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

quidconsult
Fragen – Ideen – Beratungen
Dr. Herbert Güttinger

Soleheap

Solar enhanced heat pump efficiency

Potenzial-Untersuchung zur Nutzung von thermischen Solarspeichern als Quelle für Sole/Wasser Wärmepumpen

Herbert Güttinger, quidconsult Elgg

31. Mai 2021 (Revision 24.10.2021)

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

quidconsult
Fragen – Ideen – Beratungen
Dr. Herbert Güttinger

Schlussbericht zum Projekt:

Soleheap Potenzial-Untersuchung zur Nutzung von thermischen Solarspeichern als Quelle für Sole[1]/Wasser-Wärmepumpen

Projekt-Nr.: 85380.31.006: Dienstleistung / Messinstallationen

Solarkollektoren als Quelle einer Wärmepumpenheizung im Einfamilienhaus Winzerstrasse 9, 8353 Elgg

Datum: 31 Mai 2021 (Revision 24.10.2021: Abb. 22)

Gegenstand des Vertrages vom 13. Juni 2019:

Erbringung sämtlicher in der Vertragsurkunde und den weiteren Bestandteilen umschriebenen Leistungen. Der Vertrag umfasst folgende Teilleistungen:

- *Simulation mit Polysun*
- *Messinstallationen, Energiezählung, Datenaufzeichnung*
- *Datenauswertung*
- *Bericht und Publikation*

Auftraggeberin Erfolgskontrolle:

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

Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich

www.zh.ch/energie

Auftragnehmer: quidconsult, Dr. Herbert Güttinger, Winzerstrasse 9, 8353 Elgg

Beteiligte Firmen:

Huber Energietechnik AG, Ingenieur- und Planungsbüro, Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich
EK Energiekonzepte AG, Sihlquai 55, 8055 Zürich
Jaeggi Gmünder Energietechnik AG, St. Gallerstrasse 5a, 8353 Elgg

Autor: Herbert Güttinger

Für Inhalt und Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Abbildung 1 Titelseite. Solarabsorber an der Südfassade des Hauses im Mai 2021.

[1] Im ursprünglichen Projekt wurde von einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe ausgegangen, was aber nicht realisierbar war.

1 Zusammenfassung

Die solar unterstützte Ölheizung im Einfamilienhaus an der Winzerstrasse 9, 8353 Elgg musste nach 24 Betriebsjahren ersetzt werden. Dabei sollte ein neues System mit Wärmepumpe, Sonnenkollektoren und einem Wasserspeicher als Quelle für die Wärmepumpe zum Einsatz kommen. **Die Idee dahinter:** Durch Absenken der Vorlauftemperatur der Sonnenkollektoren mittels Wärmepumpe erhöht sich deren Ertrag und dank solarer Vorwärmung der Quelle der Wärmepumpe wird eine höhere Arbeitszahl erreicht. Solarabsorber ermöglichen neben der Nutzung von Solarstrahlung auch konvektive Wärmegewinnung aus der Luft. Im Projekt Soleheap soll an einem Praxisbeispiel untersucht werden, wie gross die verschiedenen Beiträge sind und ob mit entsprechenden Speichern auch kalte Perioden mit wenig Sonne überbrückt werden können. Mit Unterstützung des AWEL des Kantons Zürich wurde die neue Heizungsanlage mit den nötigen Messeinrichtungen ausgestattet, so dass die Erfahrungen Fachkreisen zugänglich gemacht werden können.

Das von Huber Energietechnik AG entworfene hydraulische System von Soleheap beinhaltet eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit zwei Verdampferspeichern als Wärmequelle. Diese werden durch neue Solarabsorber an der Südfassade und die bereits vorhandene thermische Solaranlage gespeist. Die durch die Wärmepumpe erzeugte Wärme wird in zwei Heizungsspeicher und einen Brauchwarmwasserspeicher übertragen. Die 5 Speicher haben ein Volumen von je 1 m^3. Die Firma Energiekonzepte AG simulierte das System mit Polysun und stellte fest, dass die beiden Solaranlagen eher knapp bemessen sind und dass ein Wärmedefizit von rund 3'000 kWh pro Jahr besteht. Dieses musste mit dem Holzofen kompensiert werden können.

Soleheap wurde im Herbst 2019 installiert und am 9. Oktober 2019 in Betrieb genommen. Die Steuerung und Überwachung der Anlage erfolgt online mittels netlogger.js von Hetag. Im März 2021 mussten noch Optimierungen an der Steuerung und im Oktober an den Solarabsorbern vorgenommen werden. Die solaren Erträge in den 12 Monaten vom 1. Mai 2020 bis 31. April 2021 entsprachen mit 10’586 kWh den Erwartungen und die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ist mit 5.3 im oberen Bereich vergleichbarer Wärmepumpenanlagen. Allerdings war der solare Ertrag, während der kalten und sonnenarmen Tage zwischen November 2020 und Januar 2021 ungenügend und es musste mit Holz und zum Teil auch elektrisch mit den Heizstäben nachgeheizt werden. Die als Verluste definierte Differenz zwischen eingebrachter Energie (Solarkollektoren und elektrischer Strom) und gemessenen Verbrauch (Heiz- und Brauchwarmwasser) ist mit 16% relativ gross. Ein Teil davon ist auf Leitungs- und Speicherverluste und ein anderer Teil auf eine suboptimale Speicherbewirtschaftung zurückzuführen.

Fazit: Der Ertrag der thermischen Solaranlagen ist dank niedriger Vorlauftemperaturen auch im Winter hoch. An sonnigen Tagen bis zu mehreren kW. Die monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpe für Heizung und Brauchwarmwasser variieren zwischen 4.5 im Winter und 6.5 im Sommer. In den Monaten vom Februar bis November liegen die Quellentemperaturen bei 10°-20° C. Der Stromverbrauch der Wärmepumpe beträgt 3'066 kWh pro Jahr. Für die elektrische Zusatzheizung mit Heizstäben wurden noch weitere 1'328 kWh gebraucht. Schwachstelle des Systems ist die ungenügende Quellenleistung an kalten und strahlungsarmen Wintertagen. Zudem ist der Energiebedarf der Liegenschaft mit 95 kWh/m^2a gemessen am heutigen Standard hoch.

Das Potential einer kombinierten Nutzung von Solarenergie, Wärmepumpen und Speicherung zur Senkung des Stromverbrauchs vor allem im Winter ist gross. An die spezifische Situation angepasste Anlagen dieser Art können als Alternativen zu Erdsonden- oder Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen eingesetzt werden. Es braucht dazu aber genügend Fläche für Solaranlagen und die geografische Lage sollte auch im Winter genügend Sonnenstunden aufweisen. Als weitere Optimierung der Anlage werden verschiedene Varianten geprüft: a) Der Einbau einer H_2-Brennstoffzelle zur besseren Abdeckung des winterlichen Spitzenbedarfs (Favorit), b) zusätzliche Solarkollektoren, c) Verbesserung der Speicherkapazität inkl. Optimierung der Speicherbewirtschaftung.

La liberté, la vraie, ne consiste pas à pouvoir tout faire, mais à pouvoir tout penser.

Bertrand Piccard 2014 *Changer d’altitude.*

2 Inhalt

1 Zusammenfassung ... 3

2 Inhalt ... 4

3 Vision und Einleitung ... 5

4 Bisherige Heizung ... 6

5 Neue Heizung ... 8

5.1 Prinzip von Soleheap ... 8

5.2 Aufbau der Anlage ... 8

5.3 Simulationen mit Polysun ... 12

6 Betrieb ... 13

6.1 Übersicht ... 13

6.2 Wärmebedarf ... 14

6.3 Ertrag der Solaranlagen ... 19

6.4 Leistung Wärmepumpe ... 22

6.5 Verhalten der Speicher ... 23

7 Systembetrachtungen ... 25

8 Finanzen ... 28

9 Erkenntnisse aus dem Projekt ... 29

9.1 Forschungsfragen vor der Installation und Antworten nach den ersten Betriebserfahrungen ... 29

9.1.1 Fragen gemäss Offerte ... 29

9.1.2 Fragen gemäss Auftrag AWEL ... 29

9.1.3 Fragen und Anregungen für Forschung und Entwicklung ... 30

9.1.4 Fragen an die Praxis ... 31

10 Fazit ... 32

10.1 Erfahrungen ... 32

10.2 Machbarkeit ... 32

10.3 Empfehlungen und Ideen zur Weiterentwicklung ... 32

11 Dank ... 34

12 Anhang ... 35

12.1 Abkürzungen und Definitionen ... 35

12.2 Literaturverzeichnis ... 36

12.3 Technische Angaben zu Soleheap ... 37

12.3.1 Komponenten der Anlage ... 39

3 Vision und Einleitung

Das Einfamilienhaus an der Winzerstrasse 9, 8353 Elgg verfügte über eine thermische Solaranlage, die sowohl der Brauchwarmwasser Aufheizung als auch der Unterstützung der Heizung diente. Die Erfahrungen zeigten, dass im Sommer nicht alle Solarwärme benötigt wurde und sie im Winter kaum genutzt werden konnte. Im Sommer konnte der Speicher (600 Liter) zudem nicht genügend Energie aufnehmen, um auch nur wenige Tage mit geringer Sonnenstrahlung abzudecken und im Winter waren die im Sonnenkollektor erzeugten Temperaturen (<40° C) zu tief für eine direkte Nutzung.

Im Projekt Soleheap sollte untersucht werden, ob durch eine gute Kombination einer Wärmepumpe mit thermischen Solarkollektoren und Warmwasserspeichern die Deckung des Energiebedarfs für Heizung und Warmwasser über den gesamten Jahresverlauf möglich ist. Wie muss eine solche Kombination ausgestaltet sein und wie muss das System gesteuert werden? Folgende Hypothesen liegen dem Projekt zugrunde:

a) Durch Senkung der Vorlauftemperaturen von thermischen Solarkollektoren mittels Wärmepumpe wird die nutzbare Temperaturdifferenz und damit auch der Wärmeertrag erhöht. Zudem können auch tiefere Kollektortemperaturen genutzt werden. Dadurch wird weniger Speicherkapazität benötigt.

b) Die Leistung der Wärmepumpe kann durch solare Erhöhung der Verdampfer-Eintrittstemperatur (Quellentemperatur) und damit des COP verbessert und der Stromverbrauch entsprechend verringert werden.

c) Eine Analyse der Messdaten von MeteoSchweiz zeigt: Kalte Temperaturen sind häufig mit klarem Himmel und erhöhter Sonnenstrahlung verbunden. Solarabsorber können dann entweder die direkte Sonnenstrahlung oder die konvektive Wärme nutzen. Die kombinierten Erträge sollten einen erheblichen Teil des Energiebedarfs abdecken können.

d) Zur Überwindung kritischer Tage mit anhaltend kalten Temperaturen und wenig Sonnenstrahlung kann der Holzofen im Wohnzimmer eingesetzt werden (bis 30 kWh/d).

In der Literatur ist das Konzept der solaren Unterstützung von Wärmepumpenheizungen zwar untersucht worden, aber selten wurde es realisiert und dokumentiert. Insbesondere die Grösse der solaren Erträge auf niedrigem Temperaturniveau und die konvektiven Gewinne sind kaum bekannt ([1], [2], [3], [4], [5]).

Abbildung 2 Einfamilienaus Winzerstrasse 9, 8353 Elgg. Blick auf das Ostdach mit Panotron Solarziegeln.

4 Bisherige Heizung

Abbildung 3 Verglaste Schweizer Sonnenkollektoren auf dem Süddach. 6 Module à 1.5 m^2. Unten links ist das Kondenswasser gut sichtbar.

Das Einfamilienhaus an der Winzerstrasse 9 wurde 1995 durch die Firma Marty Wil in Fertigbauweise aus Holz erstellt. Als Heizung diente ein ölbefeuerter 16 kW Schuster Solarkessel. Der Heizöltank, ein Kunststoffbehälter im Keller fasste mit 2 m^3 Inhalt etwas mehr als den Jahresbedarf von 1‘400 bis 1‘600 Litern. Auf dem Süddach sind 6 Schweizer Kollektoren mit 9 m^2 Fläche montiert. Für Heizung und Brauchwarmwasser wurden bei einer Energiebezugsfläche von 150 m^2 durchschnittlich 15'000 kWh/a benötigt, also 100 kWh/m^2 a. 2018 wurden das Dach und der Estrichboden nachisoliert und 2019 neue Fenster mit Dreifach-Verglasung eingebaut. Auf dem West- und dem Ostdach ist eine 5.85 kWp Photovoltaikanlage mit 234 Panotron Solarziegeln à 25 Wp (67 m^2) installiert. Im Wohnzimmer ist zudem ein Mantel Speicherofen mit einer Heizleistung von 2.5 kW (pro Ladung 4-5 kg Holz) eingebaut.

Abbildung 4 Der Schuster Ölkessel mit einer Leistung von 16 kW, einem Solarregister und einem Speichervolumen von 600 Litern mit integriertem Brauchwarmwasserboiler (200 l).

Abbildung 5 Mantel Futura Holzspeicherofen im Wohnzimmer mit einer Kapazität mindestens 30 kWh. pro Tag.

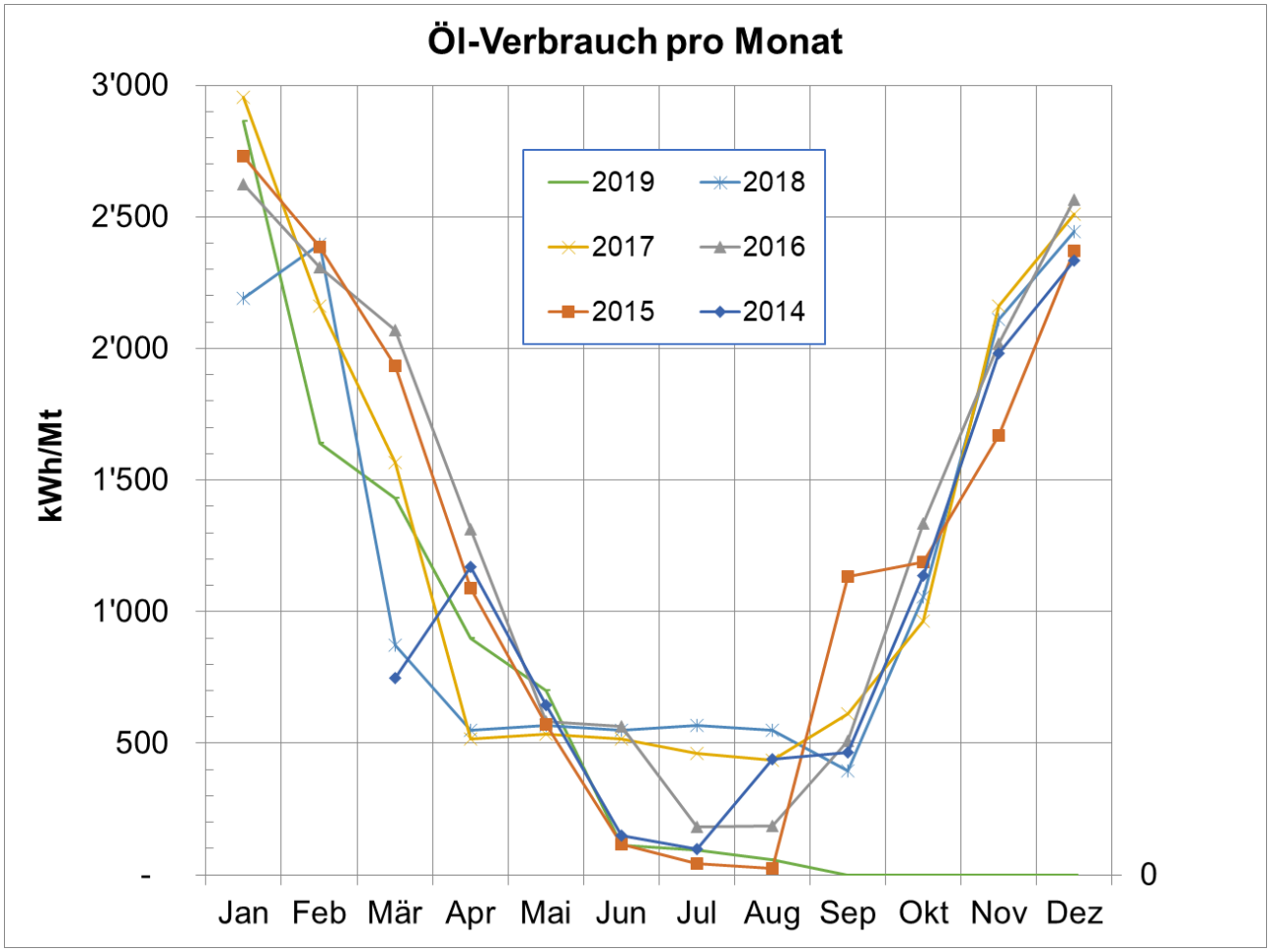

Abbildung 6 Monatlicher Verbrauch für Heizung und Brauchwarmwasser mit der Ölheizung.

Der Wärmebedarf variierte in den vergangenen Jahren zwischen 14'253 kWh/a (2018, 3060 HGT) und 16'261 kWh/a (2016, 3493 HGT) pro Jahr (Abbildung 6, Abbildung 13). Die Heizgradtage (HGT) gelten für die nahegelegene Messstation Aadorf Tänikon. Bis 2019 wurden jährlich etwa 300 kWh Holz (4 kg an 20 Tagen) verbrannt. 2016 wurden das Dach und der Estrichboden nachisoliert und 2019 im Januar neue Fenster mit 3-fach Verglasung eingebaut. Der dadurch erhoffte Bedarf an Primärenergie ist angesichts der grossen jährlichen Schwankungen nur schwer messbar, dürfte aber in der Grössenordnung von 10% liegen.

5 Neue Heizung

5.1 Prinzip von Soleheap

Der Ölkessel wurde im Oktober 2019 durch eine Wärmepumpe ersetzt, die als Wärmequelle Solespeicher nutzt. Diese werden sowohl durch die bestehenden verglasten Sonnenkollektoren (9 m²) als auch durch neu installierten 8 m² Solarabsorber an der Südfassade erwärmt. Das von Michael Woodtli von Huber Energietechnik AG entwickelte Konzept (Abbildung 7, Abbildung 31) wurde von Jaeggi Gmünder Energietechnik AG realisiert.

Die Wärmepumpe mit einer Leistung von 8 kW nutzt die beiden Verdampferspeicher à je 1 m³ und teils auch direkt die Solarabsorber als Wärmequelle. Sie erzeugt die Wärme für den Brauchwarmwasserspeicher und die beiden Heizungsspeicher (ebenfalls mit einem Speichervolumen von je 1 m³). Die Solarabsorber ermöglichen die Nutzung von Solar- und Konvektionswärme und liefern vor allem im Winter den Hauptanteil der Quellenenergie. Die Sonnenkollektoren erzeugen vor allem im Sommer das Warmwasser, tragen aber auch im Winter zur Ladung der Verdampferspeicher bei. Wegen Kondensationsproblemen kann die Eintrittstemperatur bei den Kollektoren leider nicht unter den Taupunkt, bzw. die Aussentemperatur gesenkt werden. Damit reduziert sich der mögliche Ertrag vor allem im Winterhalbjahr.

