird zur Minimierung des Einsatzes grauer Energie in der Sanierung weiter betrieben.
- Batteriespeicher, BYD B-Box, Hochvolt Lithium, nutzbare Kapazität 13.8 kWh.
- Elektrodurchlauferhitzer 9 kW für die Eigenverbrauchsoptimierung und Notheizung – leistungsregelt (Fronius Ohm-Pilot).
- Leitsystem mit Eigenverbrauchsoptimierung durch Energiemanagementsystem E-Smart.
- Erneuerung Hausanschlusskasten und Hauptverteiler, Bildung einer Eigenverbrauchsgemeinschaft ZEV.

Die vollständig ins Dach integrierte, hybrid genutzte PV-Anlage mit den zwei drehzahlregelten Luftwärmepumpen stellt das Herz der Anlage dar. Ergänzt wird die Anlage durch eine Batterie und einen Wärmespeicher. Der Wärmespeicher könnte zusätzlich mit PCM-Elementen befüllt werden um die Wärmekapazität im nutzbaren Bereich von 45°C- 55°C deutlich zu erhöhen (Faktor 2 -3). Die bestehende Wärmeverteilung mittels Radiatoren wird weiter betrieben – die Vorlauftemperatur beträgt ca. 46°C bei -8°C Umgebungstemperatur.

Das Prinzipschema (Abbildung 2) verdeutlicht die Funktion der PVT-Anlage als Vorwärmer der Zuluft der Wärmepumpen. Die thermisch aktive Fläche beider Dachseiten beträgt total ca. 200 m². Die Besonderheit dieses Anlagenkonzepts ist u.a. die Luftführung der Luft-Wärmepumpen im Dachbereich (Abbildung 3). Angesogen auf der ganzen Länge oberhalb der Dachrinnen, gelangt die Aussenluft in den Zwischenraum von Unterdach und PV-Modulen, steigt zum Dachgiebel auf und strömt dann in einem für beide Dachhälften getrennten Kanal zum Standort der Wärmepumpen und wird den Verdampfern zugeführt.

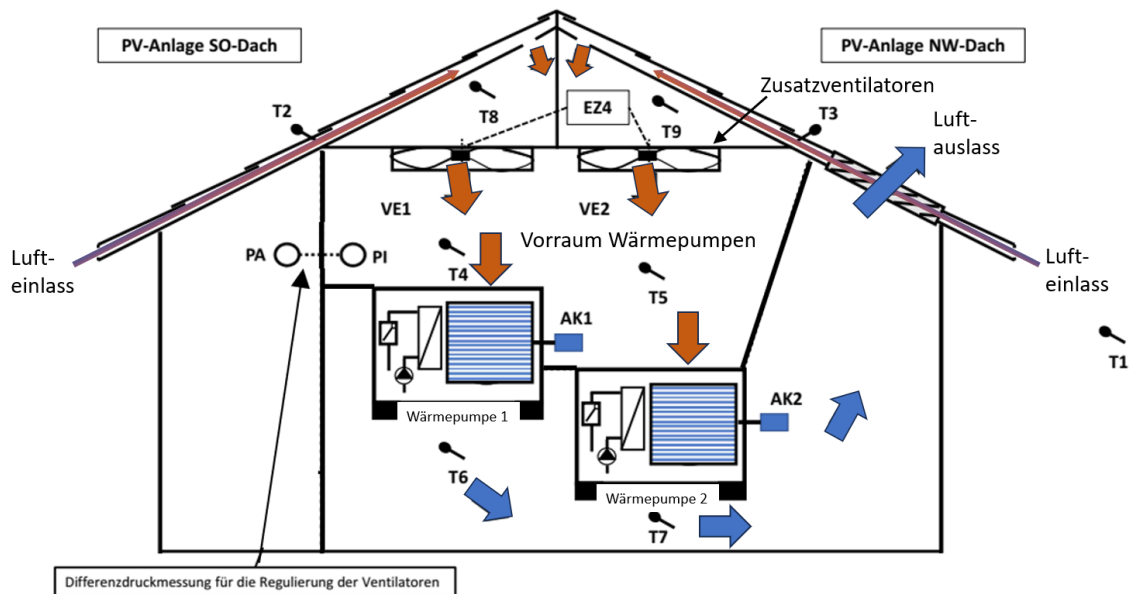


Abbildung 2: Prinzipschema der Luftführung zur Versorgung der Wärmepumpen (farbige Pfeile) – vom Ansauggitter im Traufbereich bis zum Ausblasgitter.

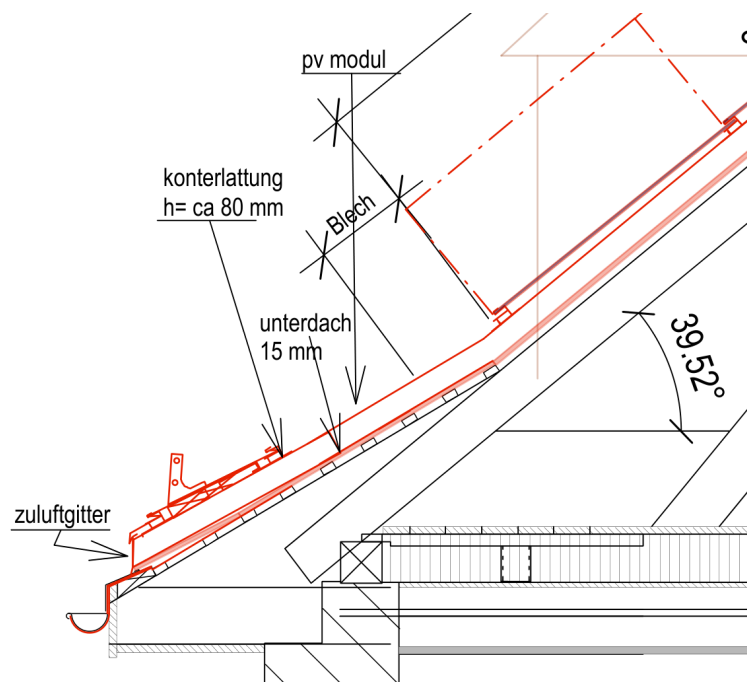


Abbildung 3: Detailschema des PVT-Dachs zur Luftvorwärmung mit Ausführung bauseits.

Die Luftmenge wird für jede Dachhälfte separat geregelt, je nach Solareinstrahlung und entsprechender Wärmeentwicklung. Am Morgen wird z.B. nur die Südost-Dachseite von der Luft durchströmt, am Mittag beide Dachhälften und am Nachmittag hauptsächlich die Nordwest-Dachhälfte. Falls notwendig, kann jede Dachhälfte die nötige Luftmenge (max. ca. 14'000 m³/h) für beide Wärmepumpen bereitstellen. Zur Kühlung der PV-Anlage mit entsprechender Effizienzsteigerung, sind die Axialventilatoren auch in Betrieb, wenn die Wärmepumpen nicht in Betrieb stehen. Die Ventilatoren sollen dabei so angesteuert



werden, dass der Mehrertrag der PV-Module durch Kühlung (+0.4% pro 1°C Temperaturabsenkung) deutlich über dem Stromverbrauch der Ventilatoren liegt.

Die Aufstellung der Wärmepumpen im Dachstock, zusammen mit der speziellen Luftführung, führt zu einer Schallreduktion zu den benachbarten Liegenschaften – tatsächlich sind die Wärmepumpen ausserhalb des Gebäudes auch bei Volllast nicht wahrnehmbar. Ausserhalb des Gebäudes sind keine Komponenten oder Aufbauten erkennbar, ausser dem vollintegrierten Solardach und dem Fortluftgitter.

