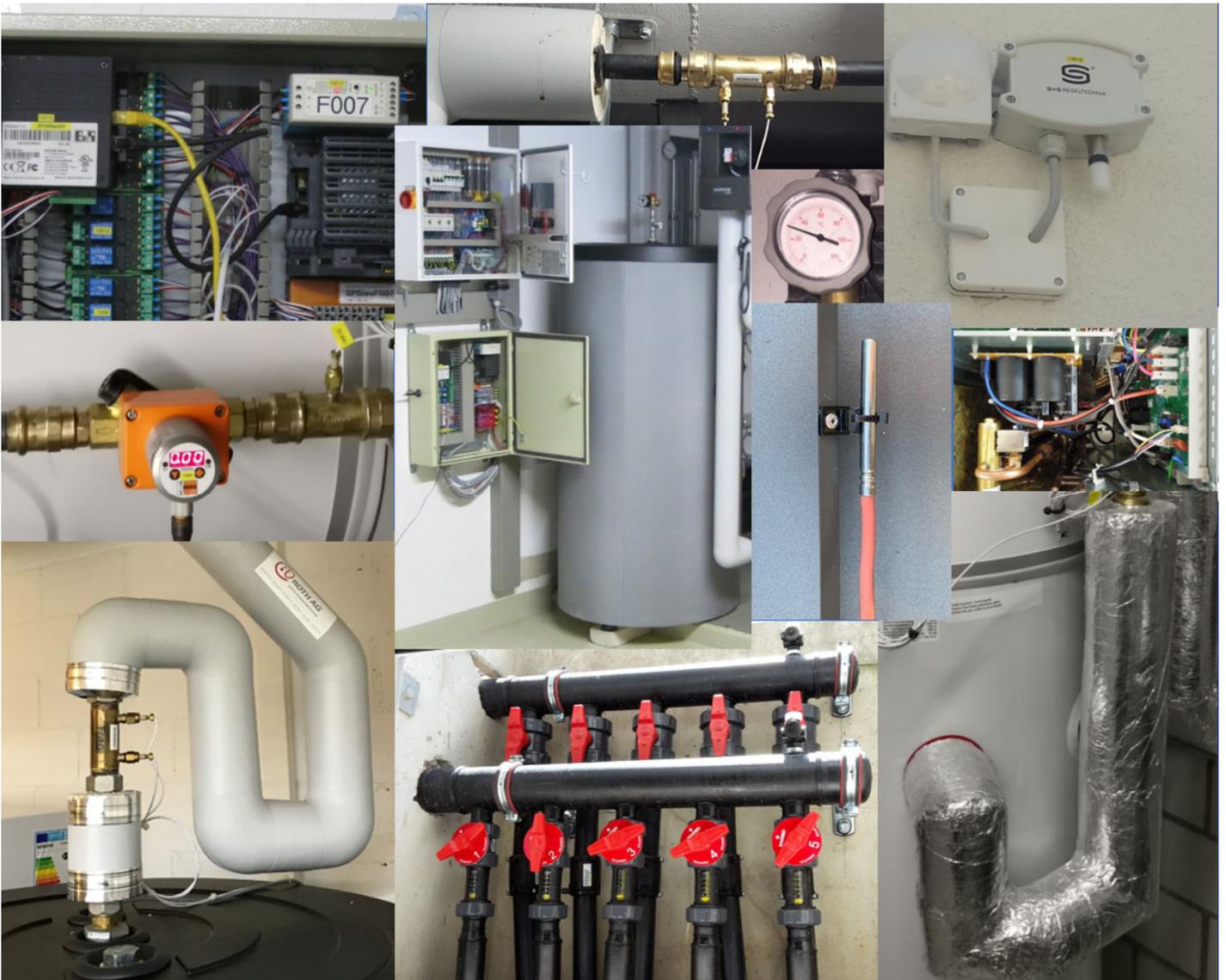


Jahresbericht, 2. November 2022

# Bericht «Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2021/22»



**Autoren**

Matthias Berthold, Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule  
Michael Uhlmann, Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule  
Stefan Bertsch, Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule  
Mick Eschmann, Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.  
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Projektziele .....</b>	<b>6</b>
1.1	Objektbeschreibungen .....	6
1.2	Systemgrenzen und Kennzahlen .....	16
<b>2.</b>	<b>Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen .....</b>	<b>20</b>
2.1	Vergleich der Effizienzkennziffern (JAZ und WNG).....	20
2.2	Einfluss des Temperaturniveaus .....	22
2.3	Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung .....	25
2.4	Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage .....	28
2.5	Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb.....	31
2.6	Temperaturverlauf der Erdwärmesonden (EWS) .....	32
2.7	Optimierungen und Diverses .....	34
2.7.1	Optimierungsmassnahmen bei Objekt 24.....	35
<b>3.</b>	<b>Spezialauswertungen im Detail .....</b>	<b>38</b>
3.1	Strombedarf und ausgewählte Grössen im Tagesverlauf .....	38
3.2	Heatmaps ausgewählter Grössen und Zeitbereiche .....	39
3.2.1	Auflade-Verlauf .....	40
3.2.2	Heizstab-Einsatz .....	43
3.2.3	EW-Sperre .....	46
3.2.4	Laufzeitvergleich zweier drehzalgeregelten Luft/Wasser Wärmepumpen (Inverter-WP).....	47
3.3	Inverter-Wärmepumpen .....	50
3.3.1	Vergleich von On/Off- und Inverter-Wärmepumpen .....	50
3.3.2	Standby-Verluste bei Inverter Wärmepumpen im Vergleich zu On/Off-Wärmepumpen .....	53
3.4	TWW-Aufbereitung mit eigenen TW-Wärmepumpen .....	54