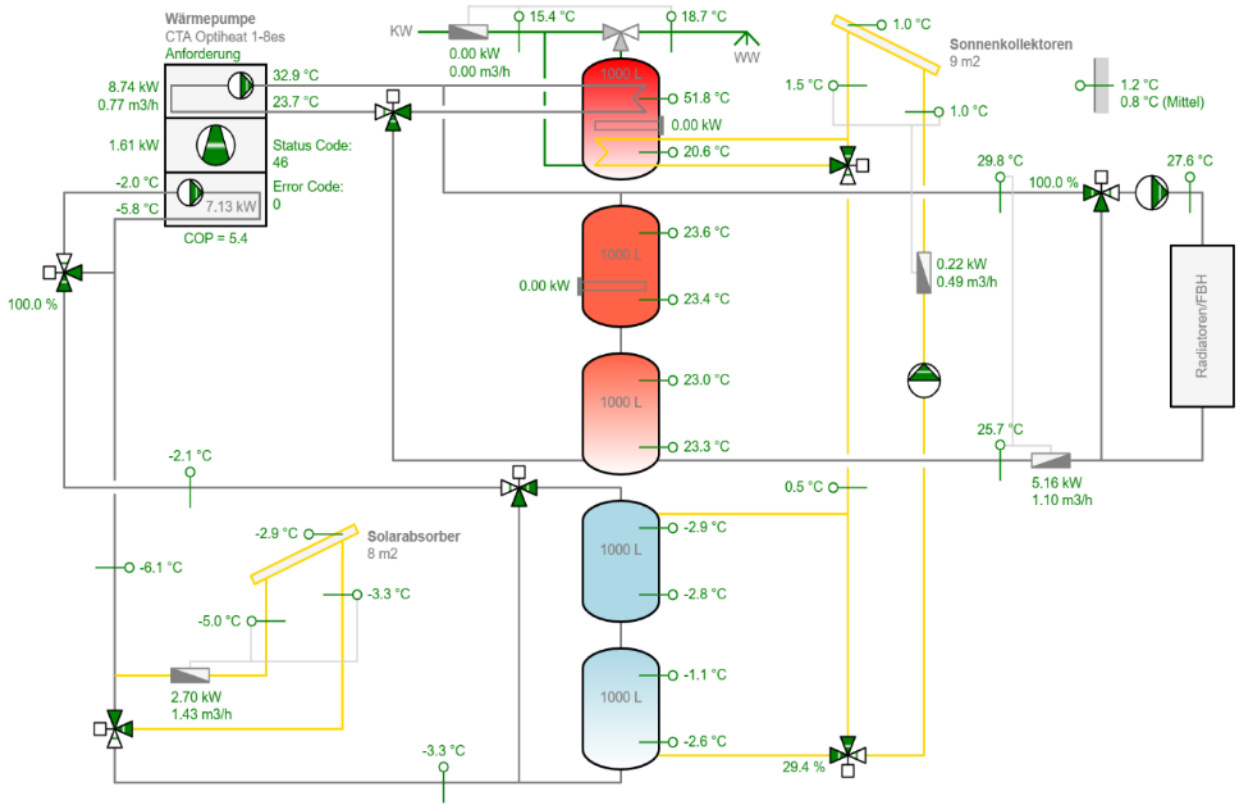

Abbildung 7 Schema der Anlage (Printscreen, netlogger.js) mit Betriebsdaten vom 28.11.2020, 15:18 Uhr. Der Brauchwarmwasserspeicher (zuoberst in der Reihe der Speicher) wird sowohl von der Wärmepumpe als auch von den Sonnenkollektoren gespeist. Er verfügt zudem über einen Elektroeinsatz für den Notbetrieb. Die beiden Heizungsspeicher (Mitte, rot) dienen als Pufferspeicher für die Wärmepumpe. Unten (blau) sind die beiden kalten 'Verdampferspeicher' welche von beiden Solaranlagen gespeist werden und als Quelle für die Wärmepumpe dienen. Die beiden Solarkreisläufe inkl. Verdampferspeicher enthalten Frostschutz, da Temperaturen bis -6° C genutzt werden. Der Absorberkreislauf wird durch die Umwälzpumpe des Verdampfers der Wärmepumpe betrieben und der Kollektorenkreislauf verfügt über eine eigene Pumpe. Das hydraulische Schema mit mehr Details ist im Anhang abgebildet.

5.2 Aufbau der Anlage

Kernstück der Anlage ist die Wärmepumpe von CTA, welche sowohl die beiden Heizungsspeicher als auch den Brauchwarmwasserspeicher speist. Sie leistet 7.7 kW (B0/W35) mit einem COP (Coefficient of Performance, also dem Verhältnis von erzeugter Wärme zum benötigten Strom) von 4.5 und kann

Quellentemperaturen von -6° C bis 20° C nutzen. Die maximale Vorlauftemperatur liegt bei 65° C (Quellentemperatur B>0).

Abbildung 8 Wärmepumpe CTA Optiheat All-in-one 1-8es.

Die unverglasten Solarabsorber an der Südfassade (Abbildung 9) dienen sowohl der Nutzung der Sonnenstrahlung als auch dem konvektiven Wärmegewinn. Sie werden von Sole durchflossen. Die Verdampferpumpe dient gleichzeitig als Pumpe für den Absorberkreislauf. Sie läuft auch wenn die Wärmepumpe nicht in Betrieb ist. Die beiden Umwälzpumpen der Wärmepumpe haben eine maximale Leistungsaufnahme von 0.05 kW.

Die Temperatur der Solarabsorber fällt in der kalten Jahreszeit häufig unter den Gefrierpunkt. Die Steuerung der Wärmepumpe wurde so eingestellt, dass sie ab Verdampferspeichertemperaturen <-3° C startet und die Sole bis auf -6° C abkühlt. An den Oberflächen der Absorber bildet sich dann eine Eisschicht. Dabei wird nicht nur Konvektionswärme aus der Luft, sondern auch Kristallisationswärme der Luftfeuchtigkeit genutzt (Abbildung 20).

Die bereits beim Bau des Hauses installierten Sonnenkollektoren auf dem Dach verfügen über eine eigene Kreislaufpumpe. Sie sind aber am selben Sole-Kreislauf angeschlossen wie die Absorber und können den Warmwasser- und die Verdampferspeicher aufwärmen. Trotz Vorlauftemperaturen über dem Taupunkt, bzw. der Lufttemperatur bildet sich zeitweise Kondenswasser in den Kollektoren (Abbildung 3).

Abbildung 9 ESSA Solarabsorber von Energie Solaire SA an der Südfassade des Hauses beim Abtauen während Solareinstrahlung.

Abbildung 10 Der Brauchwarmwasserspeicher (links) und die beiden Verdampferspeicher. Dazwischen sind die Leitungen der Solaranlagen sichtbar. Zum Zeitpunkt der Aufnahme sind die Leitungen noch nicht isoliert.

Abbildung 11 Einer der beiden Verdampferspeicher (links) und die beiden Heizungsspeicher. Im Hintergrund sind der Druckbehälter (blau) und darunter der Kompressor der Regenwasseranlage sichtbar. Zum Zeitpunkt der Aufnahme sind die Leitungen noch nicht isoliert.

5.3 Simulationen mit Polysun

Am 26. April 2019 wurde EK Energiekonzepte AG der Auftrag erteilt, das von Huber Energietechnik AG vorgeschlagene Konzept für die Wärmeversorgung zu plausibilisieren. Die Simulationen wurden von Markus Widmer mit Polysun im Mai 2019 durchgeführt. 15 Varianten mit verschiedenen Kombinationen von Kollektoren und Speichern wurden gerechnet. Die optimale Variante (Nr. 11) entspricht der realisierten Anlage. Diese enthält 4 unverglaste Solarabsorber (8 m^2), die 6 (bereits vorhandenen) verglasten Sonnenkollektoren (9 m^2), einen Brauchwarmwasserspeicher à 1 m^3, 2 Heizungsspeicher à 1 m3, 2 Verdampferspeicher à 1 m^3 und eine Sole/Wasser Wärmepumpe mit 8 kW Leistung.

Die wichtigsten Simulationsresultate sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Simulationen konnten die realen Werte der nachträglich gebauten Anlage recht gut vorherberechnen. Der Jahresertrag der Solarasorber war effektiv höher als geschätzt, während der Brauchwarmwasserbedarf wesentlich kleiner ausgefallen ist. Dies hängt damit zusammen, dass in den Simulationen ein 4-Personen Haushalt angenommen wurde und im Moment nur 1 Person im Haus wohnt. Zu beachten ist zudem, dass die Werte vor allem im Sommerhalbjahr durch die Einstellung der Parameter im Modell und auch bei der realen Steuerung stark beeinflusst werden. Insbesondere spielen die direkte Nutzung der solaren Erträge sowie die Speicherladungen eine wichtige Rolle.

kWh	Absorber	Kollektoren	WP-Strom	Heizwärme	BWW
Polysun	3'252	7'699	3'045	11'901	4'712
Soleheap	4'189	6’397	3'066	11'054	928

Tabelle 1 Vergleich der vor der definitiven Auslegung simulierten mit den vom 1. Mai 2020 bis 30. April 2021 gemessenen Werten über ein Jahr. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Simulation die Machbarkeit gut prognostiziert hat. Input Polysun 13'996 kWh/a, Verbrauch 16'613 kWh/a. Input Soleheap 13'652 kWh/a, Verbrauch 11'982 kWh/a.

Ein wichtiges Ziel der Simulationen mit Polysun bestand darin, eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen für die Dimensionierung der Kollektoren, der Speicher und für die hydraulische Auslegung. Zugleich sollte geklärt werden, ob das System überhaupt genügend Energie liefern konnte. Das hydraulische System wurde so konzipiert, dass es mit einer Erdwärmesonde aufgerüstet werden könnte. Zudem kann im Wohnzimmer mit einem Holz-Speicherofen nachgeheizt werden. Dieser wärmt allerdings nur lokal und kann keine Wärme in das Zentralheizsystem einspeisen. Die Aufteilung der Verdampfer- und der Heizungsspeicher in je 2 Einheiten erfolgte hauptsächlich wegen der zu kleinen Türen. Eine Platzschweissung grösserer Speicher hätte preislich in einer ähnlichen Grössenordnung gelegen.

6 Betrieb

6.1 Übersicht

Die Energiezufuhr von 17'275 kWh pro Jahr (1. Mai 2020 bis 30. April 2021) reicht auch ohne Elektroheizstäbe aus, um den Bedarf abzudecken (Abbildung 12Abbildung 32). Dieser ist mit 14'277 kWh pro Jahr etwa gleich hoch wie vor der Heizungssanierung. Je nach Sonneneinstrahlung besteht aber in den Monaten Dezember und Januar ein Defizit (Abbildung 13, Abbildung 14) welches mit dem Holz-Speicherofen gedeckt werden muss.

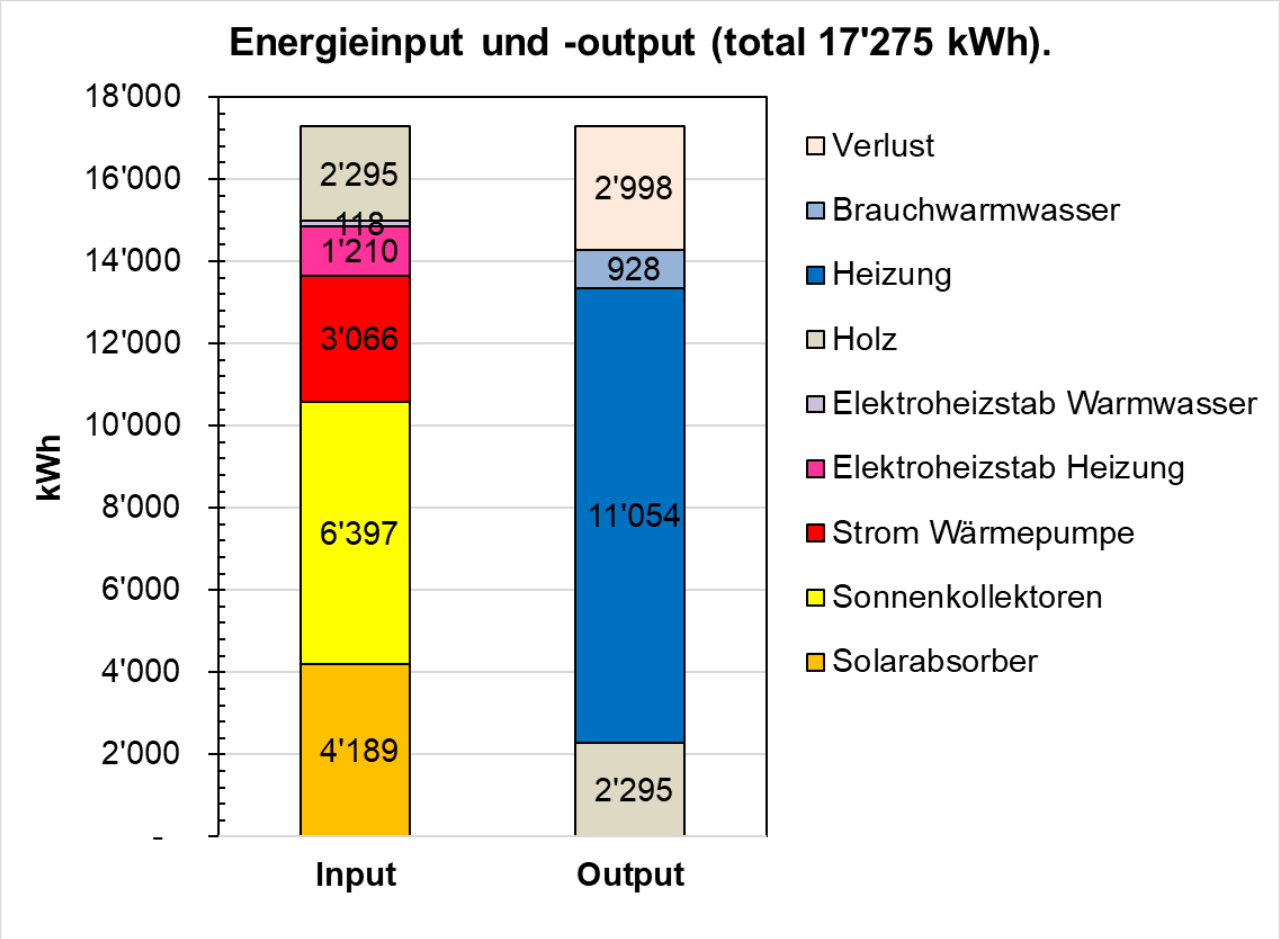

Abbildung 12 Vergleich der Zufuhr (Input) und der Nutzung (Output) der Energie in den 12 Monaten vom 1. Mai 2020 bis zum 30. April 2021. Die hohen Verluste entstehen hauptsächlich im Sommerhalbjahr und hängen mit der Speicherbewirtschaftung zusammen.

Die Gründe für die verhältnismässig grosse Differenz zwischen gemessener Zufuhr und Nutzung von Energie (Verluste) müssen im Detail noch geklärt werden. Sie dürfte hauptsächlich von der noch nicht optimalen Speicherbewirtschaftung und den Speicherverlusten herrühren. Nur ein kleiner Teil der Zufuhr von Solarenergie kann im Sommerhalbjahr genutzt werden. Der Rest wird als Verlust betrachtet. Dieser entsteht in den Leitungen und bei den Heizungs- und BWW-Speicher im Keller. Die Speicher kühlen sich um ca. 5 K, pro 24 h ab. Für die 3 warmen Speicher kann dies bis zu 15 kWh/d ausmachen. Wie viel davon im Gebäude bleibt oder über die Keller-Aussenwand verloren geht, ist nicht bekannt.

Bei der Interpretation der Energie-Jahreswerte und der Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe sind diese Aspekte zu berücksichtigen. Im Rahmen von Soleheap sind aber vor allem die monatlichen Verbrauchswerte von Strom vom November bis Februar interessant, während denen die Sonnenenergie am wenigsten bringt und der Verbrauch am höchsten ist (Abbildung 13, Abbildung 14). Die Sonnenkollektoren und die Solarabsorber liefern in diesen Monaten mindestens 20 kWh Wärme pro Tag. Zusammen mit dem Strom der Wärmepumpe stehen damit etwa 30 kWh zur Verfügung. Für gut isolierte Neubauten ist das genügend, für die (noch nicht) vollständig sanierte Liegenschaft an der Winzerstrasse 9 aber nicht.

6.2 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf für Heizung und Brauchwarmwasser betrug in der Zeit vom 1. Mai 2020 bis zum 30. April 2021 14'277 kWh bei 3'451 Heizgradtagen. Bei 150 m² Energiebezugsfläche ist er mit 95 kWh/m² a aber verglichen mit dem von Neubauten hoch. Es ist zu bemerken, dass seit Inbetriebnahme der Wärmepumpe keine Nachtabsenkung der Heiztemperatur mehr erfolgt. Bei der Ölheizung war eine Nachtabsenkung von 5 K eingestellt. Ob eine solche noch zu weiteren Einsparungen führen könnte, ist zu prüfen. Obwohl das Gebäude nicht mit einer Fussbodenheizung ausgestattet ist – lediglich die Rücklaufleitungen von den Radiatoren sind in Schleifen im Boden verlegt – hat sich gezeigt, dass mit Vorlauftemperaturen der Heizung unter 35° C genügend Raumwärme erzeugt werden kann.