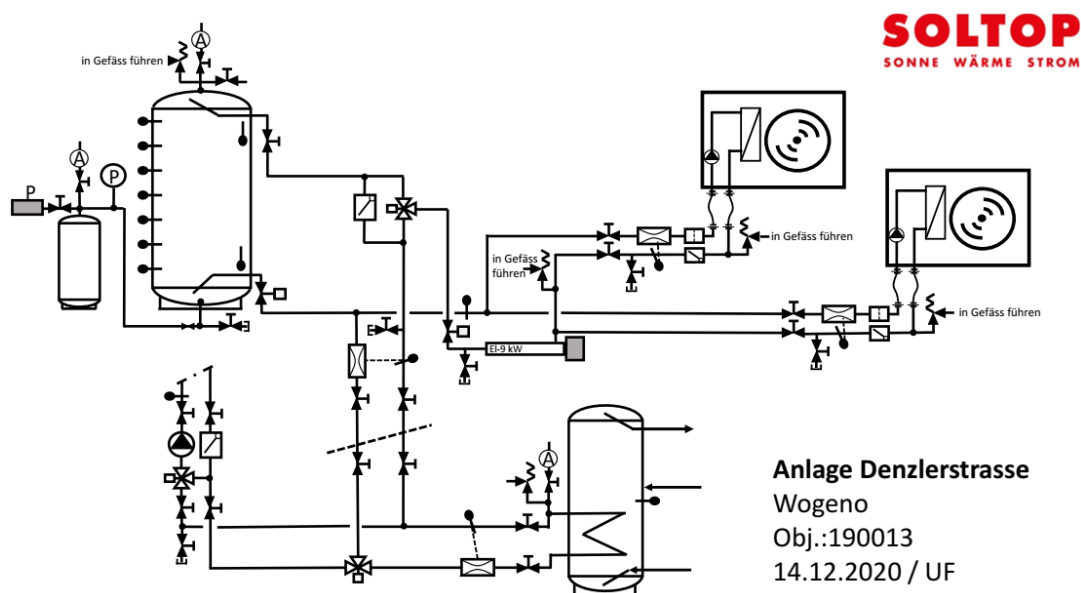
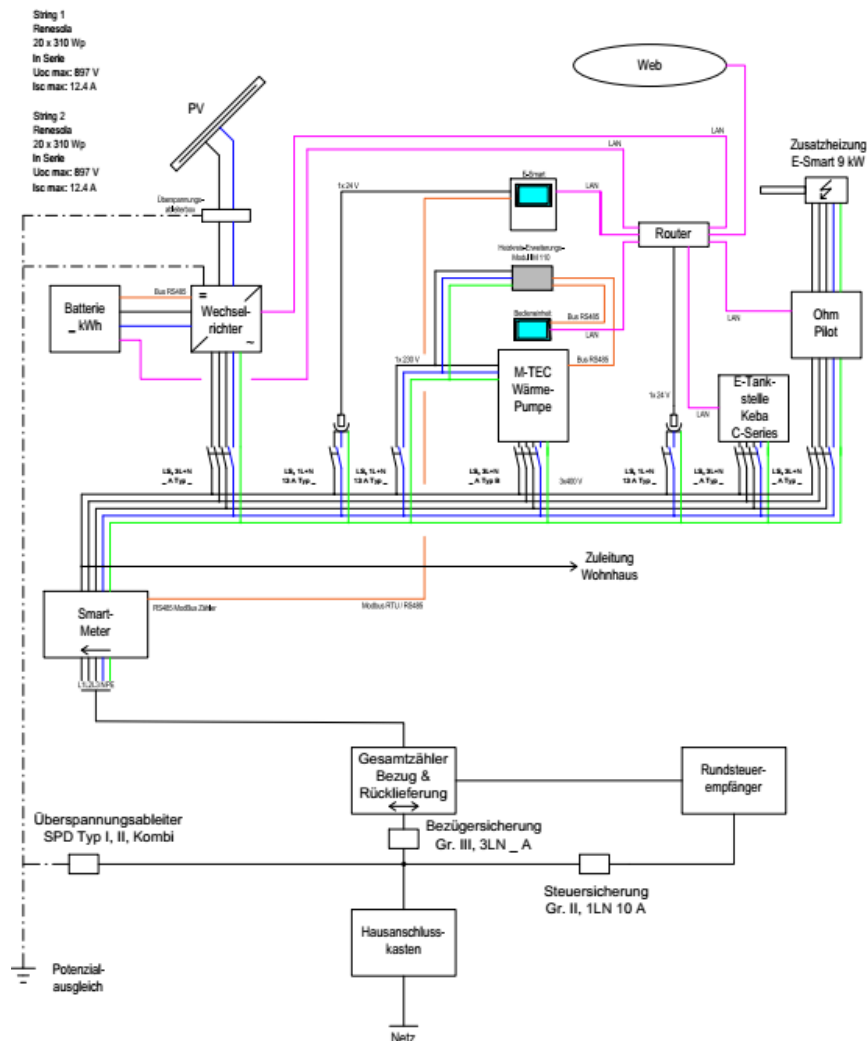


Abbildung 4: Hydraulikschema der Heizungsanlage.

Beide drehzahlgesteuerten Luft-Wärmepumpen sind als Kaskade miteinander verbunden. Sowohl die Laufzeiten der einzelnen Wärmepumpen als auch die verbrauchsgerechte Bereitstellung der Wärme für Warmwasser und Heizung werden auf Basis von definierten Kriterien geregelt (z.B. Nutzung PV-Strom, Pufferbewirtschaftung). Beide Wärmepumpen werden parallel für Heizung sowie Warmwasser eingesetzt, bei Aussentemperaturen von -10°C stehen bis zu 25 kW Heizleistung zur Verfügung.

Das Energiemanagementsystem (EMS) E-Smart regelt alle elektrischen Energieströme vom Solardach zur Wärmepumpe, zum Hausverbrauch, zum Batteriespeicher, zum Elektrodurchlauferhitzer (Ohm-Pilot), zur Rückspeisung ins Stromnetz und wieder zurück. Das EMS sorgt in Kombination mit dem Leitsystem für die Maximierung des Eigenverbrauchs bei gleichzeitiger Gewährleistung des Komforts der Bewohner.



2.2 Messkonzept

13/33

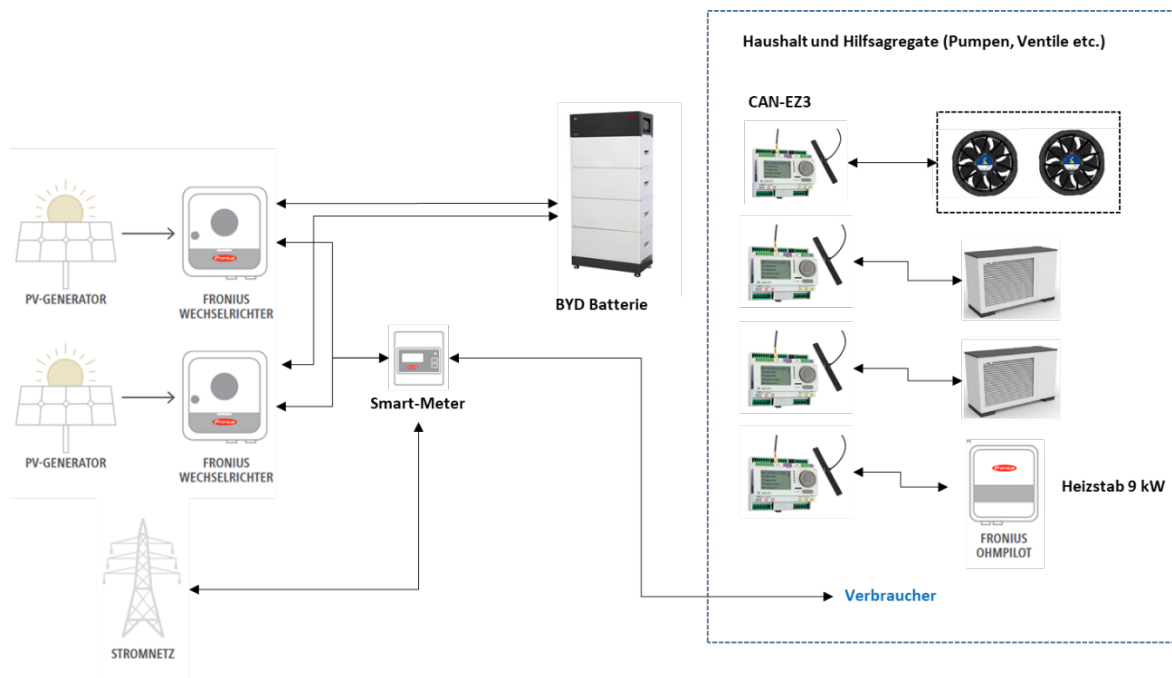


Abbildung 6: Bilanzierung der elektrischen Energieströme.

Quantifizierung der COP-Verbesserung durch die Luft-Vorwärmung

Mit Hilfe der sekundärseitigen Wärmemengenzähler beider Wärmepumpen und der elektrischen Leistungsaufnahme der Kompressoren, kann der COP der WP-Anlage berechnet werden gemäss:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{WP1} + \dot{Q}_{WP2}}{P_{el_{WP1}} + P_{el_{WP2}}} \pm 5.1\%$$

- mit:
- Wärmeabgabeleistung der WP, $\dot{Q}$
 - elektrischer Leistungsbezug der WP, P_{el}
 - Messunsicherheit gemäss Anhang 7.1

Zusätzlicher Energiebedarf der Ventilatoren

Die Inverter der beiden Lüfter geben direkt die Leistungsaufnahme per Modbus an die TA-Steuerung weiter, wodurch deren Strombedarf direkt ausgelesen werden kann. Die Messungenauigkeit beträgt dabei 3 %.

Lärmemissionen der beiden Lüfter und Wärmepumpen

Dazu werden Handmessungen mit einem Schallpegelmessgerät durchgeführt.

Analyse Energiebilanz des MFH

Haushaltsstrom (inkl. elektrischer Energie für die Wärmeerzeugung und -verteilung) und PV-Ertrag stehen über den SmartMeter in Viertelstundenschritten zur Verfügung. Der Verbrauch der wesentlichen Komponenten der Heizungsanlage (Wärmepumpen, Lüfter, Heizstab) stehen über die entsprechenden Stromzähler zur Verfügung. Die elektrische Aufnahme zusätzlicher Pumpen (zum Beispiel Heizkreis) werden nicht einzeln erfasst, dieser ist jedoch im Gesamtstrom des SmartMeters enthalten, und er kann bei Bedarf geschätzt werden (geringer Verbrauch im Vergleich zu den Wärmepumpen). Dies erlaubt die Berechnung von Eigenverbrauchsgrad, Autarkiegrad und Netzaufwandszahl. Die Wärmeenergiebilanz



kann über die vier verbauten Wärmemengenzähler (beide WP, Boiler und Verbraucherkreis) mit und ohne Berücksichtigung der elektrischen Energieaufnahme des Heizstabes berechnet werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Realisation

Die Dachsanierung und die Installation von PV-Dach und Wärmepumpenanlage wurde im Herbst 2020 innerhalb von 2 Monaten wie folgt ausgeführt:

Betonfundamente auf Mehrschichtholzplatten, welche mit den Holzbalken verschraubt werden, sichern am Aufstellort der Wärmepumpen Baustatik und Körperschall-Absorption (Abbildung 7, links). Unter dem 2'000 Liter Wärmespeicher werden ebenfalls Mehrschichtplatten verschraubt und zusätzlich eine Auffangwanne für ev. Leckagen ausgebildet. Partiiell entfernte Isofloc Dachboden-Dämmung wird später wieder ergänzt.

Der Abbruch von fünf Einzel- und Doppelkaminen schafft Raum für die neue Heizzentrale, verhindert Verschattung auf dem Solardach und gibt dem Gebäude einen kaminlosen, modernen Auftritt. 100-jährige Biberschwanz-Ziegeleindeckung weicht dem PV-Solardach.



Abbildung 7: Betonfundamente für WP-Aufstellung (links) und Dach nach Abbruch der Kamine und Entfernung der Ziegel (rechts).

Einbringung von Geräten und Speicher mittels Pneukran durch temporärer Dachöffnung (Abbildung 8, links). Die Luft-Ausblasnische der Wärmepumpen als «negativ Gaube» wird mit Sturmregenwasser-Auffangfläche und Ablauf versehen. Die Nische soll später für eventuellen Austausch von Grosskomponenten benützt werden können. Die Wärmepumpen werden mit «Gummifüssen» eingebracht und aufgestellt. Diese Körperschall-Dämmelemente wurden anhand Lastaufnahmegewicht und Frequenzspektrum für jeden Wärmepumpen-Fuss einzeln berechnet und hergestellt.