3.4.1	Effizienz-Vergleich von Trinkwarmwasser-Wärmepumpen mit Luft/Wasser-Wärmepumpen .....	54
3.4.2	Voraussetzung für den Einsatz einer Trinkwasser-Wärmepumpe .....	57
<b>4.</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>58</b>
4.1	Veröffentlichungen / Seminare / Weiterbildung .....	59
<b>5.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>61</b>
5.1	Methodik und Messequipment.....	61

# Zusammenfassung

Für diesen Jahresbericht sind die Messdaten von 25 Wärmepumpenanlagen über insgesamt 91 Heizperioden verfügbar. Zwölf Anlagen beziehen die Umweltenergie aus Erdwärmesonden, 13 Anlagen aus der Umgebungsluft. Bei vier Objekten (Objekte 8, 14, 19 und 23) erfolgt die Aufladung des Trinkwarmwassers mit einer separaten Wärmepumpe, einem sogenannten Wärmepumpenboiler.

Für diesen Bericht konnten zwei zusätzliche Objekte in die Auswertungen aufgenommen werden, ein neu gebautes Einfamilienhaus mit einer Luft/Wasser-Inverter-Wärmepumpe und ein Mehrfamilienhaus, bestehend aus zwei Gebäuden mit je 18 Wohnungen, mit zwei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Ende November wurde mit Objekt 27 noch eine weitere Luft/Wasser-Wärmepumpe in die Messkampagne aufgenommen. Diese ist in diesem Bericht aber noch nicht enthalten, da die ersten 3 Monate der Heizsaison 2021/22 fehlen - und somit ein Vergleich mit den Jahreskennwerte vollständiger Heizperioden kaum möglich ist.

Alle Wärmepumpenanlagen werden zunächst während mindestens einer Heizperiode auf Ihre Effizienz überprüft. Wird ein realisierbares Optimierungspotential identifiziert, finden dann in Absprache mit den Besitzern Betriebsoptimierungen statt. In der folgenden Heizsaison wird dann der Einfluss der Optimierungsmassnahmen auf die Anlageneffizienz analysiert.