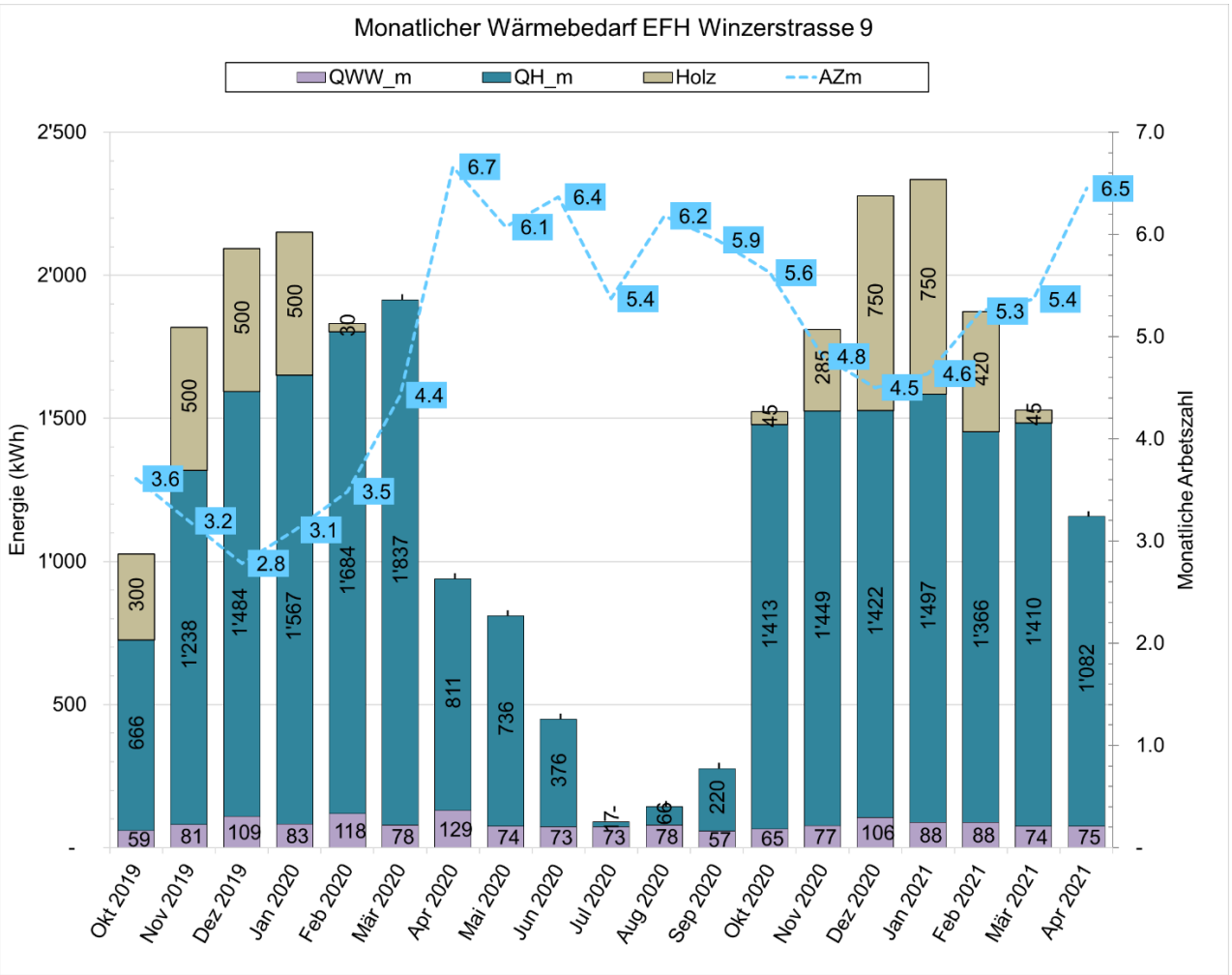

Abbildung 13 Monatlicher Wärmebedarf. Die neue Heizung wurde im Oktober 2019 in Betrieb genommen. Dargestellt ist die von der Wärmepumpe produzierte Energie (Q_{WW_m} = monatlicher Bedarf an Wärme für Warmwasser und Q_{H_m} = monatlicher Bedarf für Heizung). Sie genügt in kalten Wintermonaten mit wenig Sonnenstrahlung nicht und muss durch die Holzheizung ergänzt werden. AZ_m ist die monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe.

Die Heizkurve wurde bei der Inbetriebnahme der Wärmepumpe auf 28° C bei 12° C Aussentemperatur und auf 36° C Vorlauf bei -8° C eingestellt und am 21. November 2020 um 1 K gesenkt. Die Temperatur im Wohnzimmer war bis zu diesem Zeitpunkt 22° C und seither 21° C. Ab Ende November konnte diese Raumtemperatur nur noch mit Unterstützung des Holzofens gehalten werden. Im Wohnzimmer wurde auf ein Niveau von 22° C geheizt und in den anderen Räumen war es 2 K kälter. Die Holzfeuerung ermöglicht keine Einspeisung von Wärme in den Heizkreislauf. Vor allem in den Wintermonaten wurde mit verschiedenen Einstellungen experimentiert und die Heizkurve schliesslich auf 25° C bei T_a 12° C und 33° C T_a -8° C eingestellt. Diese Vorlauftemperaturen genügten, um eine komfortable Raumtemperatur von mindestens 20° C zu erreichen. Die gewünschten Vorlauftemperaturen konnten aber an kalten Tagen ohne Sonnenstrahlung nicht erreicht werden, da die Quellentemperatur zu niedrig war, bzw. die Erträge der thermischen Solarkollektoren nicht ausreichten.

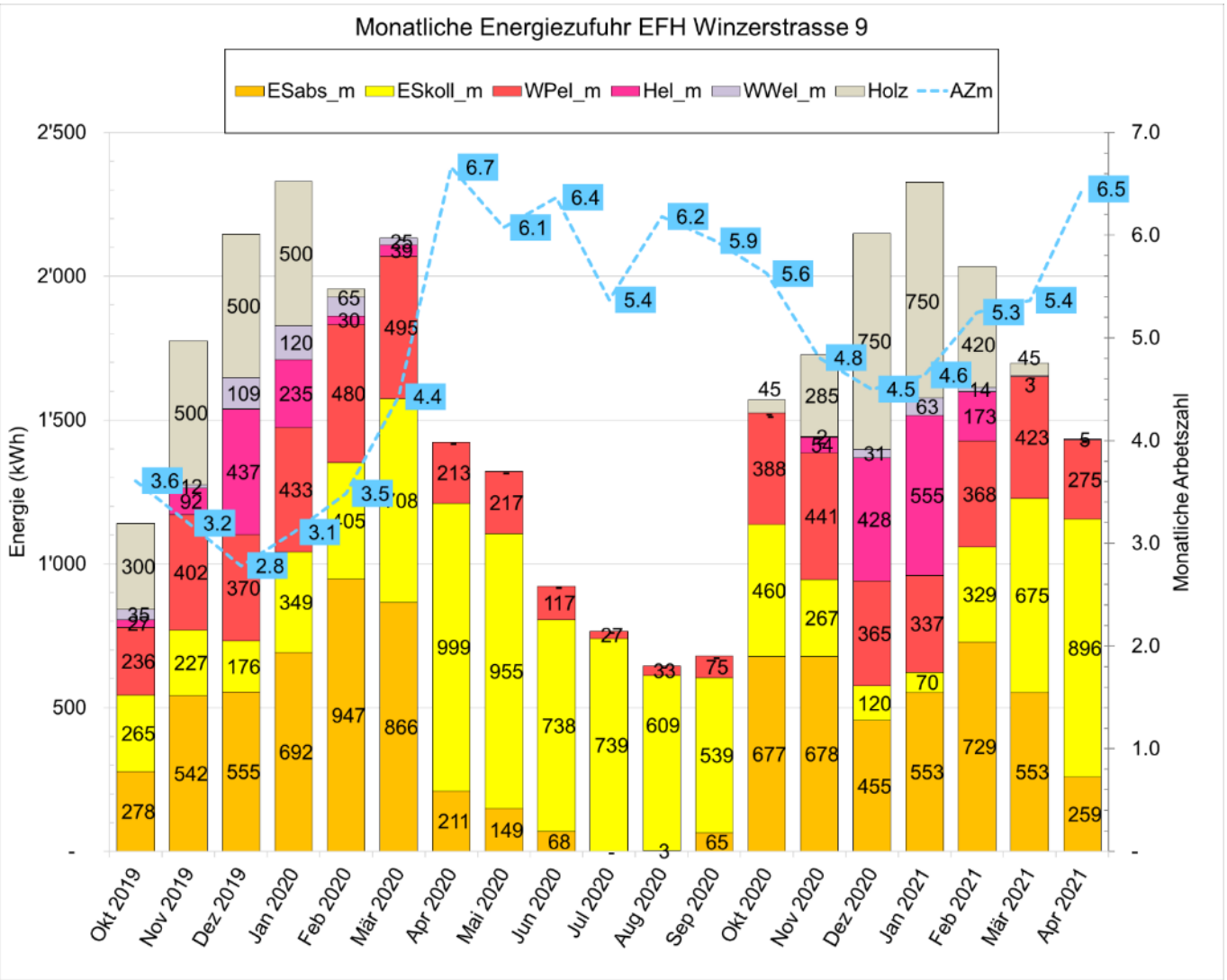

Abbildung 14 Monatliche Energiezufuhr aus den verschiedenen Quellen. Die Anlage wurde am 10. Oktober 2019 in Betrieb genommen. Bis März 2020 gab es noch Probleme mit der Wärmepumpe und dem Durchfluss der Solarabsorber und im September 2020 wurden die Leitungsquerschnitte zum Absorber erhöht. Seither läuft die Anlage zufriedenstellend. Zu beachten gilt, dass der Winter 2020/2021 vergleichsweise kalt war. In den Monaten Okt. 2020 bis März 2021 wurden in Tänikon 3'244 Heizgradtage gemessen, während es ein Jahr zuvor lediglich 2'748 waren. E_{Sabs_m} = Wärmezufuhr Solarabsorber, E_{Skoll_m} = Wärmezufuhr Sonnenkollektoren, WP_{el_m} = Strombedarf Wärmepumpe, H_{el_m} = elektrische Zusatzheizung Heizungsspeicher, WW_{el_m} = elektrische Zusatzheizung Warmwasser, Holz = Holzofen Wohnzimmer, AZ_m = monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpe.

Die elektrische Zusatzheizung (Heizstab im Heizungsspeicher) wurde so eingestellt, dass bei Unterschreitung der Solltemperatur um 8 K bis zum Sollwert elektrisch nachgeheizt wird. Eine Aufwärmung des ganzen Speichervolumens erfolgte nicht. In den kalten Monaten von Oktober 2020 bis Februar 2021 wurden bis zu 750 kWh Wärme monatlich mit Holz erzeugt, insgesamt 2'295 kWh. Das Brauchwarmwasser wurde elektrisch auf 48° C nachgeheizt, wenn die Temperatur 42° C unterschritt. Der Legionellenschutz wurde manuell durch periodische Erwärmung auf >62° C gewährleistet. Vom Mai bis Juni erfolgt die Brauchwarmwasseraufwärmung hauptsächlich durch die Sonnenkollektoren auf dem Süddach. Die maximalen Temperaturen steigen dann auf über 60° C. Die Wärmepumpe wird im Sommer hauptsächlich zur Umlagerung von Wärme von den Verdampferspeichern in die Heizungsspeicher aktiviert. Bei Bedarf wird auch das Brauchwarmwasser mit der Wärmepumpe erwärmt. Da der Kreislauf des Solarabsorbers durch die Umwälzpumpe des Verdampfers betrieben wird, kam es an sonnigen Tagen zu Überhitzungen und Abschaltungen der Wärmepumpe. Diese erlaubt höchstens 20° C als Quellentemperatur des Verdampfers.

Das Problem wurde durch Sperrung des Absorberkreislaufs ab Temperaturen des Verdampferspeichers von 20° C 'gelöst'.

Nicht nur in den Sommermonaten, sondern auch an sonnigen Tagen in der Übergangszeit und im Winter reichen die solaren Erträge aus, um den Wärmebedarf mit der Wärmepumpe und der Holzheizung (30 kWh pro Tag) zu decken. Das Beispiel des 21. November 2020 zeigt den typischen Tagesverlauf an einem teilweise sonnigen Tag (Abbildung 15). Dabei werden die Speicher vor allem tagsüber aufgeheizt, während die Wärmeabgabe über den ganzen Tag verteilt erfolgt. Die mittlere Globalstrahlung an diesem Tag betrug 61 W/m^2 und die Lufttemperatur war 4.2° C. Die Sonne schien während 210 Minuten von maximal möglichen 431 Min (Daten von MeteoSchweiz AG für die Messstation Aadorf Tänikon (Messwerte - MeteoSchweiz (admin.ch)). Ein grosser Teil des Ertrags ist auf den konvektiven Wärmetausch mit der Luft zurückzuführen. Die Daten zeigen, dass der Wärmebedarf von 60 kWh durch die solaren Gewinne von 34 kWh und den Wärmepumpenstrom von 16 kWh nicht ganz gedeckt werden konnte. Das Defizit wurde an diesem Tag aus dem Speicher gedeckt.

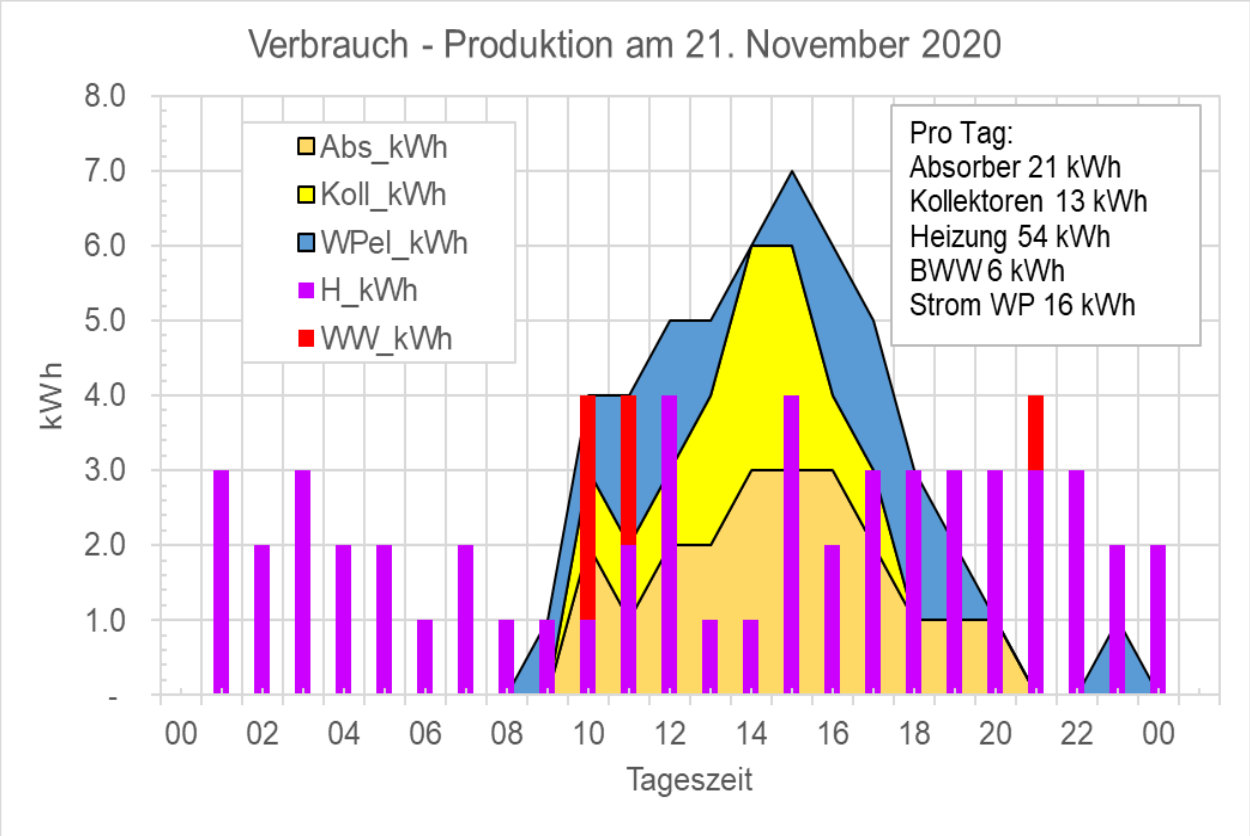

Abbildung 15 Exemplarische Darstellung von Energiezufuhr und -verbrauch im Tagesverlauf. Abs = Solarabsorber, Koll = Sonnenkollektoren, WPel = Strom Wärmepumpe, H = Heizung, WW/BWW = Warmwasser/ Brauchwarmwasser. Das Defizit von 10kWh wurde durch Bezug vom Speicher gedeckt.

Die Produktion von Wärme durch die Wärmepumpe ist ab Temperaturen unter 5° C nicht mehr genügend und stagniert bei Werten zwischen 50 und 60 kWh/d (Abbildung 16). Die Analyse des täglichen Verbrauchs in Abhängigkeit der Aussentemperatur zeigt, dass ab Erreichen der Heizgrenze (15° C im 48 h-Mittel) pro Tag 30 kWh bis 70 kWh benötigt werden (Abbildung 17). Eine Raumtemperatur von 20°-22° C konnte bei Aussentemperaturen unter -5° C nur noch mit der Holz-Zusatzheizung und zum Teil mit den Elektroheizstäben gehalten werden.

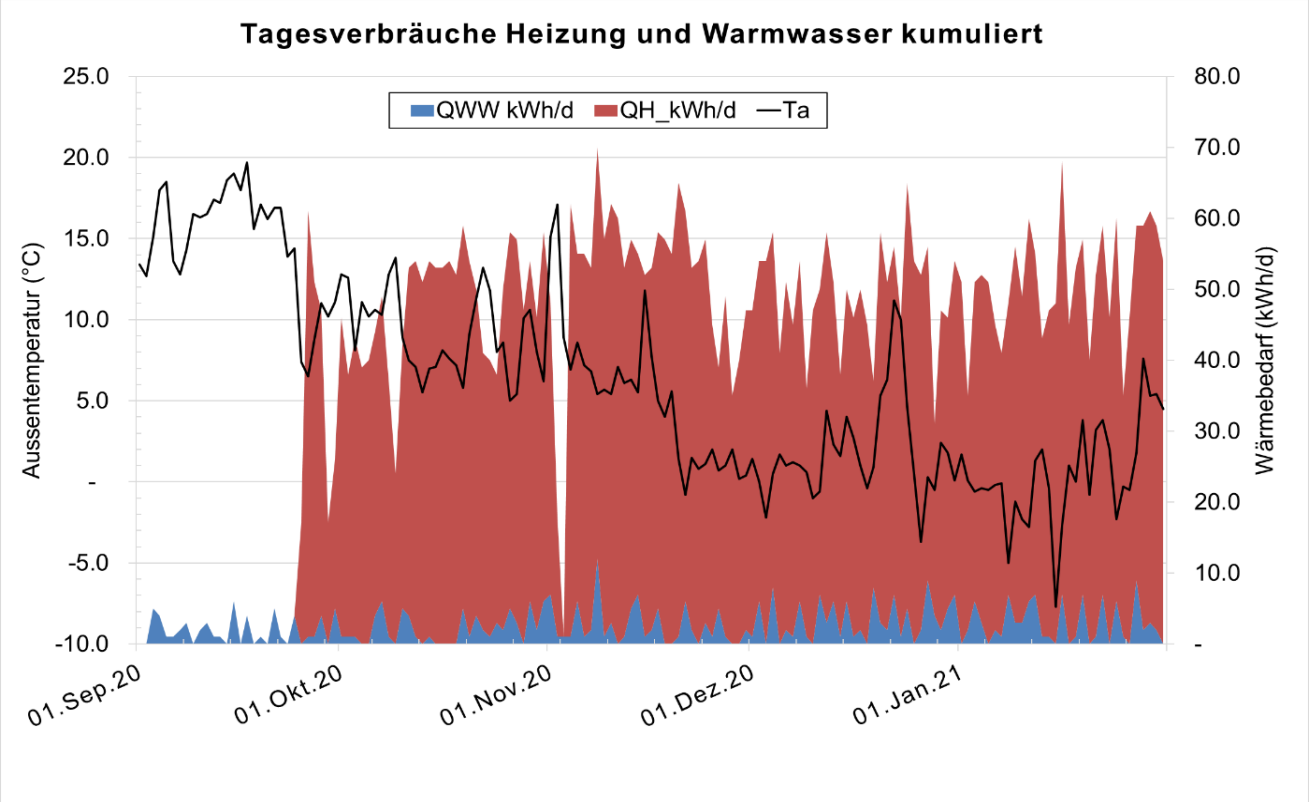

Abbildung 16 Aussentemperaturen (T_a) und Tagesverbräuche für Heizung (Q_H_kWh/d) und Warmwasser (Q_{WW}_kWh/d). Die Werte unterliegen sehr starken Tagesschwankungen, je nach Wetter.