Abbildung 8: Einbringung einer Wärmepumpe (links) und Luft-Ausblasnische beider Wärmepumpen.

Zwei begehbare Luftkanäle werden unter dem Dachgiebel für beide Dachhälften getrennt geführt (Abbildung 9, links). Hier strömt die vorgewärmte Aussenluft, die aus den Zwischenräumen von Unterdach und PV-Modulen angesaugt wird, zu den Wärmepumpen. Die luftdurchströmten Räume, in denen die Wärmepumpen stehen, sind schall- und wärmeisoliert.



Abbildung 9: Begehbare Luftansaugkanäle unter Dachgiebel (links), Technikraum mit einer der Wärmepumpen (A), einem der Axialventilatoren (B) und dem gedämmten und beheizbaren Ausdehnungsgefäss (C) (rechts).

Der 500 Liter Register-Warmwasserspeicher mit 6 m² Wärmetauscherfläche (Abbildung 10, links) sowie die Heizgruppe werden von der alten Gasheizung übernommen und stehen unverändert im Keller. Der 13.8 kWh Lithium-Batteriespeicher steht ebenfalls im ehemaligen Heizungskeller. Die Verbindungsleitungen vom ehemaligen Heizungskeller zur neuen Heizzentrale im Dachgeschoss führen durch zwei ausser Betrieb gesetzte Kamine. Der 100-jährige elektrische Hausanschlusskasten (HAK) und der Elektroverteilkasten werden erneuert, es wird ein Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) gegründet, mit Privatzählern in den Wohnungen



Abbildung 10: Warmwasser-Speicher im Keller (links), Wärmepumpen-Luftansauggitter über der Regenrinne im Solardach (rechts).

Mit der Idee des Pilotprojekts wurden bei den Bewohnerinnen offene Türen eingerannt und bis heute sind die Rückmeldungen positiv, ja teilweise sogar freudig. Reklamationen zu Heizkomfort und Störgeräuschen gab es zu Beginn lediglich aus der unmittelbar unter der neuen Heizzentrale liegenden Wohnung. Dem konnte mit Software-Updates und hydraulischem Abgleich begegnet werden. Während der Bauzeit und den nachfolgenden Testläufen war der Wärmekomfort jederzeit nahtlos gewährleistet, dies durch eine temporäre Schnittstelle innerhalb derer schnell von alter (Gastherme) auf neue (Wärmepumpen) Wärmeherzeugung hin und her geschaltet werden konnte. Seit Betrieb der Anlage gab es keine Ausfälle, die zu Einbussen im Wärmekomfort geführt hätten und die Bewohnerinnen mussten sich in keiner Weise umgewöhnen. Es wurde entschieden, die ZEV-Verwaltung (Privat- und Allgemein-Stromabrechnung) selbst auszuführen. Entsprechend wurden private Stromzähler in den Wohnungen installiert, welche periodisch von dem dafür bestimmten Hausbewohner abgelesen und ausgewertet werden.

3.2 Auswertung des Energie-Monitorings

3.2.1 Effekt der Hinterlüftung auf die Effizienz der Wärmepumpe

Ein zentrales Ziel des Anlagenkonzept ist es, die Zuluft der Wärmepumpen zu erwärmen, indem sie unter den beiden PV-Dächern durchgeleitet wird. Durch diese angestrebte Temperaturerhöhung der Aussenluft sollen die Wärmepumpen mit höheren COP laufen und im Betrieb entsprechend weniger Strom benötigen. Die Lufterwärmung bereitete auch im Sommer keine Probleme für die Wärmepumpen; es wurden keine zu hohen Lufttemperaturen erreicht, die einen Betrieb der WP verhindert hätten.

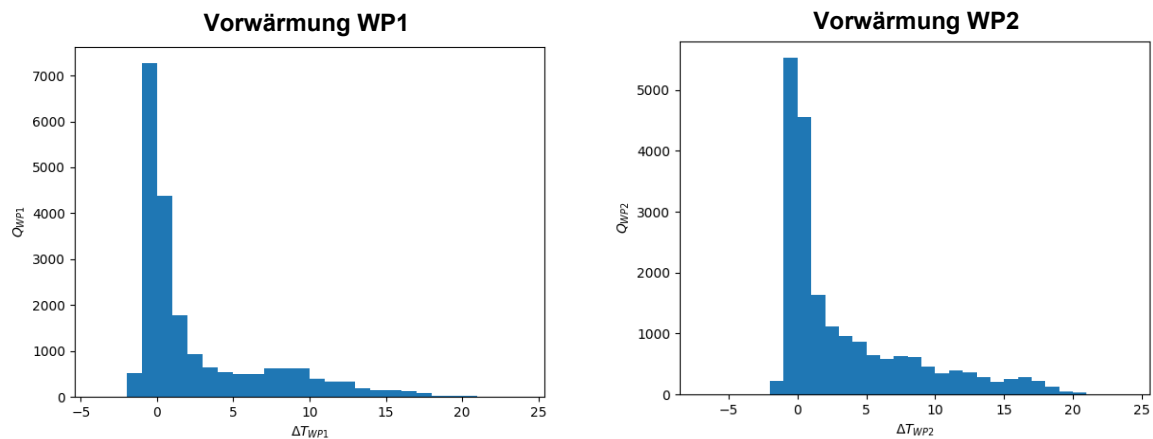


Abbildung 11: Histogramme für 12 Monate, welche angeben, wieviel Wärme (Q , in kWh) am WP-Kondensator bei welcher Temperaturerhöhung der WP-Zuluft abgegeben wurde ($\Delta T_{WP} = \text{Lufttemperatur am WP-Einlass minus Lufttemperatur der Aussenluft, in Kelvin}$).

Abbildung 11 zeigt die von den WP abgegebene Wärme über der jeweiligen Temperaturerhöhung, bei der diese Wärme erzeugt wurde. Die Temperaturerhöhung der Luft (ΔT_{WP} , in 1-Kelvin-Klassen zusammengefasst) ist die Differenz der jeweiligen Zuluft-Temperaturen am WP-Verdampfer und der aktuellen Aussenlufttemperatur. Die Grafiken zeigen die Auswertung je Wärmepumpe für ein Jahr. Es wird deutlich, dass die Wärmepumpen den Grossteil der Wärme ohne oder mit nur geringer Luftvorwärmung lieferten.

Mit den erhobenen Daten des Monitorings kann der Effekt der Vorwärmung auf die Jahresarbeitszahl (JAZ) nur mit Vereinfachungen und nur grob quantifiziert werden. Wird vereinfacht angenommen, dass sämtliche Wärme bei einer Senktemperatur von 35 °C und bei einer relativen Kompressorleistung von 70 % erzeugt wird, ergibt sich basierend auf Herstellerangaben eine COP-Änderung von 0.134 pro Kelvin ändernder Aussenlufttemperatur (Herleitung siehe Anhang 7.3). Die Anwendung dieses Änderungsfaktors auf Abbildung 11 (mit Gewichtung der COP-Änderung pro Temperaturklasse mit dem Anteil der in dieser Temperaturklasse abgegebenen Wärme an der Gesamtwärme) ergibt, dass die JAZ durch die Vorwärmung circa um 0.34 erhöht wurde. Die JAZ, die im Messzeitraum 3.86 betrug (siehe Kapitel 0), wäre ohne Vorwärmung folglich in etwa bei 3.52 gelegen. Die Effizienz der Wärmepumpen wurde somit um schätzungsweise 10 % erhöht.

Die stärkste Erwärmung erfolgt erwartungsgemäss im Sommer (siehe monatliche Auswertung im Anhang 7.2), wenn Luft/Wasser-Wärmepumpen aber generell bei hohen Lufttemperaturen und deswegen mit hohem COP arbeiten, sie also auch ohne zusätzliche Zuluft-Erwärmung sehr effizient sind. Mit dem im vorherigen Abschnitt aufgeführten Vorgehen kann für den August eine Erhöhung der Monatsarbeitszahl um 0.38 abgeschätzt werden, wobei hier von einer Senktemperatur von durchschnittlich 45 °C ausgegangen wird, da im Sommer ausschliesslich Brauchwarmwasser erzeugt wird.

Ein Grossteil der Wärmeabgabe findet im Winter zum Beheizen des Gebäudes statt, weswegen die WP oft nachts und damit ohne Möglichkeit einer solaren Luftvorwärmung betrieben werden. Nachts kann sogar eine leichte Abkühlung der Zuluft geschehen, falls die Dachhaut, also die PV-Module, aufgrund der atmosphärischen Gegenstrahlung unter Umgebungsluft abkühlt.

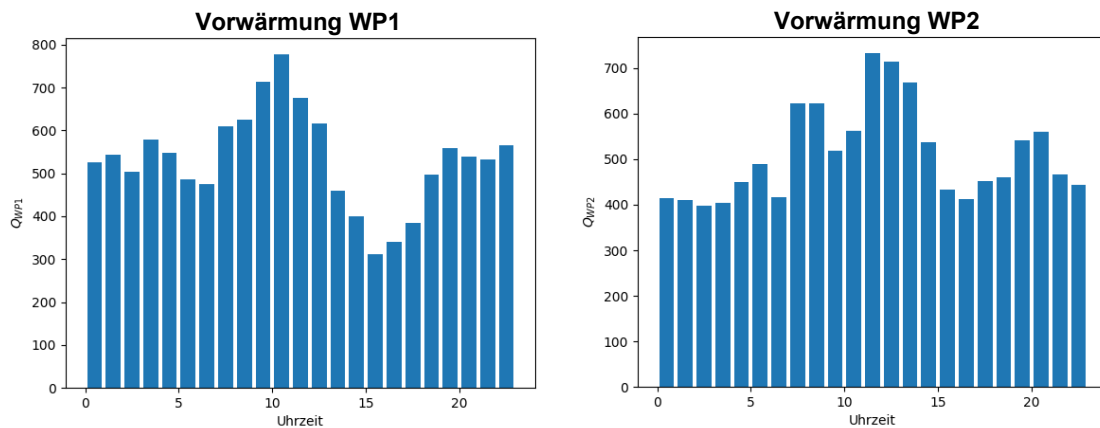


Abbildung 12: Tagesverlauf der von den WP gelieferten Wärme ans Gebäude (Wärme Q) im Winter (November 22 - Februar 23).