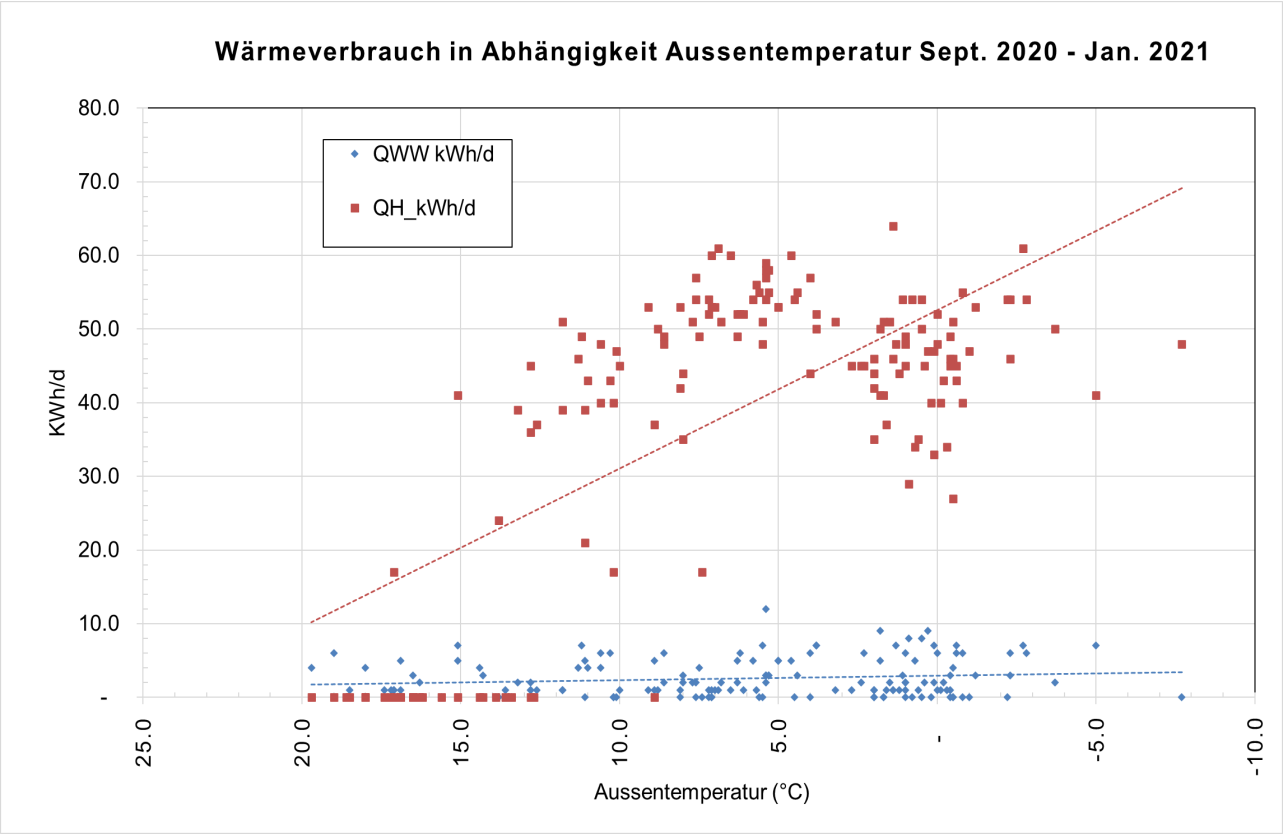

Abbildung 17 Abhängigkeit des Wärmebedarfs Heizung (Q_H_kWh/d) und Warmwasser (Q_{WW}_kWh/d) von der Aussentemperatur.

Da die neue Wärmepumpenheizung nicht mehr Öl, sondern elektrischen Strom benötigt, liegt es nahe, die Auswirkungen auf den Strombedarf der Liegenschaft zu untersuchen.

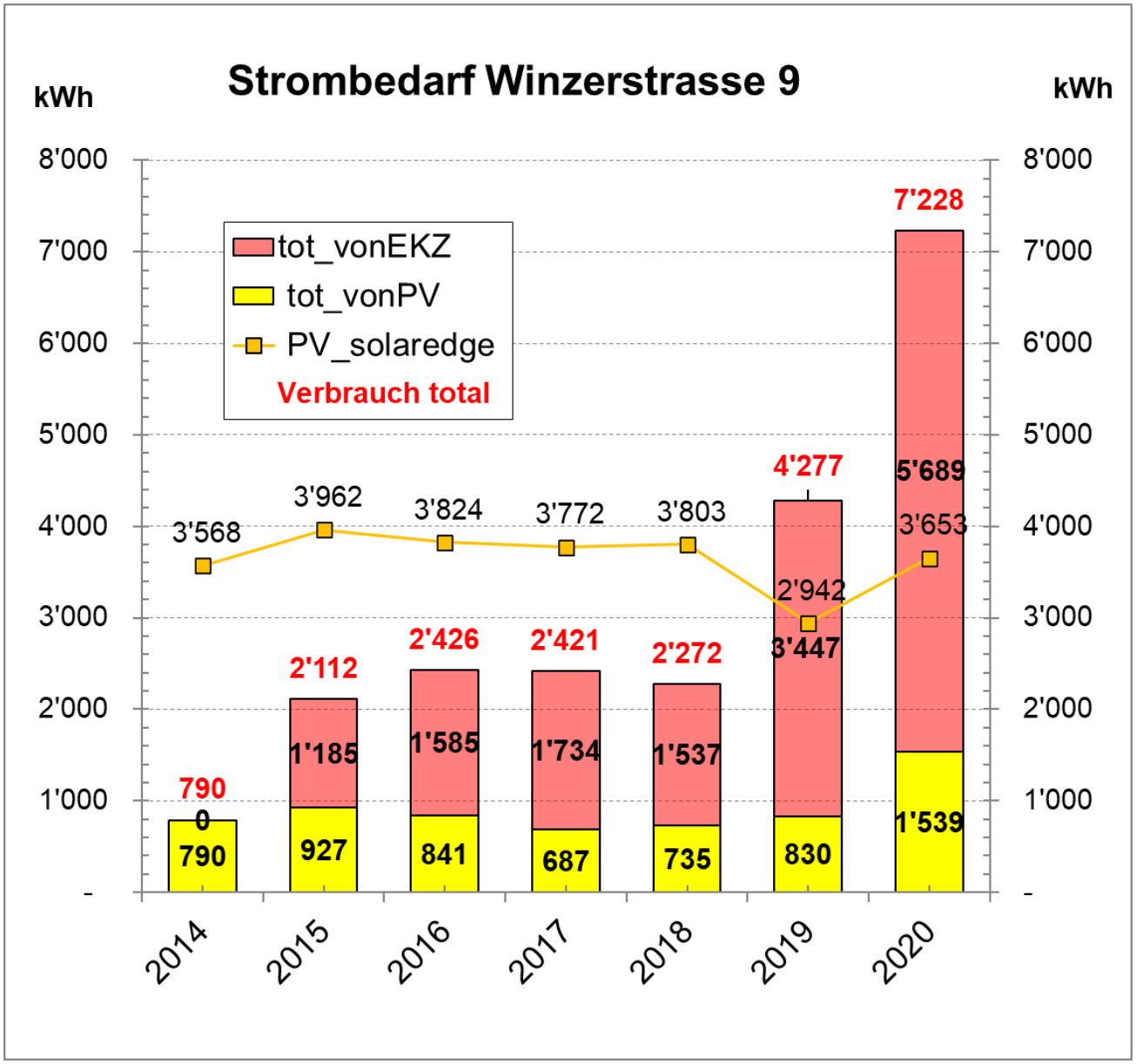

Abbildung 18 Strombedarf vor und nach Einbau der neuen Wärmepumpenheizung im Oktober 2019. Gelb eingetragen ist die Produktion der Photovoltaikanlage. Die Anlage ist nicht in das Messsystem von Soleheap integriert. Die Werte wurden aus den Abrechnungen der EKZ und den Messungen des Solaredge Wechselrichters zusammengestellt. Im Jahr 2019 fiel der Wechselrichter zeitweise aus

Der gesamte Strombedarf für die Liegenschaft betrug 2020 7'228 kWh, rund 5'000 kWh mehr als in den Jahren vor Inbetriebnahme der Wärmepumpenheizung. Ein kleiner Teil des Mehrbedarfs konnte durch die Photovoltaikanlage beigesteuert werden (Abbildung 18).

Die 2014 gebaute Photovoltaikanlage (5.6 kWp, Ost-West, 67 m2) produziert jährlich 3’800 kWh, was für den zusätzlichen Bedarf für die Heizung nicht ausreicht (Abbildung 19). Die Steuerung der Wärmepumpe ist nicht auf die Produktion der PV-Anlage abgestimmt, dennoch zeigen die Zahlen ungefähr eine Verdopplung des Eigenverbrauchs nach der Installation der Wärmepumpen-Heizung an. Der Anteil stieg von 21% (2018) auf 38% (2020) an, während gleichzeitig der Strombezug von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich EKZ von 1’537 kWh auf 5'689 kWh zunahm. In diesen Zahlen sind auch die elektrischen Zusatzheizungen (Heizstäbe) enthalten. Diese sollten durch weitere Optimierungen noch reduziert werden können.

Die in Abbildung 19 dargestellte monatliche Aufteilung des Strombedarfs zeigt, dass in den Wintermonaten der von der PV-Anlage produzierte Strom nicht ausreicht.

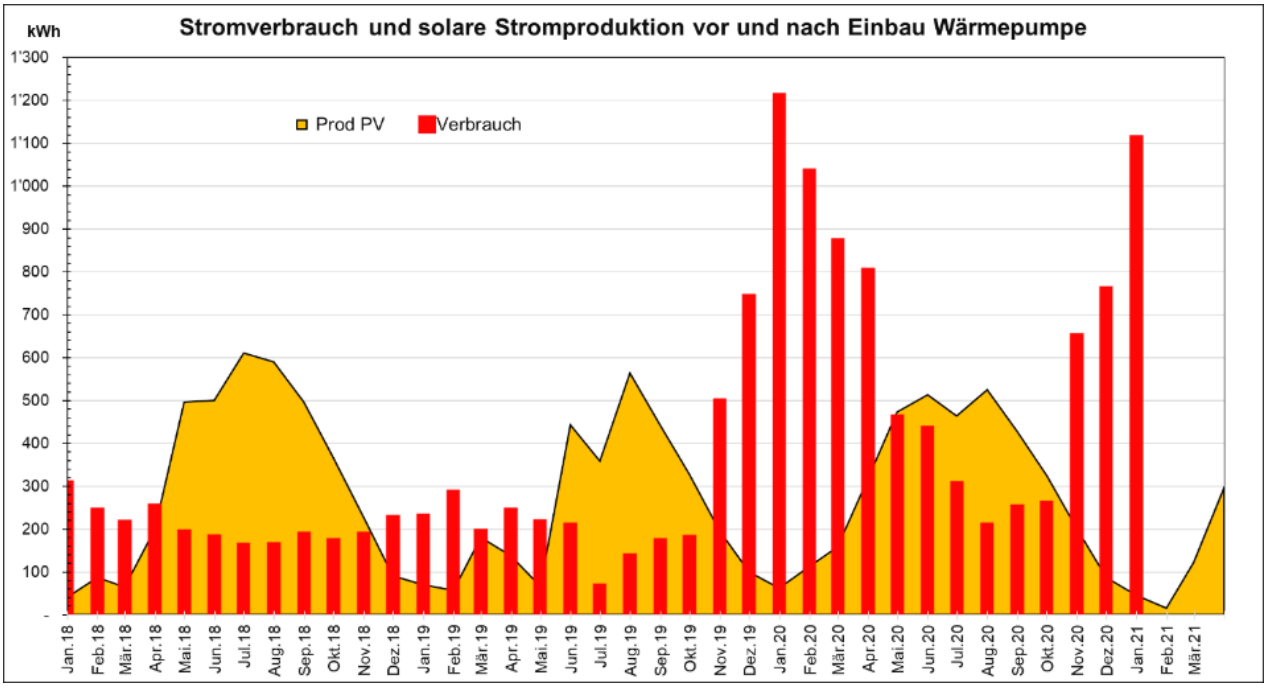

Abbildung 19 Stromverbrauch vor und nach Installation der Wärmepumpe (Okt. 2019). Gelb hinterlegt ist die monatliche Produktion der PV-Anlage.

6.3 Ertrag der Solaranlagen

Bis Februar 2020 waren der Durchfluss der Solarabsorber und die Einstellungen der Wärmepumpen-steuerung noch nicht optimal und es musste mit dem Elektroheizstab und mit Holz nachgeheizt werden. Seit Oktober 2020 läuft die Anlage erwartungsgemäss.

Abbildung 20 Solarabsorber am 28. November 2020, nach 5 Tagen ohne Sonne und Temperaturen um den Gefrierpunkt. Ob die Hinterseite ebenfalls vereist ist, ist nicht bekannt.

Die Sonnenscheindauer im Dezember 2020 und Januar 2021 lag gemäss Meteo Schweiz an der Messstation Aadorf Tänikon mit 19 h (Stunden), bzw. 30 h pro Tag unter den langjährigen Mittelwerten von 35°h, bzw. 50 h und auch die Tages-mitteltemperaturen waren ab November 2020 über längere Zeiträume hinweg unterdurchschnittlich. Die Sonne in Elgg lag während längeren Perioden über einer Nebel- und Wolkendecke und konnte entsprechend wenig an die Wärmeversorgung beitragen. Die eingebaute Wärmepumpe kann zudem Temperaturen nur bis -6° C nutzen und die Speicher können den Bedarf für höchstens 1-2 Tage speichern.

Die beiden Solaranlagen lieferten in den 12 Monaten vom 1. Mai 2020 bis 30. April 2021 insgesamt 10'586 kWh an die Speicher. Gleichzeitig benötigte die Wärmepumpe 3'066 kWh Strom. Damit könnte der Jahresbedarf von 14'277 kWh abgedeckt werden, wenn

nicht die Verluste wären. Während die Sonnenkollektoren in den Perioden ohne Sonnenschein kaum Ertrag lieferten, konnten die Absorber dank konvektiver Wärmeübertragung auch Temperaturen unter 0° C nutzen. Dabei wurde dank Vereisung der Oberflächen auch Kristallisationswärme gewonnen.

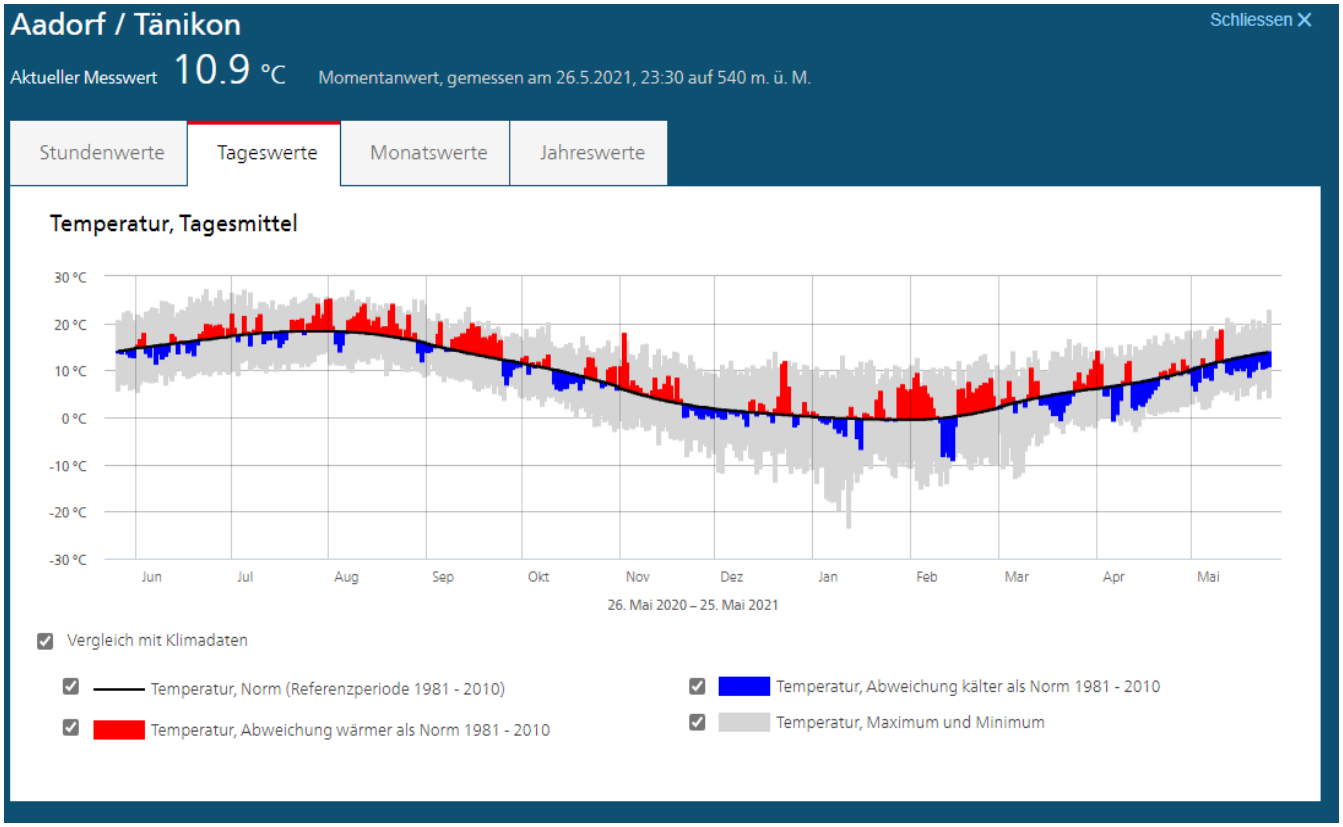

Abbildung 21 Tagesmitteltemperaturen für die Messstation Aadorf/Tänikon im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten . Quelle: MeteoSchweiz www.meteoschweiz.admin.ch .

Der Ertrag der Solarabsorber lag bei 524 kWh/m² und derjenige der Sonnenkollektoren bei 711 kWh/m². Diese Werte sind vergleichbar mit denjenigen aus dem Pilotprojekt «Saisonspeicherung von Sonnenenergie in einem Erdwärmesondenfeld» ([2]), nämlich 628 kWh/m². Für Soleheap sind aber vor allem die Erträge im Winter wichtig und dort sind sie wesentlich höher als im erwähnten Pilotprojekt Mettmenstetten. Im Januar lieferten die Solarabsorber 45 kWh/m² statt 1.2 kWh/m² (bei 30° C Kollektortemperatur). Auch die Abschätzungen von Jenni [3] deuten auf niedrigere Erträge hin. Beide Studien gehen von Kollektortemperaturen von 10° C, bzw. 30° C. Soleheap nutzt Temperaturen bis unter 0° C. Die durchschnittlichen Erträge der Soleheap Solarabsorber und Sonnenkollektoren sind in Abbildung 22 dargestellt.

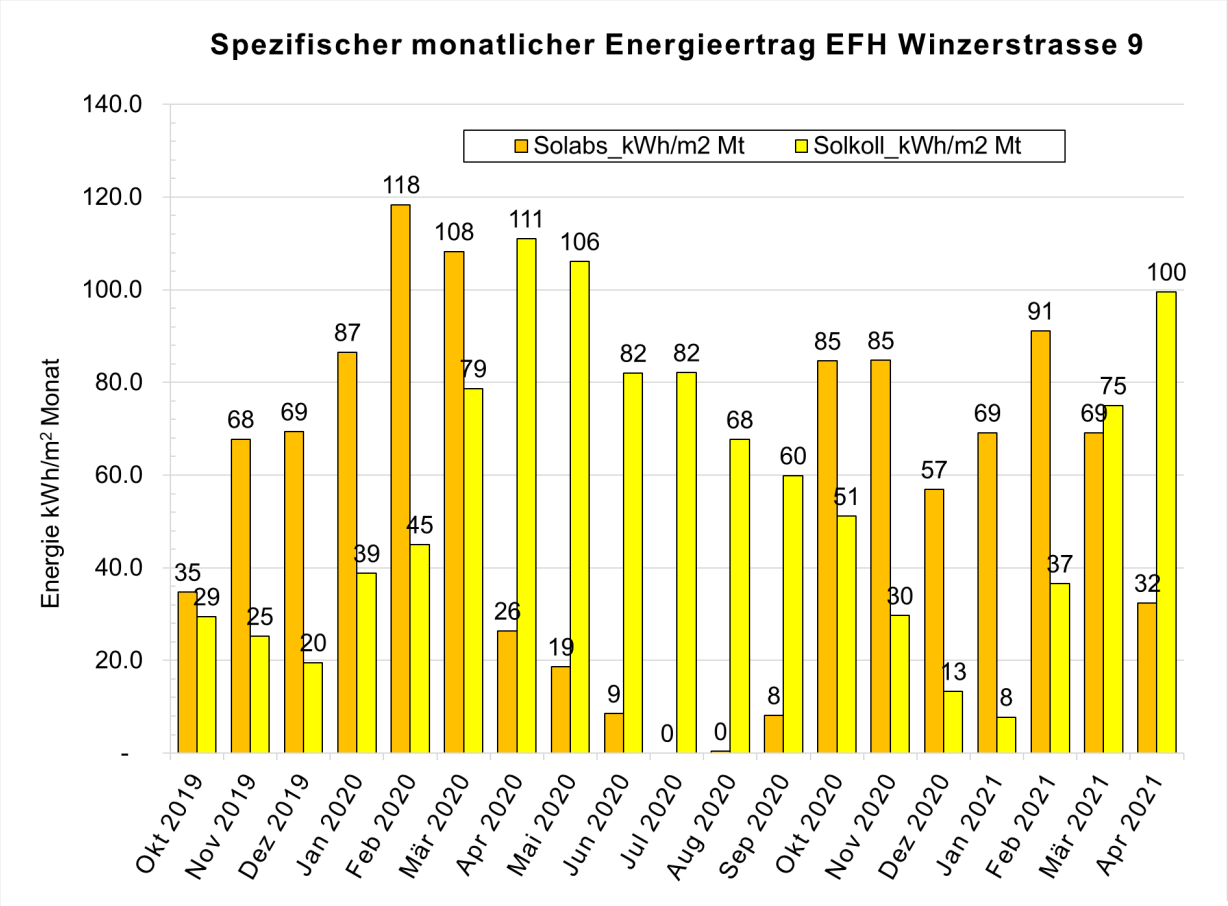

Abbildung 22 Durchschnittliche monatliche Erträge der Solarabsorber und der Sonnenkollektoren pro m² Fläche. Die Absorber haben eine Fläche von 8 m² und die Sonnenkollektoren 9 m². Solarabsorber erlauben sehr tiefe Vorlauftemperaturen und können auch konvektive Wärme nutzen. Ihre Effizienz ist deshalb im Winter grösser als diejenige der Sonnenkollektoren. Diese ermöglichen aber höhere Rücklauftemperaturen und bringen im Sommer entsprechend mehr Leistung. Der Ertrag hängt sehr stark von der Eintrittstemperatur der Kollektoren, bzw. der Temperatur des Verdampferspeichers ab.

6.4 Leistung Wärmepumpe

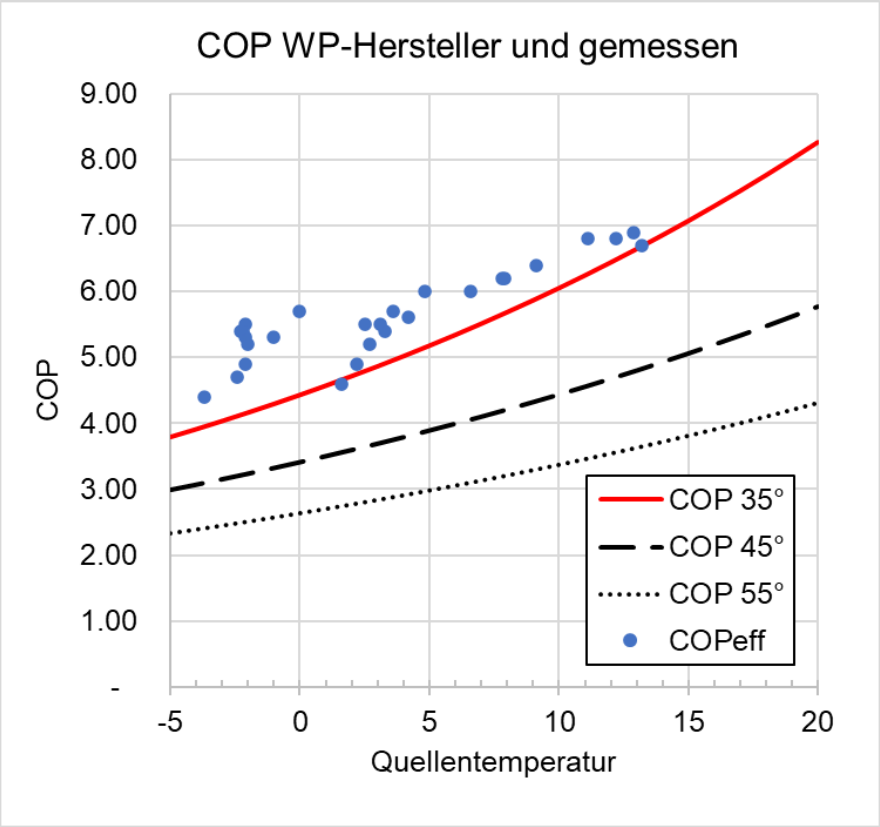

Abbildung 23 Vergleich der gemessenen COP der Wärmepumpe (Tageswerte Okt. 2020 bis Jan. 2021) mit den Herstellerangaben (**[11]**). Die Daten wurden aus den Leistungskurven herausgelesen. Da die Speicher meist auf weniger als 35 C erwärmt werden, sind die gemessenen COP tendenziell höher als die Normwerte des Herstellers. Das Brauchwarmwasser wurde in der Regel auf 52° C erwärmt. Um die Legionellen abzutöten, periodisch auf 60° C

Die wichtigsten Kennzahlen für die Leistung einer Wärmepumpe sind der COP (Coefficient of Performance) und die Jahresarbeitszahl JAZ, bzw. JAZ+ (inklusive Umwälzpumpe der Quelle; in Soleheap des Solarabsorber-kreislaufs). Mit den kumulierten Verbräuchen seit Inbetriebnahme beträgt die JAZ+ am 30. April 2021 4.6 und für ein ganzes Jahr (die vergangenen 12 Monate) (AZ_{12m}) sogar 5.3 (Abbildung 25.). Sie ist damit höher als übliche Werte von Luft/Wasser- und auch höher als diejenigen von Erdsonden-Wärmepumpenanlagen [6], [7]. Dies zeigt sich auch bei der Analyse eines Tagesverlaufs (Abbildung 24). Bei der Aufladung des Brauchwarm-wasserspeichers werden COP von 5 erreicht, während die Heizungsspeicher meist mit COP zwischen 6 und 9 geladen werden.

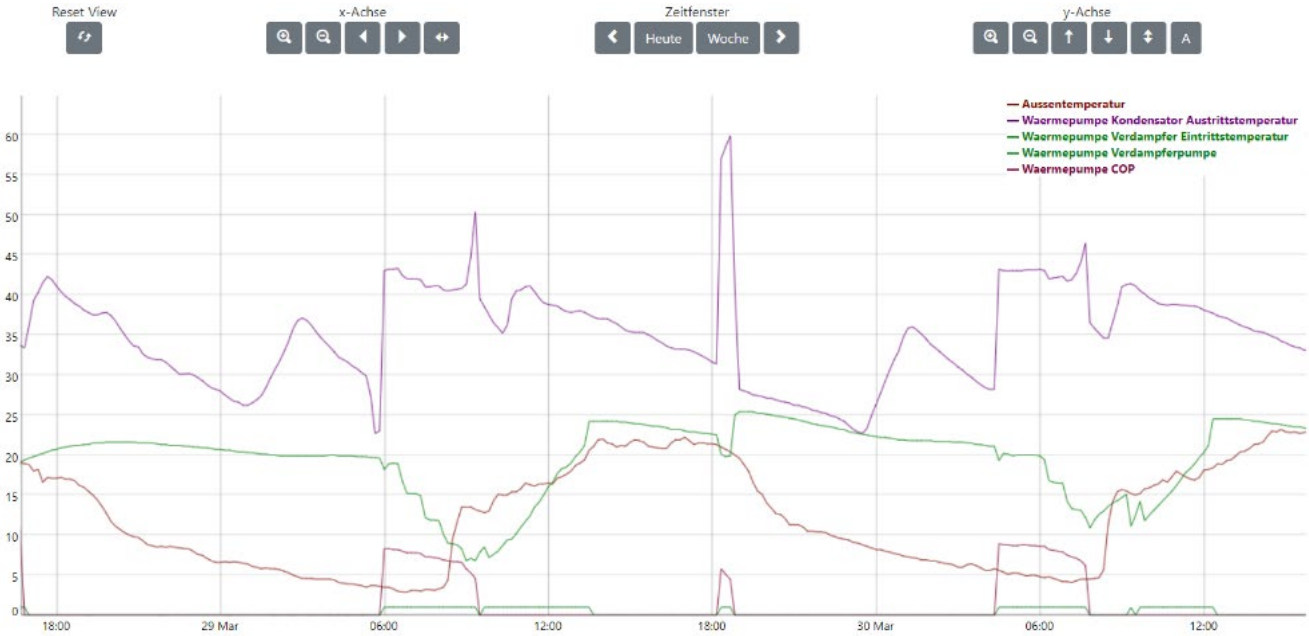

Abbildung 24 Tagesverlauf des Wärmepumpenbetriebs am 29. März 2021 (Screenshot). Die tiefsten COP von rund 5 (dunkelrote Linie) sind während der Aufladung des Brauchwarmwasserspeichers (siehe Kondensator Austrittstemperatur: oberste, violette Linie) nach 18:00 Uhr zu beobachten. Bei der Erwärmung der Heizungsspeicher liegen die COP zwischen 9 und 6. Sie hängen stark von der Vorlauftemperatur (Verdampfer Eintrittstemperatur, grün) ab. Die unterste grüne Linie zeigt die Einschaltphasen der Verdampferpumpe, welche auch den Kreislauf des Solarabsorbers bedient.

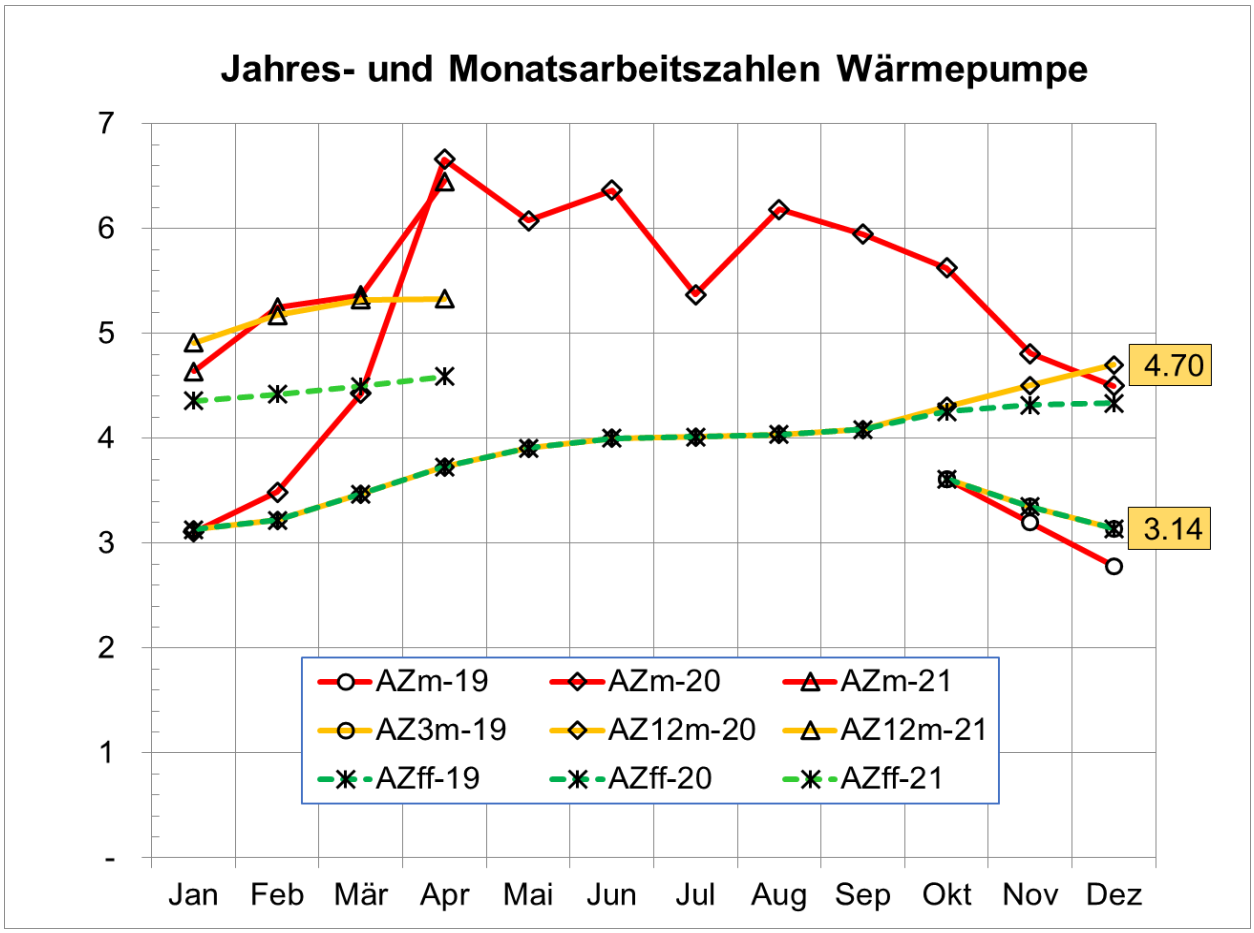

Abbildung 25 Entwicklung der Arbeitszahlen der Wärmepumpe im Jahresverlauf und während der Optimierung der Anlage im Verlauf der Jahre 2019 bis 2021. Dabei ist AZm-XX die monatliche Arbeitszahl des jeweiligen Jahres, AZ12m-XX die Arbeitszahl über die vergangenen 12 Monate (entsprechend der Jahresarbeitszahl JAZ+, gelb hinterlegt und eingerahmt sind die AZ12m für 2019 und 2020) und AZff-XX die Arbeitszahl seit Inbetriebnahme. Diese wird im Schema von Netlogger angezeigt.

In Abbildung 25 ebenfalls dargestellt sind die Entwicklung der AZ_m (Monatsarbeitszahlen) und die AZ_{12m} (jeweils über die vergangenen 12 Monate). Im Verlauf des Jahres 2020 wurden einige Optimierungen vorgenommen weshalb die AZ_{12m} für das jeweilige Kalenderjahr von 3.14 (2019) auf 4.70 (2020) und schliesslich auf 5.32 angestiegen ist. In dieser Grössenordnung wird sie voraussichtlich bleiben.

Die Analyse des Verlaufs der Ladung von Brauchwarmwasser- und Heizungsspeicher (Abbildung 23) zeigt, dass der COP der Wärmepumpe, abhängig von den Quellen- und Senkentemperaturen, den technischen Angaben des Herstellers sehr gut entsprechen. Sie erreichen bei Beginn der Ladung jeweils Werte über 8. Mit dem Absinken der Quellentemperaturen und der gleichzeitigen Erhöhung der Senkentemperaturen nehmen die COP ab. Allerdings sind diese Arbeitszahlen nur erreichbar, wenn die Quelle über ausreichend Energie verfügt.

6.5 Verhalten der Speicher

Die Verluste im oberen Teil des Brauchwarmwasserspeichers sind beträchtlich. Sie betragen ca. 5 K/d bei einer Starttemperatur von 52° C (Abbildung 26) was etwa 5 kWh/d entspricht. Da gleichzeitig der untere Teil des Speichers leicht erwärmt wird und die Abwärme den Keller aufwärmt, ist nicht die ganze Wärme verloren. Bei den Heizungsspeichern sind die Verluste dank des etwas tieferen Temperaturniveaus geringer und während der Heizperiode kaum als Verluste erkennbar, da durch die Heizung wesentlich mehr Energie entzogen wird. Die Verdampferspeicher werden im Sommer als Wärmepuffer für die Solaranlagen verwendet und erreichen zwischen 50° C bis 60° C. Sie haben dann ähnlich hohe 'Verluste' wie der Brauchwarmwasserspeicher. Im Winter dürften sie im Keller erwärmt werden, da sie meist kälter als die Lufttemperatur im Keller und oft unter 0° C sind. Diese Erwärmung findet auch statt, wenn die Umwälzpumpe nicht läuft. Die beiden Heizungsspeicher haben eine Speicherkapazität von ca. 40 kWh, wenn sie auf 20 K über die Vorlauftemperatur der Heizung geladen werden. Dies entspricht nicht ganz

einem Tagesbedarf.Die Verdampferspeicher enthalten pro nutzbarem Kelvin Temperaturdifferenz etwa 2 kWh. Je höher ihre Temperatur ist, desto besser ist der COP der Wärmepumpe und desto tiefer der solare Ertrag. An sehr kalten Tagen wurde die Wärmepumpe deshalb bereits beim Erreichen von -3° C eingeschaltet. Bei -°5° C erfolgte bereits wieder die Ausschaltung wegen Erreichens der Betriebsgrenze (Abbildung 25).