Potenziale, die Vorwärmung stärker zu nutzen, liegen im Verschieben der Laufzeiten der Wärmepumpen Richtung Mittag/Nachmittag, da dann die Aussentemperatur und die Solarstrahlung in der Regel am höchsten sind. Hohe Aussentemperaturen machen die WP effizienter und eine höhere Solarstrahlung erlaubt zudem den Betrieb der WP mit PV-Strom und zusätzlich die gewünschte Vorwärmung der WP-Zuluft in der PVT-Anlage. Abbildung 12 kann entnommen werden, dass hier Verbesserungspotenzial vorhanden ist: insbesondere WP1 lieferte viel Wärme am Vormittag und weniger am Nachmittag, bei beiden WP hat die Wärmeerzeugung nachts einen relevanten Anteil. Die zeitliche Verschiebung ist in der Anlagensteuerung teils umgesetzt, könnte aber optimiert werden. Zusätzlich kann auch mit einer Verlängerung der Laufzeiten der Wärmepumpen gearbeitet werden, wobei die Temperatur der Speicher leicht überhört wird. Im vorliegenden Gebäude sind die Potenziale zur Speicherüberladung aber begrenzt, da keine grossen Wasserspeicher für Raumwärme und Warmwasser installiert wurden und da das Gebäude als weitere thermische Speichermasse wegen der Radiatoren nicht eingesetzt werden kann.

3.2.2 Effekt der Hinterlüftung auf die Effizienz der PV-Anlage

An drei aufeinanderfolgenden, meteorologisch sehr ähnlichen Tagen im August mit hoher Sonneneinstrahlung wurde der Betrieb der Hinterlüftung und damit die Kühlung der PV-Module variiert und die resultierende Modultemperatur und der PV-Tagesertrag analysiert. Durch die rückseitige Kühlung der PV-Module mit Durchleitung der Zuluft der Wärmepumpen kann die Effizienz der PV-Module erhöht werden (Leistung 0.42 %/Kelvin gemäss Datenblatt Hersteller). Als Basis für den Vergleich wurde der PV-Tagesertrag ohne Hinterlüftung (Ventilatoren gesperrt) genommen und dieser mit Tageserträgen bei mittlerer Drehzahl und bei hoher Drehzahl der Ventilatoren verglichen. Der PV-Mehrertrag durch die Modulkühlung wurde der aufgewendeten elektrischen Energie für die Ventilatoren gegenübergestellt. Die Aussentemperatur lag an den Messtagen am Morgen und am Mittag bei rund 15 °C bzw. 24 °C.

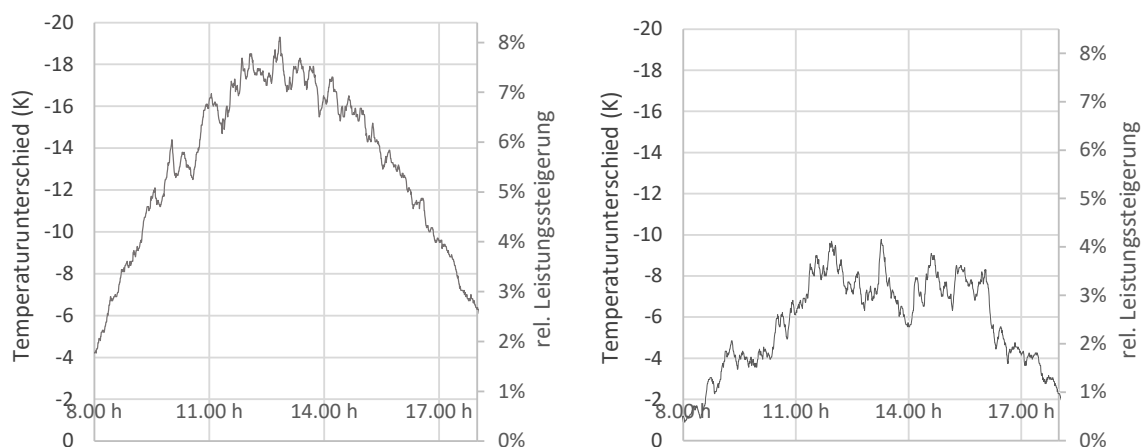


Abbildung 13: Gemessene Kühlung (Temperaturunterschied) der PV-Module durch aktive Hinterlüftung und daraus berechnete Effizienzsteigerung der PV-Module im Tagesverlauf auf dem Südost-Dach. Links: Vergleich keine versus starke Hinterlüftung, rechts: Vergleich keine versus schwache Hinterlüftung.

Bei voller Leistung der Axialventilatoren (Ansteuerung mit 10 Volt) können die Module mittags ca. 18 K abgekühlt werden (Abbildung 13, links). Durch die hohe Drehzahl der Ventilatoren ist der elektrische Verbrauch der Ventilatoren aber grösser als der zusätzliche Ertrag der PV-Module durch die Kühlung, d.h. diese starke Kühlung der Module lohnt sich energetisch nicht. Der normale Kühlbetrieb der Steuerung mit mittlerer Drehzahl (Ansteuerung mit 4 V, 0.7 kWh/d Stromverbrauch) führt hingegen zu einer positiven Strombilanz mit rund 1.5 % mehr verfügbarem PV-Ertrag (Tabelle 1). Die Tages-Messungen zeigen den Effekt der Modul-Kühlung exemplarisch für die Sommermonate und schon hier ist der Mehrertrag¹ in der Grössenordnung von 1.5 % klein. Bei geringerer Einstrahlung und auch bei niedrigeren Aussentemperaturen, wie v.a. in den Wintermonaten, fällt die Effizienzsteigerung der PV-Module durch die Hinterlüftung noch geringer aus.

Tabelle 1: Bilanz der Effekte der aktiven Hinterlüftung der PV-Dächer auf die Netto-Stromproduktion der PVT-Anlage (Messungen an drei meteorologisch sehr ähnlichen Tagen, PV-Ertrag strahlungskorrigiert unter Verwendung von Tages-Einstrahlungssummen am SMA-Standort Fluntern).

	Referenz: PV ungekühlt (kWh)	PV schwach luftgekühlt (kWh)	PV stark luftgekühlt (kWh)
PV-Tagesertrag	110	112.4	114.4
Mehrertrag PV wg. Kühlung (A)	-	2.4	4.4
Strom Ventilatoren (B)	-	0.7	6.1
Bilanz (A - B)	-	1.65	-1.74
rel. Zuwachs PV-Ertrag	-	1.5 %	-1.5 %

¹ Mehrertrag: Die wegen der aktiven Kühlung gesteigerte Effizienz der PV-Module führt zu einer erhöhten Stromproduktion der PV-Module. Von dieser muss aber die für die aktive Kühlung benötigte elektrische Energie der Ventilatoren abgezogen werden.



3.2.3 Energetische Kenngrössen des Gebäudes

Mit dem Monitoring wurden Bereitstellung und Verbrauch von Wärme und Strom im Gebäude gemessen. Die hier dargestellten Analysen umfasst 12 Monate von März 2022 bis Februar 2023. Die monatliche Wärmebilanz des Gebäudes ist in Abbildung 14 gezeigt. Aufgrund der mässigen Wärmedämmung des Altbaus wird nur in zwei Sommermonaten nicht geheizt. Während der Sommermonate wird ein Teil der PV-Überschüsse mittels Heizstab für die Warmwassererzeugung genutzt. Mit einer Wärmeabgabe für Raumwärme von 28 MWh/a ergeben sich mit 691 m² Energiebezugsfläche eine Energiekennzahl für Raumwärme von 41 kWh/m²a. Zusammen mit dem Warmwasserverbrauch von 12.4 MWh/a (bzw. 18 kWh/m²a) ergibt sich eine Energiekennzahl für Warmwasser und Raumwärme von 59 kWh/m²a.

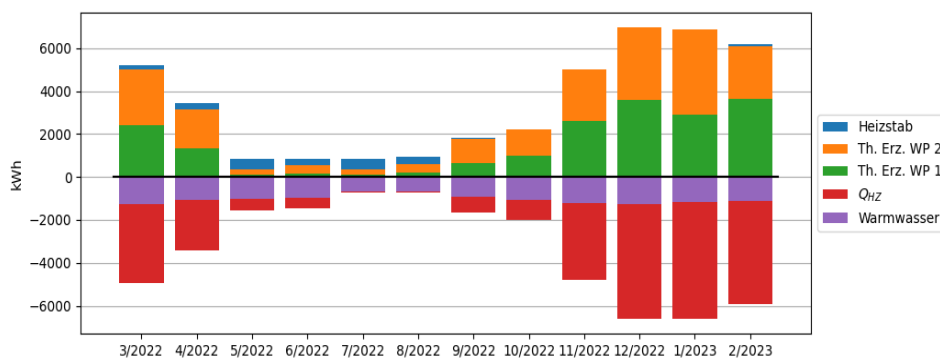


Abbildung 14: Monatliche Wärmebilanz des Gebäudes.

Beim elektrischen Strom (Abbildung 15) zeigt sich beim Netzbezug eine weitgehende Autarkie in den Sommermonaten und ein relevanter Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz in den Wintermonaten. Der Stromverbrauch im Gebäude lag gesamthaft bei 20 MWh/a, bei einem PV-Ertrag von 21 MWh/a. Der Netzbezug lag bei rund 9 MWh/a, mit klarem Schwerpunkt dieses Bezugs im Winter. Im Gebäude wird wie vor der Sanierung mit Biogas gekocht.