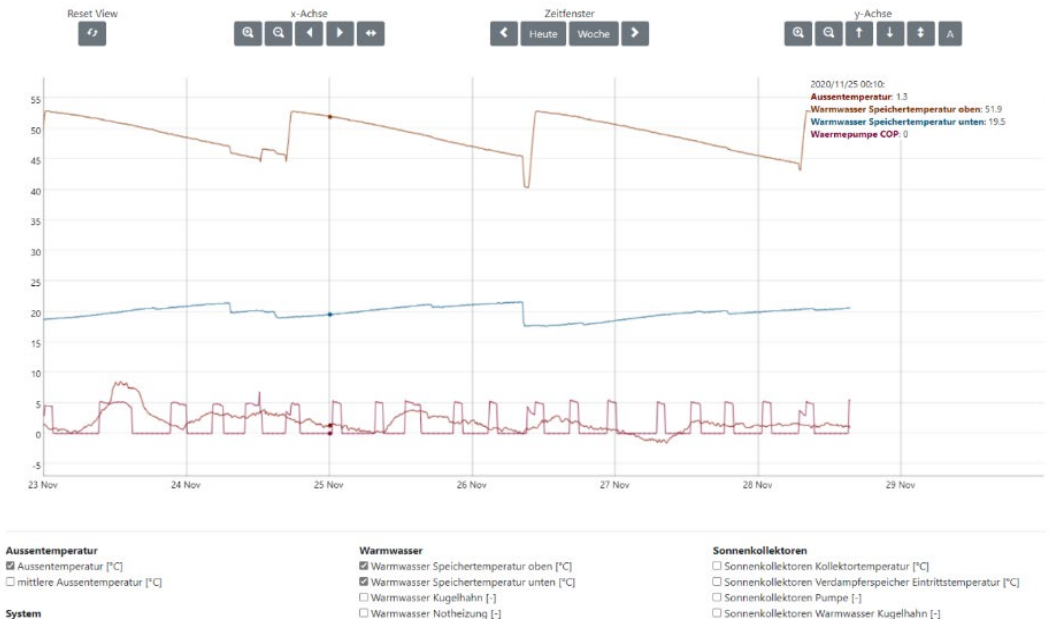

Abbildung 27 Der Wärmeverlust im oberen Bereich des Brauchwarmwasserspeichers zwischen dem 23. und dem 28. November 2020 betrug 5 K pro Tag. Die Aufwärmung auf 52° C erfolgte jeweils nach einem Absinken auf 45° C. Im unteren Teil des Screenshots sind die Temperatur der Aussenluft sowie der COP der Wärmepumpe (periodisch auf 5 steigend) erkennbar.

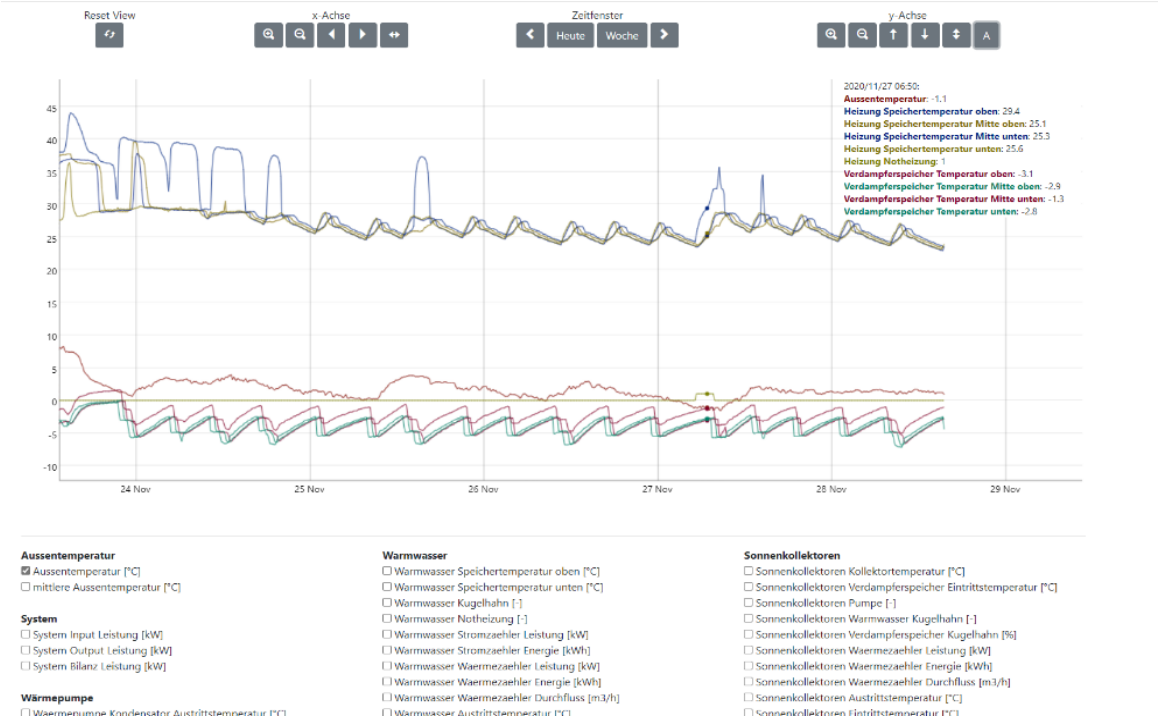

Abbildung 26 Der Screenshot zeigt den Verlauf der Aussentemperaturen und diejenigen von Heizungs- (oben) und Verdampferspeicher (untere Kurvenschar). Vom 23. bis 28. November 2020 reichte die 'solare' Energiegewinnung nicht aus, um die Heizungsspeicher zu laden. Die Energie reichte jeweils nur, um den obersten Speicherteil auf die Solltemperatur der Heizung zu erhöhen. Die Energiegewinnung erfolgte nur konvektiv auf sehr niedrigem Temperaturniveau (-3° C bis -5° C). Am 27. November wurde der Elektroheizstab kurz zugeschaltet (gelbe gerade Linie).

7 Systembetrachtungen

Netlogger bietet laufend einige aktuelle Auswertungen des Gesamtsystems (Abbildung 28). Die JAZ (AZ_{ff}) der Wärmepumpe am 28. November 2020 beträgt 4.3. Sie entspricht der seit Inbetriebnahme erzeugten Wärme dividiert durch den ebenfalls kumulierten Stromverbrauch der Wärmepumpe. Die JAZ des Systems entspricht dem gemessenen gesamten Heiz- und Warmwasserbedarf geteilt durch den Stromverbrauch der Wärmepumpe zuzüglich demjenigen der Heizstäbe im Brauchwarmwasserspeicher und im Heizungsspeicher. Die Zahlen in Abbildung **28** zeigen, dass die solaren Gewinne der beiden Anlagen bei weitem für die Versorgung ausreichen würden, obwohl die Absorber im Sommer zeitweise ausgeschaltet sind.

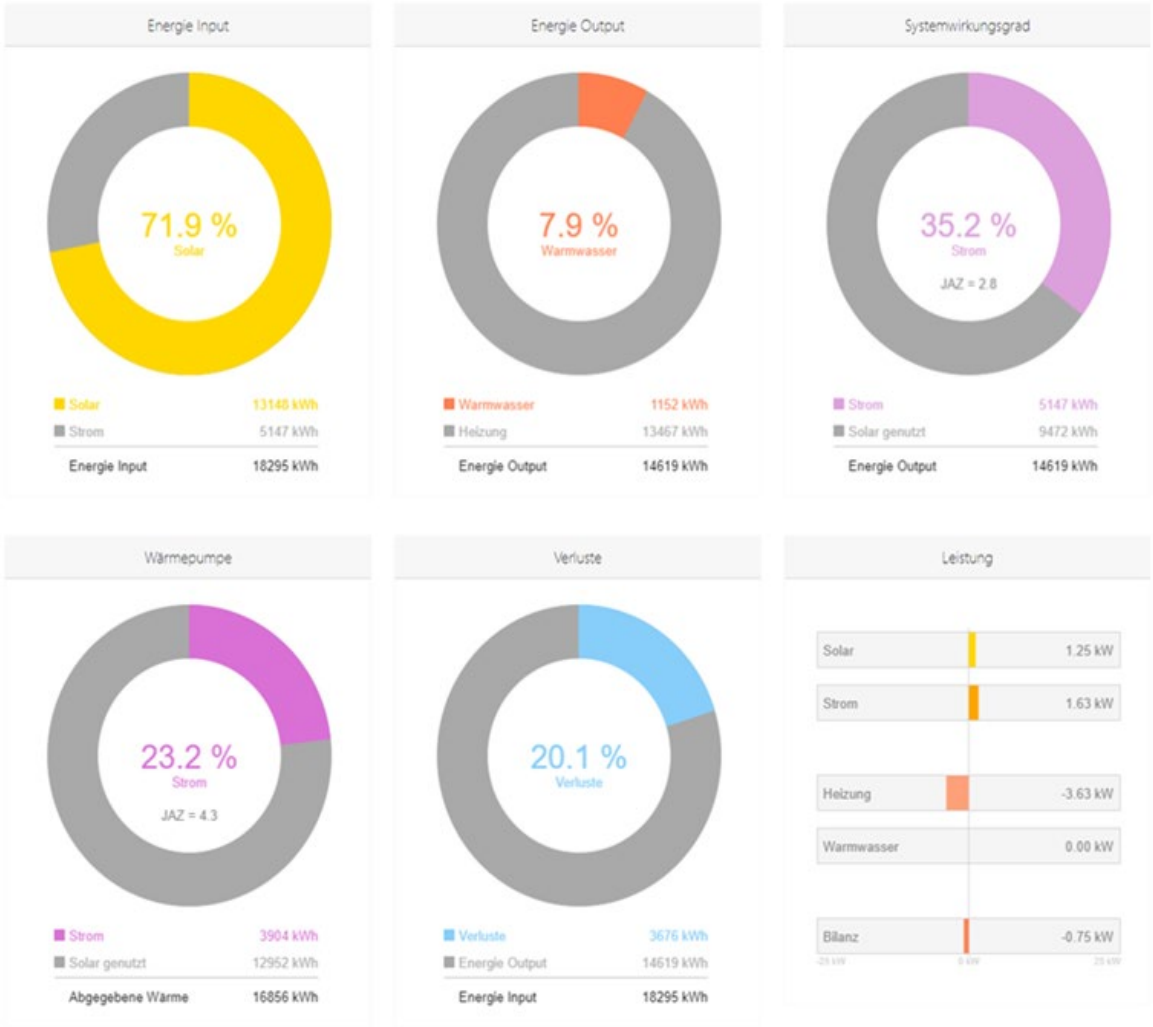

Abbildung 28 Bildschirmdarstellung der laufenden Auswertungen von Netlogger am 28. November 2020 um 15:26 Uhr. Die Kreisdiagramme zeigen die Zählerstände mit den wichtigsten Kennzahlen. Die Balkendiagramme visualisieren die aktuellen Leistungen zum Zeitpunkt der Aufnahme. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (4.3) entspricht der seit Inbetriebnahme produzierten Wärme geteilt durch die Stromaufnahme der Wärmepumpe. Die JAZ des Systems (2.8) bezieht den gesamten Stromverbrauch der Anlage (inkl. Elektro-Heizstäbe) auf die genutzte Wärme.

Das System kann also die notwendige Wärme für Heizung und Brauchwarmwasser erzeugen und ermöglicht sehr hohe Arbeitszahlen der Wärmepumpe. Allerdings fehlen im Dezember und Januar je nach Witterung etwa 1'000 -2'000 kWh Energie.

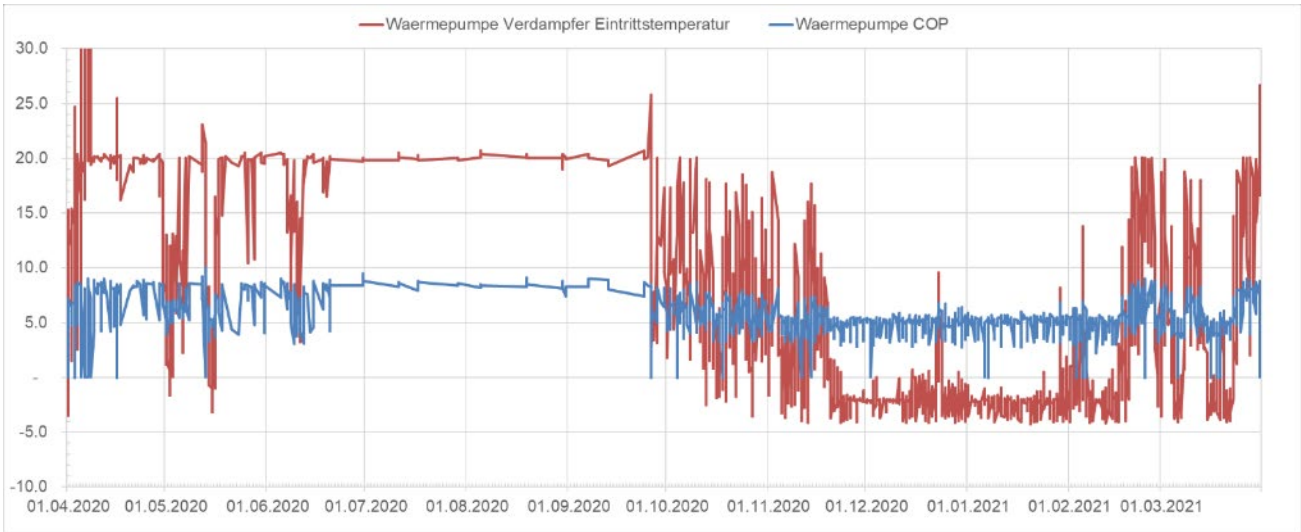

Abbildung 30 Verdampfer Eintrittstemperatur und COP der Wärmepumpe im Jahresverlauf. In den Monaten April bis September sind die Eintrittstemperaturen (rote Linie) in den Verdampferkreislauf meistens bei 20° C und damit bei den maximal möglichen Quellentemperaturen der Wärmepumpe. Ab Oktober sinken sie dann bis auf -5° C, nahe der Minimaltemperatur von -6° C. Entsprechend variiert auch der COP der Wärmepumpe von 9 bis unter 5 (blaue Linie).

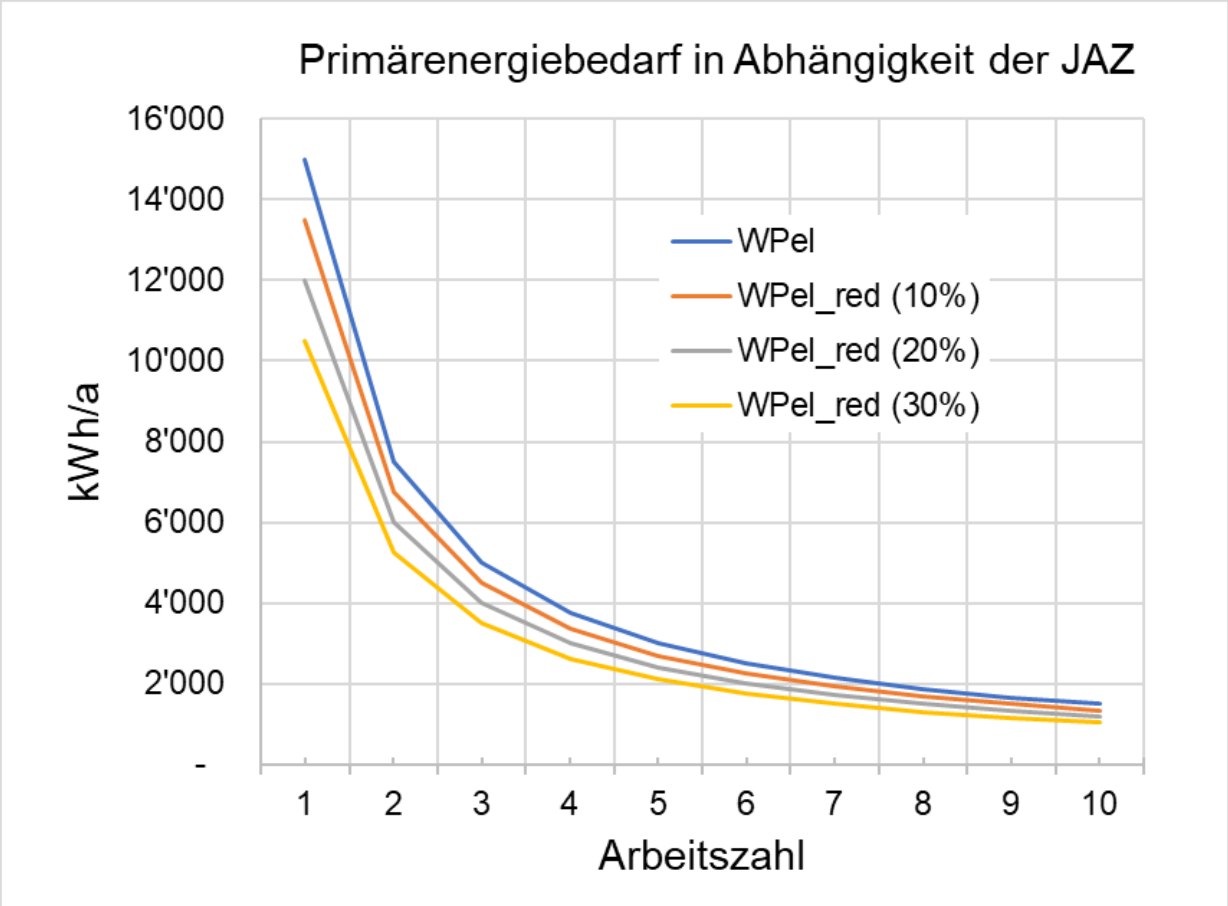

Abbildung 29 Reduktion des Primärenergiebedarfs durch Verbesserung der Arbeitszahl der Wärmepumpe und durch Verminderung des Wärmebedarfs. Verbrauch an Primärenergie pro Jahr = 15'00 kWh. Die Grafik zeigt, dass die maximalen Verbesserungen bis zu einer JAZ von 5-6 erfolgen können. WPel entspricht dem Strombedarf der Wärmepumpe. Dargestellt sind die Kurven für verschiedene Reduktionen des Wärmebedarfs durch Sanierungen.

In Hypothese c) dieses Projektes wird postuliert, dass mit einer Erhöhung der Quellentemperatur die Arbeitszahl einer Wärmepumpe erhöht und damit der Strombedarf der Wärmepumpe gesenkt werden kann. Aus den Darstellungen in Abbildung 30 und Abbildung 31 ist ersichtlich, dass neben der Senkung des gesamten Wärmebedarfs auch die Effizienz der Energienutzung durch die Wärmepumpe, repräsentiert durch den COP, bzw. die Arbeitszahl eine grosse Rolle spielen kann. Eine Erhöhung der Arbeitszahl von 4

auf 6 führt bei einem Gesamtbedarf von 15'000 kWh und einer Senkentemperatur von 35° C zu einer Reduktion des Strombedarfs von 3'750 kWh auf 2'500 kWh. Eine weitere Erhöhung von 6 auf 7 hingegen bringt nur noch eine Reduktion um 357 kWh (Abbildung **30**). Die Steigerung der Arbeitszahl von 4 auf 6 kann durch Erhöhung der Quellentemperatur von -3° C auf 10° C erreicht werden (Abbildung **31**). Für eine Arbeitszahl von 7 müsste die Quellentemperatur 15° C betragen. Für Einsparungen von 1'250 kWh müsste bei einer Quellentemperatur von 10° C die Senkentemperatur unter 25° C, der minimalen Vorlauftemperatur der Heizung liegen. Es lohnt sich also zu prüfen, wo sich eine Optimierung noch lohnt: Bei Investitionen in die Senkung des Wärmebedarfs (Isolation, etc.) oder bei der Effizienzsteigerung der Wärmeerzeugung.

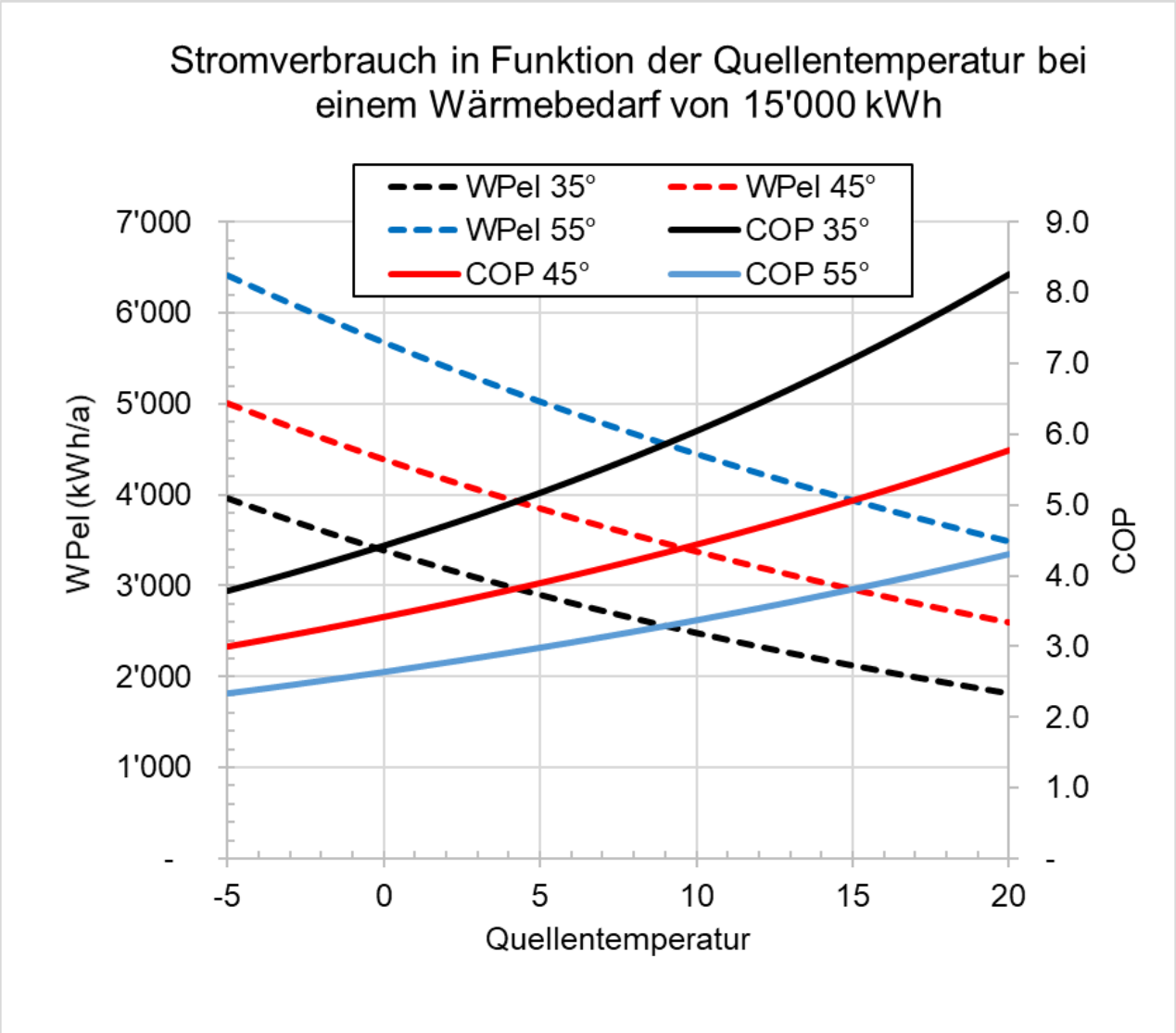

Abbildung 31 Abhängigkeit des Strombedarfs einer Wärmepumpe von der Quellentemperatur (COP) und der Senkentemperatur für die Anlage Winzerstrasse 9 mit der Wärmepumpe CTA Optiheat OH 1-8es, All in One. Das Optimum zwischen Sanierung eines Gebäudes und Wärmeproduktion muss von Fall zu Fall und unter Berücksichtigung der Kosten gesucht werden.

8 Finanzen

Die Kosten der Anlage von rund CHF 130'000 Franken beinhalten verschiedene Komponenten, welche nur für eine solche Pilotanlage anfallen und bei einer allfälligen weiteren Anlage nicht mehr aufgewendet werden müssen. Das AWEL hat für Soleheap einen Teil der zusätzlichen Kosten für Planung, Simulation, Überwachung und Berichterstattung beigetragen; insgesamt CHF 36'738.85.

Teilbereich	**Kosten CHF**	**Bemerkungen**
Planung, Steuerung, Datenerfassung	48'519	Hohe Entwicklungskosten für hydraulisches System und Steuerung
Simulation mit Polysun	4'523	
Installation	91'084	Inkl. Rückbau bestehender Anlage. Installation Zähler und Sensoren für Überwachung. Mehrkosten durch Nicht-Standardlösung
Elektroinstall., Verschiedenes	14'147	Mehraufwand für Überwachung
Total	**158'273**	

Tabelle 2 Effektive Kosten für Planung, Realisierung und Optimierung von Soleheap. Da es sich um eine Pilotanlage handelt, bei welcher zudem eine umfangreiche Messeinrichtung installiert wurde, sind die Kosten stark überhöht.

Je nach Situation und zu realisierendem Konzept fallen folgende Kosten an. Es handelt sich dabei um grobe Schätzwerte anhand der Rechnungen für Soleheap. Die effektiven Kosten reduzieren sich dank Förderbeiträgen und möglichen Steuerabzügen. Sie sind zudem stark abhängig vom Objekt und müssen in jedem Fall durch konkrete Offerten ermittelt werden.

1	Wärmepumpe	CHF 12'000	
1	BWW-Speicher	CHF 8'000	kann kleiner dimensioniert werden
1	Heizungsspeicher	CHF 2'000	evtl. grösser dimensionieren oder 2 Stück
1	Verdampferspeicher	CHF 5’000	evtl. grösser dimensionieren oder 2 Stück
1	Solarabsorber	CHF 7'000	nach Möglichkeit > 8 m^2 montieren
	Leitungen	CHF 7’000	
	Installation	CHF 15’000	
	Planung, Steuerung	CHF 15'000	Standardlösungen wahrscheinlich günstiger
	Total	**CHF 71’000**	

Nicht berücksichtigt sind die Kosten für die Sonnenkollektoren, welche schon 1995 installiert worden sind. Ob sich ein ausgedienter Öltank als Heizungs-, bzw. Pufferspeicher eignet, muss von Fall zu Fall geklärt werden. Ein solcher Tank müsste die Temperaturbedingungen aushalten, gut isolierbar sein und evtl. mit Wärmetauschern ausgestattet werden können. Er sollte mehrere m^3 Inhalt haben und die Anpassungen müssten günstiger sein als die Installation eines neuen Speichers. Im vorliegenden Fall konnte der 2'000 Liter Kunststofftank nicht in das System integriert werden.

Die jährlichen Betriebskosten für die Ölheizung waren CHF 1'400 für Heizöl und CHF 200 für Service. Die Stromkosten für Soleheap belaufen sich auf gut CHF 600, also rund CHF 1'000 günstiger. Die Einsparungen dank höherer Arbeitszahl der Wärmepumpe betragen CHF 400 pro Jahr (15'000 kWh Wärme pro Jahr mit Arbeitszahl 5 ergibt 3'000 kWh Strom à CHF 0.20 (CHF 600), bei AZ 3 CHF 1'000).

9 Erkenntnisse aus dem Projekt

9.1 Forschungsfragen vor der Installation und Antworten nach den ersten Betriebserfahrungen

9.1.1 Fragen gemäss Offerte

1. Wieviel Energie kann mit verglasten und unverglasten Sonnenkollektoren im Jahresverlauf gewonnen werden, wenn die Vorlauftemperaturen mittels Wärmepumpe gesenkt werden?
   Siehe Abbildung **22** für die monatlichen Wärmeerträge. Verglaste Sonnenkollektoren liefern im Dezember und Januar 0.25 – 1.25 kWh/m^2 d. Unverglaste Solarabsorber liefern im Dezember und Januar 1.83 – 2.23 kWh/ m^{2}d

2. Wieviel Konvektionswärme kann mit Sonnenkollektoren an Tagen ohne direkte Strahlung gewonnen werden?
   In den 8 Tagen zwischen dem 24. Nov. 2020 bis 2. Dez. 2020 erzeugten die Solarabsorber 91 kWh (1.4 kWh/d m^2) und die Sonnenkollektoren 26 kWh (0.4 kWh/d m^2). Ich gehe davon aus, dass die Absorber hauptsächlich konvektionelle Wärme nutzten, da sie im Gegensatz zu den Kollektoren auch nachts produzierten.

3. Wie gross müssen Warmwasserspeicher sein, um während der kalten Jahreszeit auszureichen? Können sie anstelle eines Heizöltanks eingebaut oder kann allenfalls dieser entsprechend umgebaut werden?
   Für die Liegenschaft Winzerstrasse 9 bräuchte es einen sehr gut isolierten Speicher von etwa 50 m^3 (Bedarf 2'000 kWh, Temperaturdifferenz 40 K). Der ausgebaute Öltank hatte einen Inhalt von 2 m^3 und war demnach viel zu klein. An seiner Stelle wurden die zwei Verdampferspeicher von je 1 m^3 eingebaut.

4. Wie wirken sich höhere Vorlauftemperaturen auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe und den Stromverbrauch aus?
   Die Leistungskurven für die Wärmepumpe geben die Abhängigkeit des COP von den Vorlauftemperaturen korrekt wieder. Wenn sie an der oberen Betriebsgrenze des Verdampfers sind; im Fall Soleheap also bei 20° C können Arbeitszahlen von 6-9 erzielt werden. Die Erhöhung der JAZ von 3 auf 5 bringt Stromeinsparungen von etwa 25%. Arbeitszahlen über 5 bringen nur geringfügig höhere Einsparungen. Abbildung **23**, Abbildung **30** und Abbildung **31**.

5. Wie muss ein solches System optimal geregelt werden? Welche Parameter sind massgebend?
   Die Temperatur der Quelle (Verdampferspeicher) für die Wärmepumpe sollte möglichst hoch sein, damit die Arbeitszahl möglichst hoch ist. Auf der anderen Seite muss die Vorlauftemperatur für die Solarkollektoren möglichst tief sein, um maximalen Ertrag zu erhalten. Die wichtigsten Steuergrössen sind die Austrittstemperaturen der Kollektoren, die Speichertemperaturen und der Wärmebedarf. Es ist eine nicht triviale Optimierungsaufgabe. Im Winter muss der Ertrag der Wärmepumpe maximiert werden und im Sommer neben der Arbeitszahl der Wärmepumpe vor allem die direkte solare Nutzung.

6. Kann ein solches System konkurrenzfähig gebaut und betrieben werden? Welche Anwendungsbereiche zeichnen sich ab?
   Die Konkurrenzfähigkeit eines solchen Systems ist stark abhängig von den Kosten der Speicher und den Stromkosten. Anwendungsbereiche sind dort, wo Luftwärmepumpen und Erdsonden-Wärmepumpen nicht in Frage kommen. Bei Neubauten mit niedrigem Wärmebedarf und der Möglichkeit, mittelgrosse Speicher und südwärts gerichtete Solaranlagen in die Planung einzubeziehen, kann sich ein solches System durchaus lohnen. Im Gegensatz zu Erdsonden-Anlagen verbessern sich die Erträge bei zunehmender Solarstrahlung bereits ab Ende Januar.

9.1.2 Fragen gemäss Auftrag AWEL

7. Reicht die Umnutzung eines bestehenden Öltanks in einen Solartank in einem EFH aus, um den Wärmebedarf vollständig mit einer WP/Solar-Systemlösung abdecken zu können?
   Eher nicht. Siehe Auswertungen in diesem Bericht und Antwort zu Frage 3.

8. Welche Voraussetzung bestehen bezüglich Gebäudehülle/Wärmebedarf?
Je kleiner der Wärmebedarf, desto eher ist das System geeignet. Allerdings nimmt der Grenznutzen mit besserer Wärmedämmung ab und es lohnt sich eher in die erneuerbare Produktion von Wärme zu investieren. Siehe Abbildung **30**.

9. Wie müssen Solaranlage(n) und Solartank dimensioniert werden? Braucht es zusätzliche Speicher? Raumbedarf?
Die Solaranlage muss im Monatsmittel den Bedarf decken können (siehe Abbildung **22**). Damit möglichst tiefe Temperaturen (0° C bis –6° C oder kälter) genutzt werden können, braucht es mindestens einen Heizungsspeicher und einen Verdampferspeicher. Der Speicher sollte so dimensioniert werden, dass etwa 10 Tagesbedarfe gespeichert werden können.

10. Wie muss die Regelung des Systems zur Ertragsoptimierung erfolgen?
Bei Soleheap muss insbesondere in der kalten Jahreszeit der Ertrag optimiert, bzw. maximiert werden. Siehe Antwort zu Frage 5. Die Vorlauftemperaturen der Solarabsorber sollten möglichst tief sein. Evtl. lohnt sich ein zweistufiges System mit Verdampferspeicher auf verschiedenen Temperaturniveaus. Ein Speicher als Quelle für die Wärmepumpe und einer als Vorlauf für die Solarkollektoren.

11. Welche Effizienz des Systems wird erreicht? (COP, JAZ, Anteil Stromaufwand für Hilfsantriebe, Verlauf Temperaturen im Quellenspeicher (Verdampfertank), …)
Die Jahresarbeitszahl über 12 Monate liegt bei 5.3 und über die ganze Periode seit Inbetriebnahme bei 4.6. Dabei ist der Anteil der Verdampferpumpe, welche auch den Kreislauf des Solarabsorbers betreibt eingeschlossen. Die beiden Heizstäbe benötigten noch etwa 30% zusätzlichen Strom. Die Temperaturen des Verdampferspeichers variieren zwischen -6° C im Winter und über 50° C im Sommer. Sobald die Sonne scheint, steigt die Temperatur auch im Winter auf über 20° C an.

12. Wie hoch sind die Kosten für die Umstellung für ein typisches EFH (ohne Zusatzkosten für Messapparaturen und Erfolgskontrolle)? Vergleich gegenüber Erdsonden- Wärmepumpen und Luft-Wasser-WP-Lösungen für das gleiche Objekt (grobe Abschätzung zu Investitionen, Jahreskosten, Effizienz, …).
Die Kosten liegen in der Grössenordnung von ca. CHF 70'000 und damit über denjenigen für eine klassische Wärmepumpe (ca. CHF 40-50'000). Die Einsparungen für Stromkosten bei einer Steigerung der Arbeitszahl um 2 Einheiten betragen ca. CHF 400 pro Jahr.

13. Was braucht es, um einen Öltank zu einem Speichertank umzurüsten (konkreter Lösungsvorschlag)?
In erster Linie braucht es eine sehr günstige Möglichkeit den Tank gut zu isolieren. Er sollte möglichst gross sein (>20 m^3) und muss hohe Temperaturen (80° C) und grosse Temperaturschwankungen (>50 K) aushalten. In der Regel sind Öltanks zu klein, um genügend Energie speichern zu können (siehe auch Antwort zu Frage 3). Forschung und Praxis sind deshalb einmal mehr gefordert, bessere und günstigere Speichersysteme zu entwickeln, die an Ort gebaut werden können.

9.1.3 Fragen und Anregungen für Forschung und Entwicklung

1. Wie kann die Nutzung von Solarabsorbern zur konvektiven Energiegewinnung während strahlungsarmen Zeiten durch verändertes Design (Oberflächenvergrösserung, etc.) verbessert werden?

2. Verglaste Sonnenkollektoren sollten so gebaut werden, dass sie auch tiefe Vorlauftemperaturen ohne Kondensationsprobleme verkraften.

3. Der Wissenstransfer in die Praxis sollte optimiert werden. In der IEA Task 44 Annex 38 wurden ähnliche kombinierte Systeme untersucht, sie scheinen aber den Weg in die Praxis kaum zu finden. Alte Erfahrungen haben eine sehr lange Lebensdauer.

4. Standardlösungen sind selten optimal und spezifische Planung ist sehr teuer. Einfache Werkzeuge für die massgeschneiderte Planung von Anlagen wären hilfreich.

5. Wie können dezentrale Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit erneuerbarer Energie wie zum Beispiel H_2-Brennstoffzellen in stationären Anwendungen verbreitet werden? In Automobilen gehören sie bereits zum Standard und für Gebäudeheizungen sind sie kaum erhältlich. Sie wären die ideale Ergänzung zu Soleheap.

9.1.4 Fragen an die Praxis

6. Wie können Installateure unterstützt werden, nicht nur ihre Standardlösung zu implementieren?
7. Für Hausbesitzer ist eine spezifische Planung für sein Objekt zu teuer und zahlt sich angesichts der günstigen Energie kaum aus. Für (kleine) Planungsbüros ist es praktisch unmöglich, Entwicklungsarbeit zu machen. Installateure haben weder Zeit noch Geld, um Pilot- und Demonstrationsanlagen zu bauen. Wie kann Neues trotzdem entstehen?

10 Fazit

10.1 Erfahrungen

Soleheap funktioniert seit der Erhöhung des Leitungsquerschnitts der Solarabsorber einwandfrei und erreicht auch bei Quellentemperaturen unter 0° C sehr gute Arbeitszahlen. Sobald die Sonne scheint, genügt die Energie, um den Bedarf an Heizwärme und für Brauchwarmwasser zu decken und auch, um die Speicher zu laden. Während langen kalten Perioden ohne Sonnenstrahlung ist die Versorgung knapp und die Absorber vereisen komplett, ohne zwischendurch aufzutauen. Der Ertrag sinkt entsprechend und die Möglichkeit aus einer zusätzlichen Energiequelle (Holzofen, Speicher, Brennstoffzelle, etc.) Wärme für den Verdampfer beziehen zu können, ist notwendig.

Die Verluste, also die Differenz zwischen Energieinput und genutzter Wärme, betragen rund 20%. Die genauen Ursachen dafür müssen noch gesucht werden. Ein Teil davon ist sicher auf die hohen Speicherverluste und die nicht optimale Speicherbewirtschaftung zurückzuführen. Vor allem im Sommerhalbjahr können die solaren Erträge nicht vollständig genutzt werden.