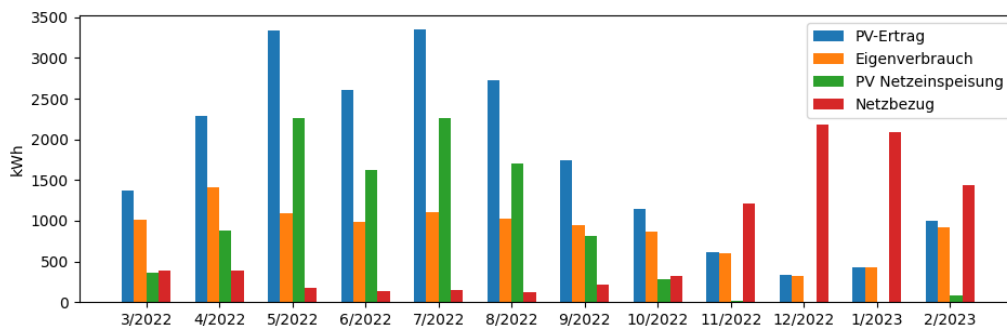


Abbildung 15: Stromproduktion bzw. -verbrauch im Gebäude pro Monat (März 22 bis Februar 23).

Die gemeinsamen Jahresarbeitszahlen beider Wärmepumpen (abzüglich der vom Heizstab bereitgestellten Wärme), belaufen sich auf JAZ_{WW} 3.44, JAZ_{RW} 4.03 und gesamthaft JAZ 3.86. Ohne Stromverbrauch der Axialventilatoren liegen die Werte bei JAZ_{WW} 3.54, JAZ_{RW} 4.16 und gesamthaft JAZ 3.94. Die JAZ_{WW} enthält Speicherverluste aber auch Zirkulationsleitungsverluste.



Mit den nachstehenden energetischen Kennwerten² kann das Energiesystem aus Wärmepumpen-Heizung und PV-Stromerzeugung gesamthaft bewertet werden:

Eigenverbrauchsgrad:
$$R_{\text{Eigenverbr.grad}} = \frac{Pel_{\text{Rest}} + Pel_{\text{Batterie}} + Pel_{\text{WP1}} + Pel_{\text{WP2}} + Pel_{\text{Lüfter}} + Pel_{\text{Heizstab}}}{Pel_{\text{PV1}} + Pel_{\text{PV2}}}$$

Mit u.a.: - Haushaltsstrom, P_{elRest}
- PV-Erträge Dach 1 und 2, P_{elPV1} und P_{elPV2}

Autarkiegrad:
$$R_{\text{aut}} = \frac{W_{\text{eig}}}{W_{\text{ges}}}$$

mit: - Eigenverbrauch, W_{eig} , derjenige PV-Ertrag, der zeitgleich im Gebäude verbraucht wird oder in der PV-Batterie gespeichert wird.
- Gesamter elektrischer Energieverbrauch, W_{ges}

Netzaufwandszahl:
$$R_{\text{net}} = \frac{W_{\text{NB}}}{E_{\text{nutz}}}$$

mit: - Netzbezug (elektrische Energie), W_{NB}
- Gesamt-Nutzenergiebedarf (Strom und Wärme), E_{nutz}

Die Jahresbeträge der drei Kennwerte (Abbildung 16, ganz rechts) zeigen, dass der Altbau nach der Sanierung einen hohen energetischen Standard hat. Während acht Monaten über den Sommer ist der Autarkiegrad sehr hoch bei 70 bis 90 %. Allerdings sinkt er im Winter auf niedrige Werte, da die PV-Erträge dann niedrig sind und die Wärmepumpen zudem lange Betriebsdauern haben. Entsprechend steigt im Winter die Netzaufwandszahl, die wegen der Nutzung von Umweltwärme durch die WP jedoch generell niedrig ist. Der hohe Eigenverbrauchsgrad im Winter zeigt, dass die PV-Erträge gut direkt im Gebäude eingesetzt werden. Sie werden entweder von den Haushalten, den Wärmepumpen oder von der Batterie bezogen.

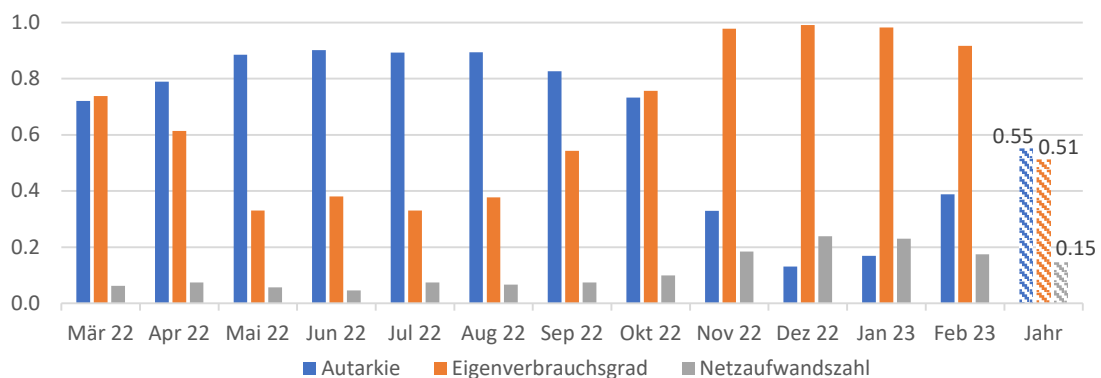


Abbildung 16: Monats- und Jahreswerte für Autarkie, Eigenverbrauchsgrad und Netzaufwandszahl.

² Details siehe: Bamberger, E., Haberl, R., Reber, A., Battaglia, M., Luzzatto, M., Borner, M., Haller, M., 2019. CombiVolt - Steigerung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs durch intelligente Wärmepumpen; Stand der Technik heute – Chancen für die Zukunft (Schlussbericht), Im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE. SPF Institut für Solartechnik, Rapperswil.



3.3 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

3.3.1 Investitionskosten

Die Wohnbaugenossenschaft WOGENO als Bauherrin legt grossen Wert auf qualitativ hochwertige Komponenten und eine fachlich und qualitativ einwandfreie Ausführung aller Arbeiten. Dementsprechend wurden im Zuge der Realisierung weitere bauliche Massnahmen realisiert, ohne unmittelbaren Bezug zur Versorgung des Gebäudes mit erneuerbaren Energien. Beispiele sind die zusätzliche Wärmedämmung der Nordwestseite des Gebäudes, der Abriss aller überzähliger Kamine, die komplette Erneuerung der elektrischen Installation und vieles mehr. In der nachfolgenden Kostenzusammenstellung der realisierten Anlage sind deshalb Unsicherheiten bei der Abgrenzung der Kosten enthalten.

In der nachstehenden Tabelle sind die Kosten aus dem Demonstrationsprojekt einer Kostenschätzung gegenübergestellt für eine baugleiche Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage ebenfalls mit Dachintegration aber ohne PVT-Dach. Die Lösung ohne diese PVT-Luftvorwärmung beinhaltet eine vorinstallierte, schalloptimierte Kabine mit den beiden Wärmepumpen, einem Pufferspeicher inklusive anschlussfertiger Elektroinstallation. Die Frisch- und Fortluft wird über dachintegrierte Gitter zu- bzw. abgeführt. Auf zusätzliche Axialventilatoren kann verzichtet werden. Die Kabine wird mit Kran in das dafür vorbereitete Dach integriert. Direkt im Anschluss an die Installation der Kabine wird das Dach wieder geschlossen und die Frisch- und Fortluftgitter eingesetzt.

Tabelle 2: Investitionskosten der realisierten Anlage und einer Variante nur WPs ohne PVT-Luftvorwärmung.

Kostenart	Demo-Projekt	Wärmeversorgung kompakt
Vorstudie / Entwicklung	11'220	0
Planung / Konstruktion	23'612	15'000
Bauleitung	29'523	12'000
Baumeister	5'754	0
Zimmermann vor Ort	36'318	8'000
WP-Kabine vorinstalliert	0	24'000
Dachdecker/Spengler	57'112	10'000
Rückbau Abgasrohr Gaskessel	1'056	0
Heizung-/Sanitärinstallation	22'302	8'000
Elektroinstallation	56'359	6'000
WP komplett mit Zubehör	48'249	40'000
Inox WP-Boiler 1000 l	0	9'500
PV-Dach/Wechselrichter/Batterie mit Zubehör	57'659	0
Gerüst/Mobiles WC	5'621	500
Summe	354'785	133'000

3.3.2 Amortisation

Zur Abschätzung der Amortisationsdauer werden die Jahreskosten (Tabelle 3) für die Energieversorgung des Gebäudes vor und nach der Sanierung betrachtet. Die Investitionskosten können anschliessend durch die Differenz aus den Jahreskosten vor und nach der Sanierung geteilt werden, woraus sich die Amortisationsdauer ergibt. Die Abschätzung erfolgt hier ohne Berücksichtigung von



Kapitalkosten. Alle nachfolgenden Zahlen sind mit Unschärfen behaftet – insbesondere nicht berücksichtigt ist der Effekt der zusätzlichen Wärmedämmung der Nordwest-Fassade.

Tabelle 3: Abschätzung der Jahreserträge und -kosten für die Energieversorgung des Gebäudes vor und nach der Sanierung (mit aktuellen Energiepreisen, Verbräuche gemessen 2022).

Kostenart	Vor Sanierung		Nach Sanierung	
	Energie	Kosten	Energie	Kosten
Jährlicher Bezug Erdgas	56 MWh	11'200 CHF *)	-	-
Jährlicher Bezug aus Stromnetz für 8 Familien	13 MWh	3'510 CHF	9.7 MWh	2'620 CHF
Jährlich Netzeinspeisung PV-Strom	-	-	10.5 MWh	- 1'365 CHF
Jahreskosten Wärme & Strom		CHF 14'710		2'454 CHF *)

*) inkl. Wartung (Variante nach der Sanierung: CHF 1'200/Jahr für Gesamtanlage)

Die Amortisationszeit der Demoanlage gegenüber dem Status «vor Sanierung» (ohne Kapitalkosten und ohne die Berücksichtigung von Fördergeldern) beträgt damit ca. 29 Jahre – nach Abzug aller Fördergelder und Subventionen bleibt eine Amortisationszeit von rund 17 Jahren.