Die zu kleinen Kellertüren verunmöglichen nicht nur in diesem Haus das Einbringen von genügend grossen Speichern, sondern sind ein weit verbreitetes Problem. Die Dacharchitektur mit Aufbauten, Lüftungsrohren und Kaminen erschwert den Bau von Solaranlagen. Aspekte, welche die Kosten beim Heizungsersatz massgeblich erhöhen. Die klassischen Sonnenkollektoren können wegen Kondensationsproblemen nicht mit tiefen Vorlauftemperaturen betrieben werden.

10.2 Machbarkeit

Solare Unterstützung von Wärmepumpenheizungen ermöglicht dank höheren Quellentemperaturen auch höhere Arbeitszahlen der Wärmepumpen gegenüber solchen von Luft/Wasser Wärmepumpenanlagen. Der Strombedarf kann damit vermindert werden. Das System braucht Speicher, um tiefe Temperaturen effizient zu nutzen und um Perioden mit geringer Einstrahlung zu überbrücken. Gegenüber solaren Heizsystemen mit grossen Saisonspeichern hat Soleheap den Vorteil, dass bei guter Auslegung nur kleine Speicher notwendig sind. Solche können auch bei Sanierungen nachträglich eingebaut werden. Falls nicht eine genügend grosse Fläche für Solarkollektoren zur Verfügung steht, braucht es je nach lokalem Klima und Wärmebedarf in den Monaten November bis Januar eine zusätzliche Wärmequelle.

Heizöltanks eignen sich höchstens in Ausnahmefällen als Speicher in Systemen wie Soleheap. Als Wärmespeicher sind sie zu klein und als Verdampferspeicher mit Sole eher zu gross.

Das System Soleheap ist eine Alternative zu Erdsonden und Aussenanlagen für Luft/Wasser-Wärmepumpen. Vor allem in Neubauten mit niedrigem Energiebedarf kann Soleheap während des ganzen Jahres bei tiefem Stromverbrauch genügend Energie liefern. Ein früher Einbezug der Anlage in die Planung lohnt sich in jedem Fall. Eine solare Aufwärmung des Verdampfervorlaufs bei Erdsonden-Wärmepumpen ist als Alternative zu Erdsondenregeneration zu prüfen. Sie würde bei gleichzeitiger Schonung der Erdsonde zu höheren Quellentemperaturen und entsprechend besseren Arbeitszahlen führen.

10.3 Empfehlungen und Ideen zur Weiterentwicklung

Solarabsorber können neben der Strahlungs- und Konvektionswärme auch die Kristallisationswärme von Wasser in der Luft nutzen. Gängige unverglaste Kollektoren könnten für solche kombinierten Nutzungen sicher noch optimiert werden. Zum Beispiel durch Vergrösserung der Oberfläche. Dazu wären fast beliebige Strukturen und Formen möglich. Denkbar wären zum Beispiel entsprechend gestaltete Schneefänger, Dachrinnen oder Giebel.

Die grösste Herausforderung ist die Entwicklung von besseren Langzeitspeichern. Diese sollten günstiger, dichter und flexibler installierbar sein als die heutigen Systeme. Hilfreich wäre es auch, wenn Heizungsräume für den Einbau von Speichern zugänglicher gemacht würden. Idealerweise sollte die Speicherung von 10-20 Tagesbedarfen ermöglicht werden.

Wärmepumpen sind sehr effizient. Für ein System wie Soleheap sollten sie aber auch tiefere Temperaturen als -6° C nutzen können. Ab Quellentemperaturen von 20° C und COP von 6 müssen weitere Optimierungen unter Berücksichtigung der Kosten und der Nachhaltigkeit erfolgen. Dazu fehlen einfache Planungshilfen für

Bauherren und Installateure. Es werden meisten Standardlösungen eingebaut, welche sicher funktionieren und dank weiter Verbreitung günstig sind.

Da in der Regel nur wenige Wochen pro Jahr kritisch sind, wäre die ideale Ergänzung von Soleheap eine günstige kleine Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage. Ein Notstromaggregat, welches gleichzeitig Strom und Wärme liefert. Solche H_2 Brennstoffzellen gibt es bereits für Automobile und zunehmend auch für stationäre Anwendungen. Auch Konzepte zur Nutzung von Aluminium als Wärme und Stromlieferant sind vielversprechend ([8]). Viele dieser Systeme müssen noch weiterentwickelt und zur Marktreife gebracht werden. Sie haben den grossen Vorteil, dass sie dazu beitragen können, die sich verstärkende Stromlücke im Winter schliessen zu helfen.

Möglichkeiten einer Verbesserung von Soleheap an der Winzerstrasse 9 sind: Erschliessen einer zusätzlichen Wärmequelle wie zum Beispiel einer Erdsonde, Montage zusätzlicher Solarabsorber, Installation von verglasten Sonnenkollektoren, welche auch tiefe Vorlauftemperaturen erlauben, Einbau eines Langzeitspeichers, Senkung des Bedarfs durch Nachisolation, Installation einer Wärmepumpe, die noch tiefere Temperaturen nutzen kann. Die ideale Lösung wäre allerdings die Installation einer Notstromanlage bei der sowohl Strom als auch Wärme genutzt werden kann.

Forschung, Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte sollten stärker gefördert werden.

11 Dank

Dieses Projekt konnte nur dank der Offenheit der beteiligten Firmen, bzw. der Ansprechpersonen für neue Ideen realisiert werden. Das verdient einen besonderen Dank.

Michael Woodtli und Arthur Huber Hetag sind geduldig und kompetent auf meine Wünsche eingegangen und haben das hydraulische Konzept erarbeitet, Markus Widmer EK Energiekonzepte AG hat die Machbarkeit verschiedenster Varianten mit Polysun geprüft, Urs Jaeggi JGE hat es mit seinen Mitarbeitern gebaut und Markus Morf Stromwerkstatt hat die vielen Leitungen gelegt. Beat Lehmann vom AWEL danke ich für seine positive Unterstützung bei der Projektformulierung für das AWEL und seine hilfreichen Kommentare zum Bericht. Meiner Partnerin Ursula Rossi danke ich für ihre Geduld und meinem Sohn Alain für die konstruktiv-kritische Durchsicht des Berichts.

Das Projekt ist spannend und bereitet mir viel Freude.

quidconsult
Dr. Herbert Güttinger
Winzerstrasse 9
8353 Elgg

052 364 2480 / 079 416 1489
www.quidconsult.ch
info@quidconsult.ch

12 Anhang

12.1 Abkürzungen und Definitionen

Die Bezeichnungen in dieser Studie lehnen sich an diejenigen der BFE Publikation [9] an.

Abkürzungen

12m	über 12 Monate
a	aussen
a	Jahr
A	Aufladung WW
abs	Absorber
AZ	Arbeitszahl
COP	Coefficient of performance
d	Tag
E	Energie (kWh)
el	elektrisch
ff	fortlaufend
H	Heizung
JAZ	Jahresarbeitszahl
koll	Kollektor
Mt, mon, m	Monat, monatlich
N	Nutzer
P	Leistung (kW)
Q	Wärme (kWh)
Q	Quelle
R	Rücklauf
S	Senke
Sabs	Solarabsorber
Skoll	Sonnenkollektoren
SNG	Systemnutzungsgrad
Sp	Speicher
SR	Steuerung und Regelung
T	Temperatur (° C, K)
tot	Total
UP	Umwälzpumpe
V	Vorlauf
Verd	Verdampfer
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ZH	Zusatzheizung (H_{el}, WW_{el})

Definitionen

AZ_m	=	$(Q_H + Q_A) / (E_{tot} – E_{UP_Senke} – E_{ext_HS})$
COP	=	$Q_{WP} / (P_{WP} + (P_V) + (P_K) + P_{SR})$ Coefficient of Performance
E_{tot}	=	$E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} – E_{ZH}$
JAZ	=	Q_{WP} / E_{tot}
$Q_{N,H}$	=	Beim Nutzer verfügbare Heizwärme
$Q_{N,WW}$	=	Beim Nutzer verfügbare Warmwasserwärme
Q_{WP}	=	Von der Wärmepumpe produzierte Wärme
WNG	=	$(Q_H + Q_A) / (E_{tot})$

12.2 Literaturverzeichnis

[1] M. Y. Haller und et al., «SOL-HEAP. Solar and Heat Pump Combisystems,» BFE Bern. SPF Rapperswil, Bern, 2014.

[2] A. Huber, S. Eberle und M. Chamberlin, «Saisonspeicherung von Sonnenenergie in einem Erdwärmesondenfeld,» Kanton Zürich. Baudirektion. AWEL, Zürich, 2018.

[3] J. Jenni, «Solaranlage mit Wärmepumpe,» Jenni Energietechnik AG, Oberburg, 2010?.

[4] M. Ménard und L. Mattei, «Schlussbericht. Erhöhung der Quellentemperatur von Wärmepumpen. Auswirkungen auf Jahresarbeitszahl und Wirtschaftlichkeit,» Stadt Zürich. Amt für Hochbauten. Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, Zürich, 2011.

[5] D. Sauter und et al., «L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe.,» Bundesamt für Energie BFE; ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil, 2019.

[6] C. Arpagaus und E. M. Berthold Matthias, «Jahresbericht 2017. Bericht "WP-Feldmessungen". Wärmepumpen-Anlagen 2015-2018 (Auswertung verlängert bis Dez. 2019),» EnergieSchweiz, 2019.

[7] M. Prinzing, M. Berthold, M. Eschmann und S. Bertsch, «Bericht "Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2019/20",» EnergieSchweiz, Bern, 2020.

[8] M. Haller, «Projekt AlEnCycles. Wärme und Wasserstoff aus Recycling-Aluminium,» Bd. Newsletter 1, Nr. April 2021, 2021.

[9] R. Dott und et al., «Wärmepumpen Planung / Optimierung / Betrieb / Wartung.,» EnergieSchweiz www.energieschweiz.ch. Autorisierter Separatdruck des Faktor Verlags. 5. vollständig, 2008.

[10] CTA AG, Heizungs- und Warmwasserspeicher. Technische Dokumentation, Münsingen: CTA AG, 2019.

[11] CTA AG, Technisches Handbuch Sole/Wasser: Optiheat All-in-One, Bde. %1 von %2Buch 1: OH 1-5es bis OH 1-18es, CH-3110 Münsingen: CTA AG Hunzigenstrasse 2, CH-3110 Münsingen,, 2018.

[12] D. Sauter, M. Hunziker, M. Schubert, N. Sperr, M. Koch und J. Rohrer, L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe, Wädenswil: IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen der ZHAW, 2019.

12.3 Technische Angaben zu Soleheap

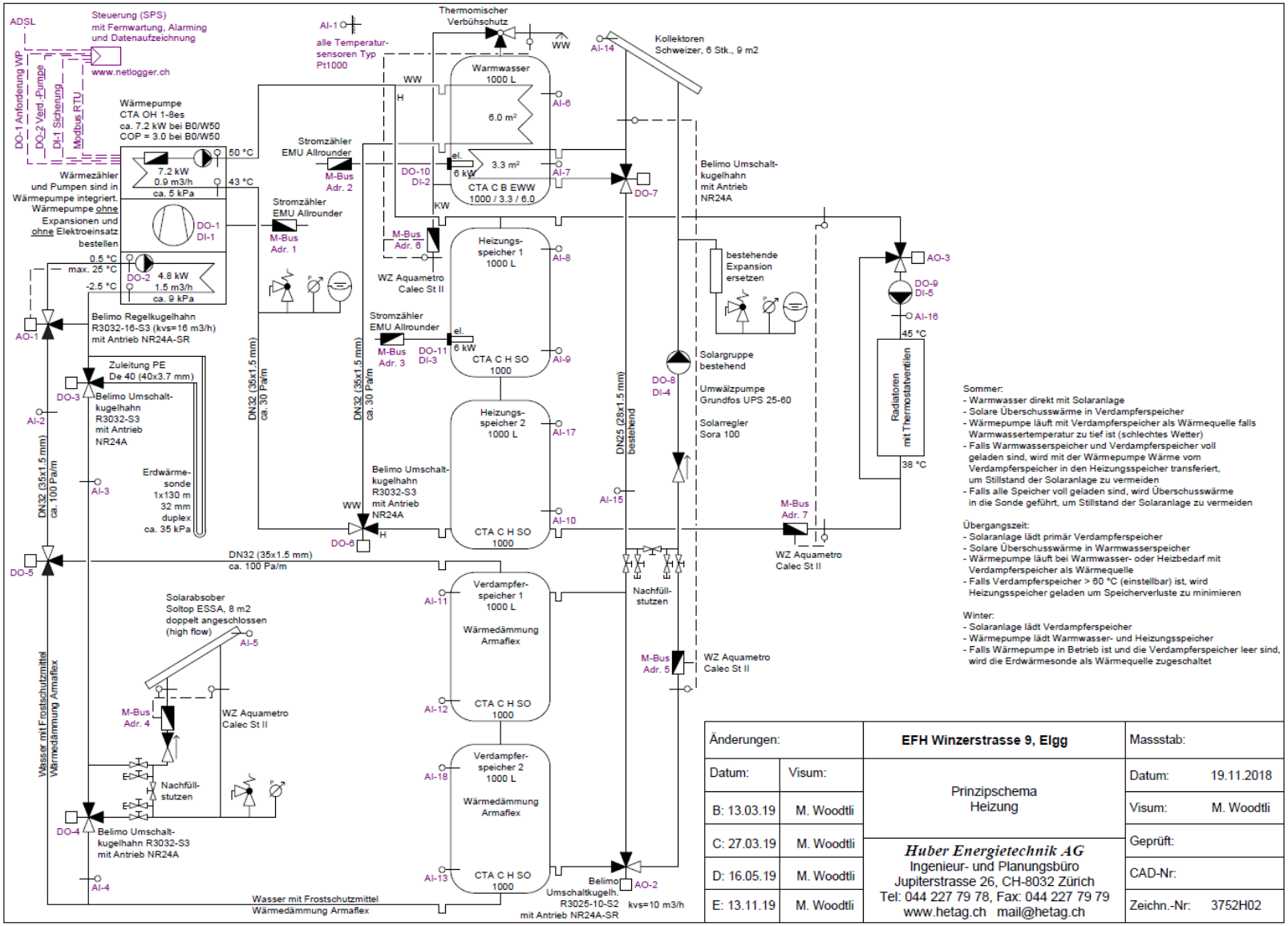

Abbildung 32 Prinzipschema Soleheap.

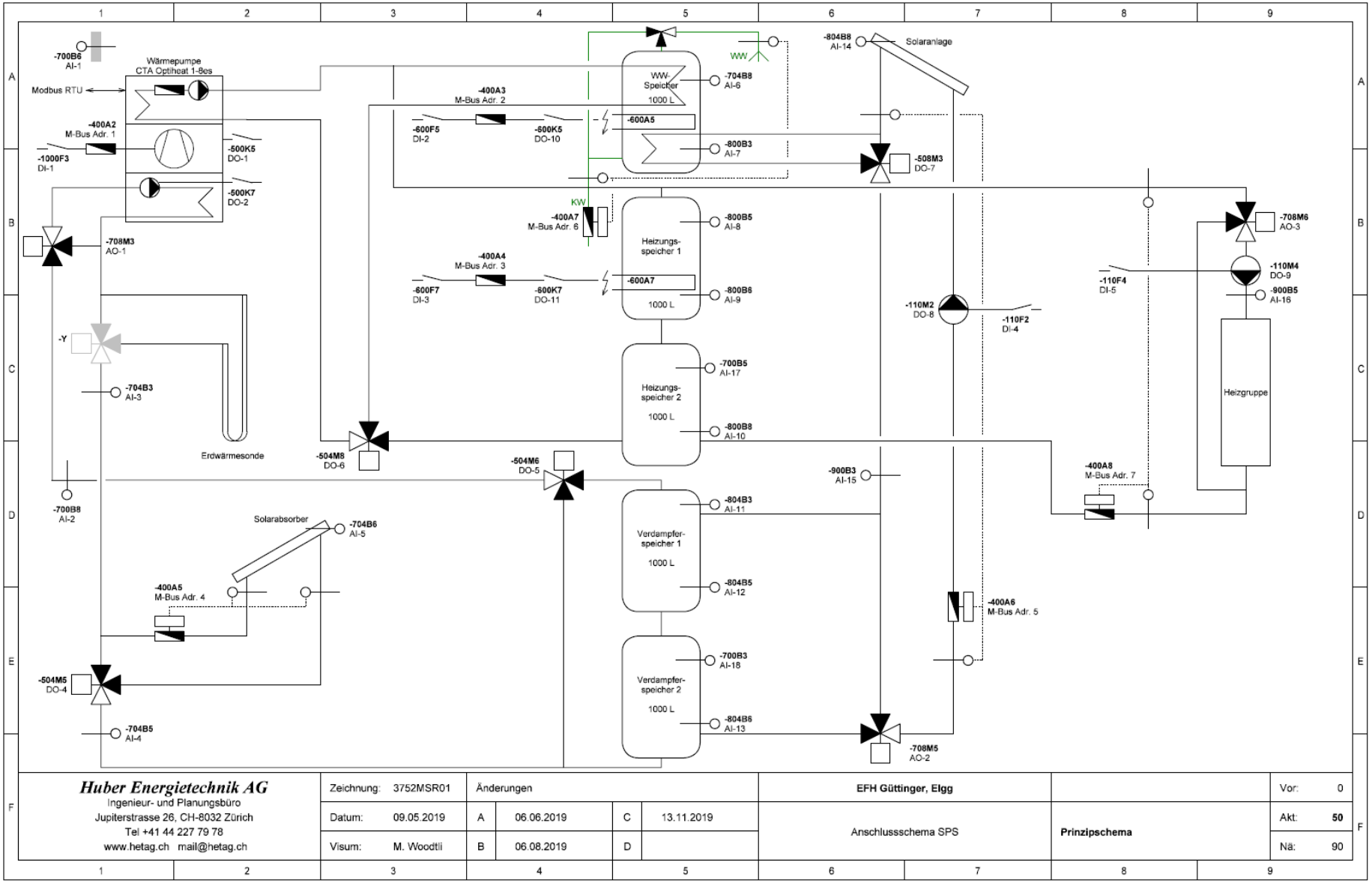

Abbildung 33 Hydraulisches Schema der Anlage.

12.3.1 Komponenten der Anlage

1 Wärmepumpe CTA Optiheat OH 1-8es, All in One, CTA AG, CH-3110 Münsingen, www.cta.ch

2 Kältespeicher C H K S 1000, 887 Liter, CTA AG ([10])

2 Pufferspeicher C H H SO 1000, 887 Liter, CTA AG

1 Brauchwarmwasserspeicher C H B EWW 1000/ 3.5/ 6.0, 1000 Liter, CTA AG

4 ESSA Solarabsorber à 1.92 m^2 von Energie Solaire SA, CH-3960 Siders, www.energie-solaire.com

EK Frostschutz Protect P 100%, Wasser/Ethylenglykol % 75/25

2 Wärmezähler Solaranlage CALEC ST NM_PMGF/S DN 25

1 Wärmezähler Warmwasser CALEC ST NM_PMGF/S DN 25

1 Wärmezähler Warmwasser CALEC ST NM_PMGF/S DN 20