Für die Minimalvariante einer vorgefertigten WP-Kabine ohne PV-Anlage (Investition 133'000 CHF) und ohne Berücksichtigung von Kapitalkosten und Fördergeldern ergibt mit Jahreskosten für Strom und Wartung von 6'260 CHF sich eine Amortisationszeit gegenüber dem Stand vor der Sanierung von ca. 16 Jahren.

4 Schlussfolgerungen und Fazit

Mit der Sanierung wurde die lokale Energieversorgung eines 100-jährigen Gebäudes mit 8 Wohnungen in einer Blockrandüberbauung in der Stadt Zürich erfolgreich dekarbonisiert. Dies wurde erreicht mit Installation zweier Luft/Wasser-Wärmepumpen, welche im Dach des Gebäudes schallisoliert montiert wurden, und durch Nutzung der gesamten Dachfläche zur Strom- und Wärmeerzeugung mittels hinterlüfteter PVT-Anlage. Obwohl Altbau mit nur einer nachgedämmten Fassadenseite, ist das Haus nach der Sanierung ein Netto-Nullenergie-Gebäude. Die Luft/Wasser-Wärmepumpen erreichen eine JAZ von 3.86, was für Luft/Wasser-Wärmepumpen und für ein Gebäude mit mässigem thermischen Dämmstandard und Radiatoren mit hohen Vorlauftemperaturen eine hohe Effizienz bedeutet. Mit einem Ersatz der Radiatoren durch Konvektoren mit Ventilatoren, wie zu Beginn des Projekts vorgesehen, hätte eine noch höhere JAZ erreicht werden können. Eigenverbrauchsgrad und Autarkie sind jeweils hoch. Der Batteriespeicher mit ca. 14 kWh Kapazität hat hier einen relevanten Einfluss, da er hilft, Stromangebot und -nachfrage im Tagesverlauf auszugleichen.

Der Einbau der Wärmepumpen im Dachboden, als eine der Besonderheiten des Anlagenkonzepts, konnte erfolgreich umgesetzt werden. Mit baulichen Massnahmen und Anpassungen des Betriebs wurde erreicht, dass nur minimal Schall in der angrenzenden Wohnung unter den Wärmepumpen anfällt. Zudem treten keine Lärmemissionen via Fort- oder Zuluftkanal auf. Im Betrieb traten keine Probleme mit Schnee auf dem Ausblasgitter auf.



Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der Aufstellung der WP im Dach weitere positive Effekte für den Betrieb der Wärmepumpen entstehen, die aber nicht quantifiziert wurden: da die angesaugte Luft auf Dachhöhe mutmasslich etwas trockener ist als Luft in Bodennähe und da teils eine leichte Vorwärmung der Zuluft stattfindet, müssen die WP im Winter weniger oft abtauen, was Betriebsstrom einspart. Auffallend war zudem, dass die Verdampfer der WP sehr sauber bleiben, was mutmasslich an einer reduzierten Staubfracht der auf grösserer Höhe angesaugten Luft liegt. Der Wärmeübergang von Luft auf Kältemittel bleibt somit hoch und damit auch die Verdampfungstemperatur.

Eine weitere Besonderheit des Anlagenkonzepts ist die Hinterlüftung der PV-Dachflächen zur Erwärmung der Zuluft der Wärmepumpen und zur gleichzeitigen Kühlung der PV-Module, was bei beiden Komponenten zu einer Erhöhung der Effizienz führen sollte. Die Versuche zur Quantifizierung des Effekts der PV-Kühlung zeigen, dass die gewünschte Effizienzerhöhung bei den Wärmepumpen und auch bei der PV-Anlage so gering sind, dass sich der bauliche und betriebliche Mehraufwand nicht lohnt.

Der Kühleffekt fällt bei der PV-Anlage gering aus, da der Wärmeübergang von den Modulen zur ventilierten Luft gering und die Abkühlung der Module somit nicht hoch ist. Zudem verursacht die aktive Hinterlüftung einen Stromverbrauch der Axialventilatoren. Durch die Kühlung werden nur geringe PV-Mehrerträge generiert in der Grössenordnung von 1.5 % im Sommer. Im Winter oder bei geringer Einstrahlung fallen diese weg bzw. sind sie vernachlässigbar.

Die Erhöhung der JAZ der Wärmepumpen durch die Lufterwärmung im PV-Dach fällt mit abgeschätzt 10 % ebenfalls eher gering aus im Vergleich zum Aufwand, das hinterlüftete Dach zu erstellen. Ein wichtiger Grund für die nur geringe Effizienzsteigerung ist, dass der Grossteil der Wärme von den Wärmepumpen im Winter bereitgestellt wird und im Winter die Lufterwärmung aufgrund der jahreszeitlich bedingt reduzierten Tageslänge und geringen Solarstrahlung gering ausfällt.

Die aktive Hinterlüftung der PV-Anlage und die Erwärmung der Zuluft der Wärmepumpen verbessern die Anlageneffizienz im vorliegenden Gebäude also nur in geringem Masse. Ein besserer Effekt auf die Erwärmung der Zuluft und somit eine COP-Erhöhung der Wärmepumpen wäre zu erwarten, wenn vermehrt Wärme tagsüber generiert und gespeichert werden könnte. Dies könnte in Gebäuden erreicht werden, welche über eine Fussbodenheizung verfügen, da diese es erlaubt, einen Teil der Gebäudemasse thermisch zu aktivieren und somit die Laufzeit der Wärmepumpen stärker auf den Tag zu konzentrieren.

Mit Einbau eines Boilers üblicher Grösse mit dazu wärmepumpentauglichen Wärmetauschern könnte die Warmwassererzeugung vermehrt tagsüber bei höheren Aussentemperaturen und zudem mit geringerer Grädigkeit im Sekundärkreis der WP erfolgen, was beides die JAZ der WP erhöht. Zusätzlich ist der Pufferspeicher im vorliegenden Gebäude vorbereitet, Latentwärme-Kapseln aufzunehmen. Mit der Nachrüstung dieser Kapseln kann die Speicherkapazität des Pufferspeichers in etwa verdoppelt werden. Mit dieser zusätzlichen Massnahme könnte die Laufzeit der Wärmepumpe noch stärker auf den Tag verschoben werden und die JAZ weiter verbessert werden.

Die realisierte Energieversorgungsanlage inkl. hinterlüfteter PV-Anlage wurde mit hohem Standard gefertigt und hat mit 29 Jahren (ohne Subventionen) eine relativ hohe Amortisationsdauer. Betrachtet man nur die Wärmeerzeugung und geht man von der Integration einer vorgefertigten Kabine in das Dach aus, in welcher die Wärmepumpen stehen und welche mit zwei Luftkanälen mit der Aussenluft verbunden wird, belaufen sich die Investitionskosten auf schätzungsweise 133'000 CHF. Hier resultiert beim Vergleich der resultierenden Jahreskosten mit denjenigen der Wärmeversorgung des Gebäudes vor der Sanierung eine Amortisationsdauer von ca. 16 Jahren (ohne Subventionen für die Sanierung). Die Integration der Wärmepumpen in den Dachstock ist somit aufwändig, allerdings können sich mit der Dachaufstellung je nach Rahmenbedingungen relevante Vorteile gegenüber konventionell aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen ergeben.



5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Soltop Energie AG prüft zurzeit die Möglichkeiten, das Konzept der dachintegrierten Luft/Wasser-Wärmepumpen breiter zu vermarkten – dann allerdings ohne PV-Hybrid-Dach, wobei die Installation einer nicht aktiv hinterlüfteten PV-Anlage selbstverständlich anzustreben ist. Im Vordergrund steht, die Kosten zu reduzieren (beispielsweise durch die Fertigung kleiner Serien) um die Konkurrenzfähigkeit zu anderen Konzepten zu verbessern.

Zudem werden folgende Anpassungen an der bestehenden Anlage diskutiert und ggf. umgesetzt:

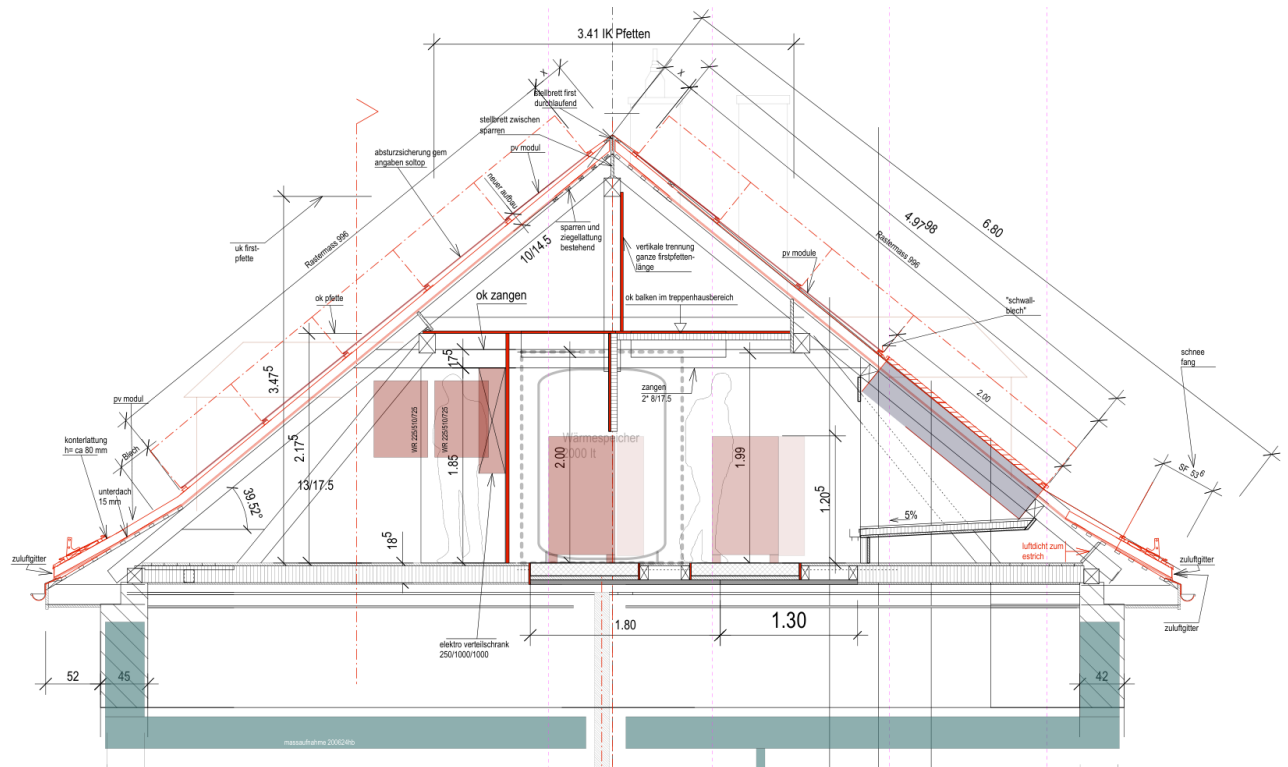
- Einbau von Hochleistungs-WP-Boiler mit mehr Volumen und grosser WT-Fläche und Nachtabenkung der Vorhaltetemperaturen (dadurch geringere Kondensatortemperaturen bei der Brauchwarmwasserbeladung und vermehrt Laufzeit tagsüber möglich, was beides zu höheren COP der WP bei der Bereitstellung führt)
- Füllung des mittleren Bereichs des Puffers mit PCM-Kapseln: dadurch ca. verdoppelte Wärmekapazität des Speichers, womit eine Heizungsbeladung nachts/morgens bei kältesten Aussen-temperaturen vermieden werden soll
- In der Wohnung, die direkt an den Aufstellort der WP angrenzt, fällt möglicherweise noch etwas Lärmimmission an. Hier sollen Schallmessungen durchgeführt werden, um mögliche Massnahmen zu einer höheren Abschottung der Lärmemissionen der WP finden und umsetzen zu können.

6 Publikationen

Konferenzbeitrag an der 29. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik», 14.6.23, Burgdorf: *Dachintegrierte Luft/Wasser-Wärmepumpe mit hybrid genutzter PV-Anlage in einem Stadthaus*

7 Anhang

7.1 Schema des PVT-Dachs

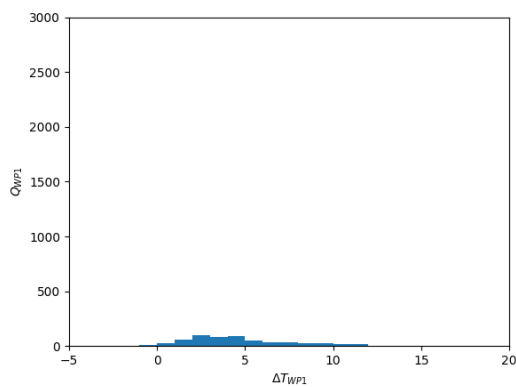




7.2 Monatliche Histogramme

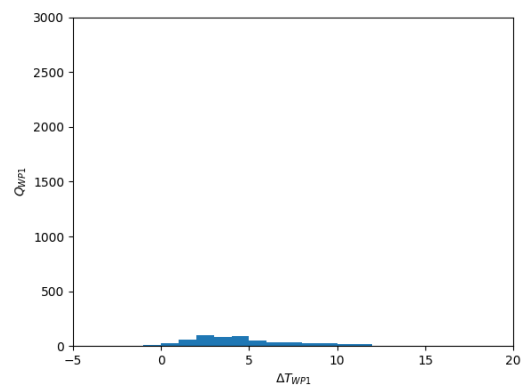
Monatliche Histogramme der Wärmeabgabe am Wärmepumpen-Kondensator (Q , in kWh) über der Temperaturerhöhung der WP-Zuluft, bei der die Wärme abgegeben wurde (ΔT_{WP} = Lufttemperatur am WP-Einlass minus Lufttemperatur der Aussenluft, in Kelvin). Linke Spalte mit Histogrammen der WP1, rechte Spalte mit denen der WP2.

WP1:

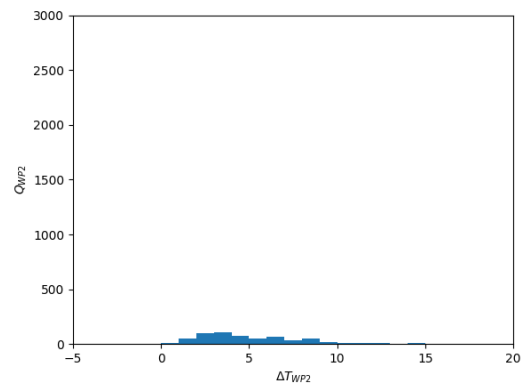
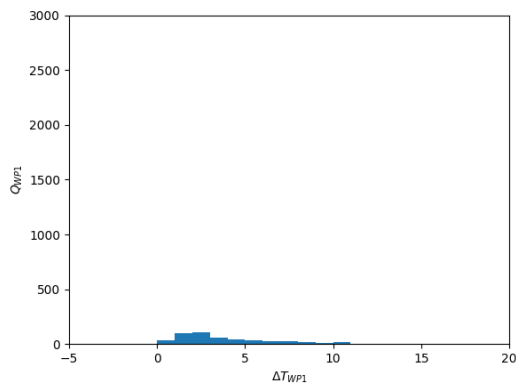


Juli:

WP2:

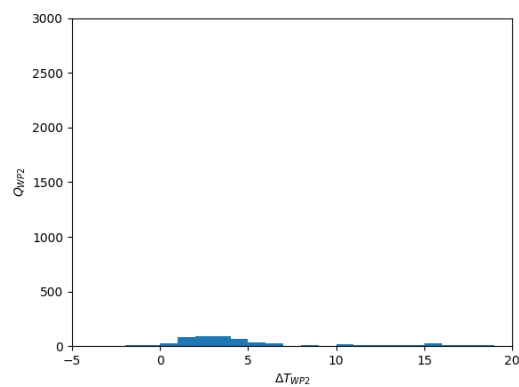
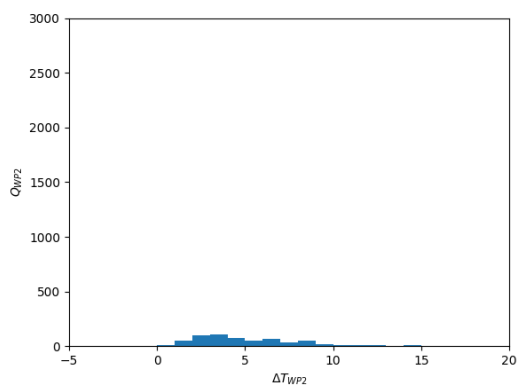


August:

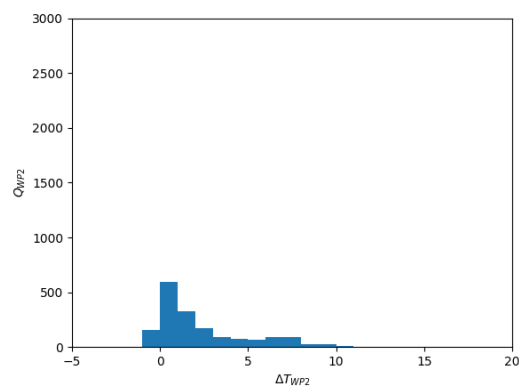
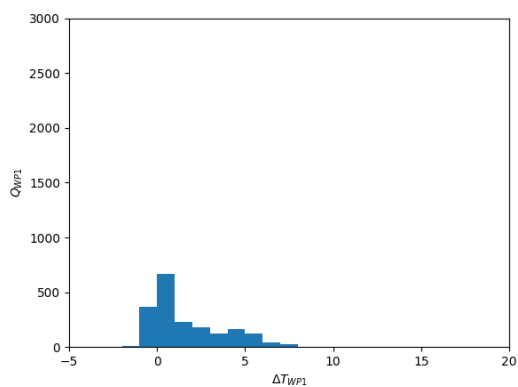




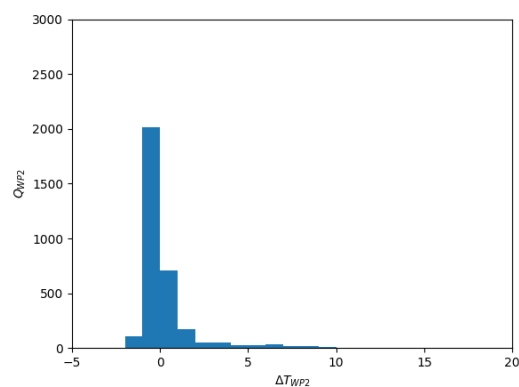
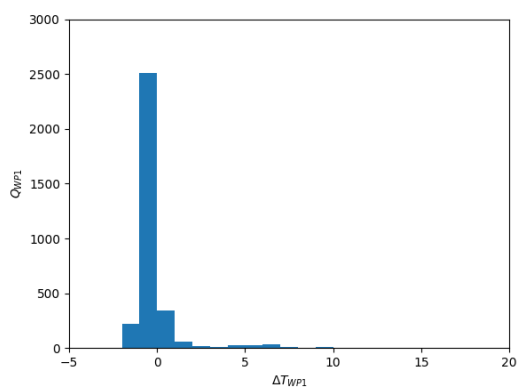
September:



Oktober:

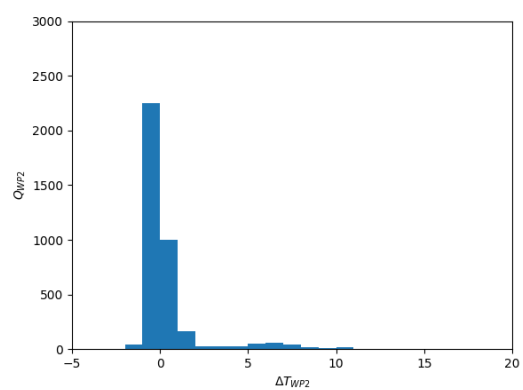
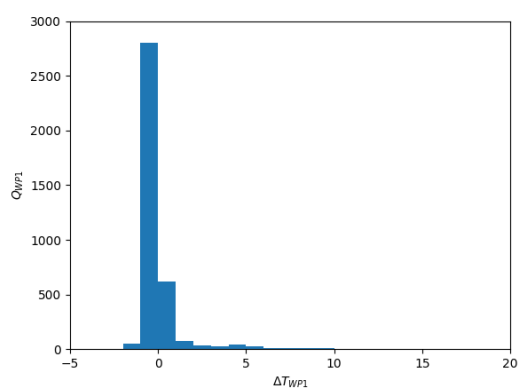


November:

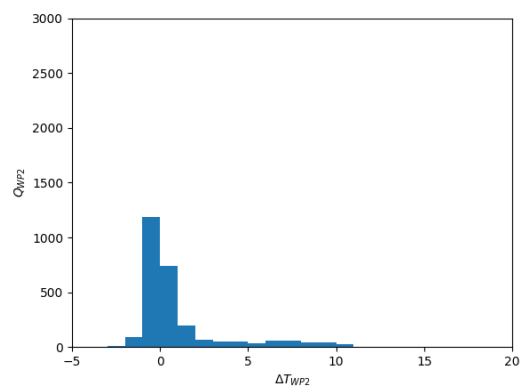
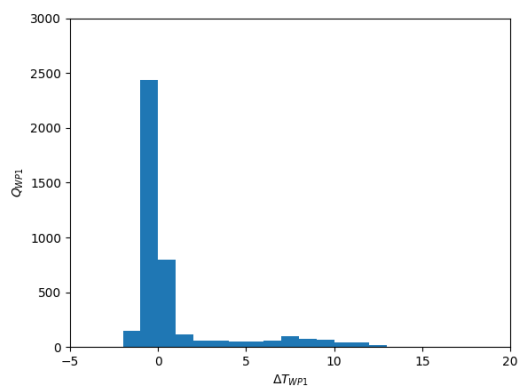




Dezember:



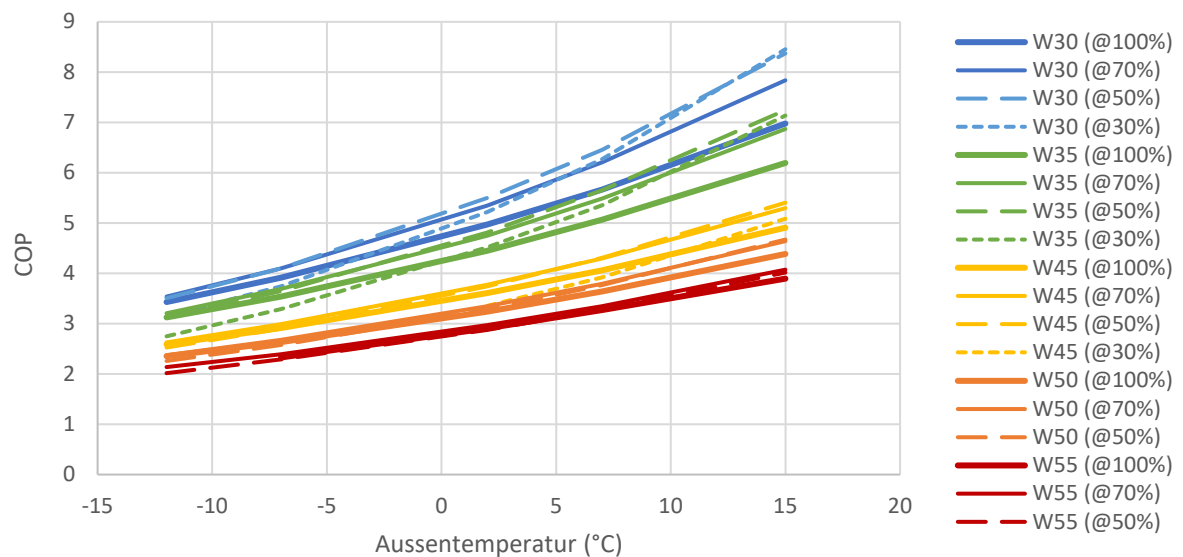
Januar:



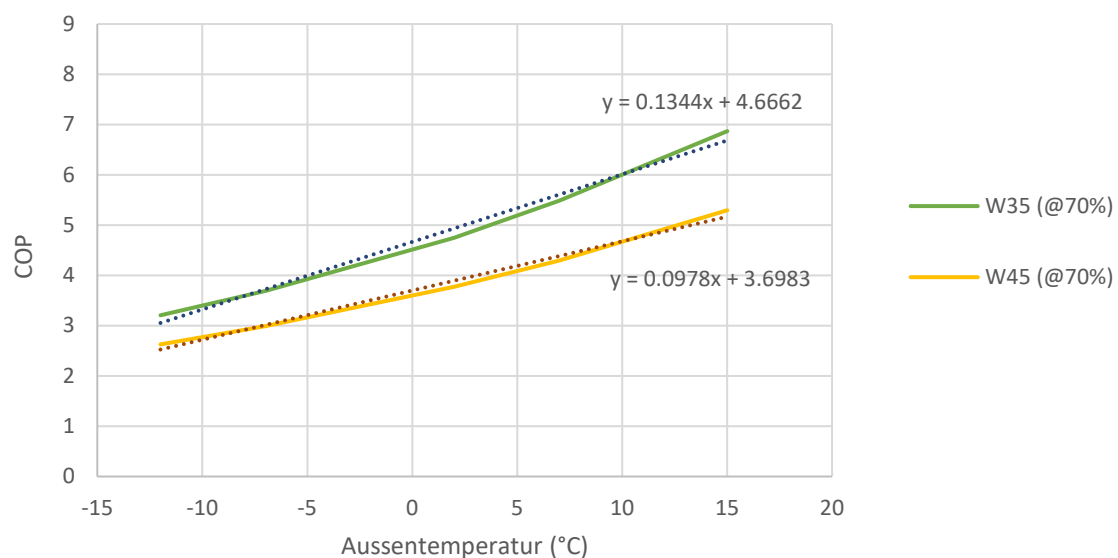


7.3 Leistungszahlen (COP) der eingesetzten Wärmepumpen

Leistungszahlen der WP für verschiedene Senkentemperaturen (Senke: Wasser (W) bei 30 °C bis 55 °C, siehe Farbgebung in der Grafik) und bei unterschiedlichen Kompressorleistungen (30 % bis 100 %). Quelle: Berechnungen des Herstellers.



Lineare Regression für den COP bei W35 bzw. W45 und 70 % Kompressorleistung (Linien aus vorheriger Grafik), mit welcher die Verbesserung der JAZ durch die Luftvorwärmung abgeschätzt wurde. Gemäss Regressionsgeraden ergibt sich eine Änderung des COP von 0.1344 pro Kelvin für die Senkentemperatur von 35 °C und 0.0978 pro Kelvin für 45 °C



7.1 Messmittelliste

Die programmierbare Regelung der Firma „Technische Alternative“ übernimmt nebst der Steuerung und Regulierung auch die Datenerfassung.

<i>Hydraulik</i>						
Kennzeichnung E-Schema	Einbauort	Messgrösse	Typ	Hersteller	Genauigkeit	Bemerkungen
=HLF1+AMB1-B1	Ambient	Aussentemperaturfühler	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DSO1-B2	Dach SO	Fühler PV-Feld SO	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DNW1-B3	Dach NW	Fühler PV-Feld NW	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B4	Dachboden	Fühler Zuluft SO	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B5	Dachboden	Fühler Zuluft NW	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B6	Dachboden	Fühler WP1 Lufteintritt	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B7	Dachboden	Fühler WP1 Luftaustritt	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B8	Dachboden	Fühler WP2 Lufteintritt	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B9	Dachboden	Fühler WP2 Luftaustritt	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=WPU1+SPR1-B1 bis B7	Pufferspeicher	Fühler Schichtung Wärmespeicher PCM	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=WMP1+SPR1-B1/B2	Pufferspeicher	Fühler Beladung Wärmespeicher PCM	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=WMP1+SPR2-B1	Boiler	Fühler WW-Boiler Ladung	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=WMP1+BLR1-B1	Boilerraum/Keller	Fühler Heizkreis Vorlauf	Pt1000	TA	$\pm (0,3 + 0,005 t)$	Genauigkeit Klasse B
=HLF1+DCB1-B10	Dachboden	Differenzdrucksensor	DDS-DL	TA	$\pm 0,1 \text{ Pa}$	Differenzdrucksensor
=WMP1+DCB1-B1 bis B3	Dachboden	Wärmezähler WP1	CF-Echo II	GWF	2 % im Nennbereich	Beim Anfahren bis zu 5%
=WMP2+DCB1-B1 bis B3	Dachboden	Wärmezähler WP2	CF-Echo II	GWF	2 % im Nennbereich	Beim Anfahren bis zu 5%
=WMZ1+DCB1-B1 bis B3	Dachboden	Wärmezähler Boiler	CF-Echo II	GWF	2 % im Nennbereich	Beim Anfahren bis zu 5%
=WMZ1+DCB1-B4 bis B6	Dachboden	Wärmezähler Verbrauch	CF-Echo II	GWF	2 % im Nennbereich	Beim Anfahren bis zu 5%

<i>Elektro</i>				
Bezeichnung	Messunsicherheit	Messgrösse(n)	Typ	Hersteller
Smart-Meter	$\pm 1\%$	PV-Ertrag, Ladezustand Batterie, Eigenverbrauch, Strombezug aus Netz	TS 65A-3	Fronius
Energiezähler Lüfter	$\pm 3\%$	Strombezug Lüfter 1+2 zusammen	CAN-EZ3	TA
Wärmepumpe SO	$\pm 3\%$	Strombezug WP1 (SO)	CAN-EZ3	TA



Wärmepumpe NW	±3%	Strombezug WP2 (NW)	CAN-EZ3	TA
Heizstab	±3%	Strombezug Ohmpilot (E-Heizstab)	CAN-EZ3	TA