Die Wärmepumpen aus den Feldmessungen stehen in Gebäuden an verschiedenen klimatischen Standorten. Die Gebäude unterscheiden sich sowohl bezüglich Gebäudehülle, Wärmeabgabesystem sowie Bewohneranzahl und deren Nutzerverhalten, was Auswirkungen auf die Effizienz der Anlagen mit sich bringt. Bei **Luft/Wasser-Wärmepumpen** ist in der letzten Heizsaison (HS 2021/22) ein durchschnittlicher **Wärmenutzungsgrad (WNG)** für Heizen und Aufladung des Trinkwarmwassers von **3.10** (WNG-Bereich von 2.36 bei Objekt 25 bis 4.06 bei Objekt 15) gemessen worden.

**Sole/Wasser-Wärmepumpen** mit Erdwärmesonden überbieten diese Werte mit durchschnittlich **4.23** (WNG Bereich von 3.00 bei Objekt 26 bis 5.18 bei Objekt 21).

Neben den jährlichen Auswertungen in Kapitel 2 «Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen» werden in Kapitel 3 in Abstimmung mit dem Auftraggeber BFE Spezialthemen bearbeitet. Dieses Jahr werden die folgenden vier Themenbereiche genauer analysiert.

1. Der Strombedarf von Wärmepumpen im Tagesverlauf und mögliche Energieeinsparungen durch Verschieben des Betriebes in andere Zeitfenster.
2. Eine anschauliche Darstellung des tageszeitlichen Verhaltens von Wärmepumpen mittels Heatmaps.
3. Vor- und Nachteile von Inverter Wärmepumpen gegenüber On/Off-Wärmepumpen.
4. Ein Vergleich von Trinkwarmwasser-Wärmepumpen mit Luft/Wasser-Wärmepumpen.

## Résumé

Ce rapport annuel comprend les données de mesure de 25 installations de pompes à chaleur sur un total de 91 périodes de chauffage. Douze installations puisent l'énergie environnementale dans des sondes géothermiques et 13 dans l'air ambiant. Pour quatre objets (objets 8, 14, 19 et 23), la charge de l'eau chaude sanitaire est assurée par une pompe à chaleur séparée, appelée chauffe-eau à pompe à chaleur.

Les évaluations de ce rapport intègrent deux objets supplémentaires: une maison individuelle nouvellement construite équipée d'une pompe à chaleur air/eau à inverseur et un immeuble collectif, composé de deux bâtiments de 18 appartements chacun, équipé de deux pompes à chaleur sol/eau.

Fin novembre, une autre pompe à chaleur air/eau, l'objet 27, a été ajoutée à la campagne de mesure. Celle-ci n'est toutefois pas encore incluse dans ce rapport, car les trois premiers mois de la saison de chauffage 2021/22 manquent – et il n'est donc guère possible de comparer les valeurs caractéristiques annuelles avec celles de périodes de chauffage complètes.

L'efficacité de toutes les installations de pompes à chaleur est d'abord testée pendant au moins une période de chauffage. Si un potentiel d'optimisation réalisable est identifié, des optimisations de l'exploitation ont lieu en concertation avec les propriétaires. L'influence des mesures d'optimisation sur l'efficacité de l'installation est ensuite analysée lors de la saison de chauffage suivante.

Les pompes à chaleur issues des mesures sur le terrain se trouvent dans des bâtiments situés à différents endroits climatiques. Les bâtiments se distinguent tant par leur enveloppe, leur système d'émission de chaleur que par le nombre d'occupants et leur comportement, ce qui a des répercussions sur l'efficacité des installations. Pour les **pompes à chaleur air/eau**, un **taux d'utilisation de la chaleur (TUC)** moyen de **3,10** pour le chauffage et la charge de l'eau chaude sanitaire a été mesuré lors de la dernière saison de chauffage (SC 2021/22) (plage du TUC de 2,36 pour l'objet 25 à 4,06 pour l'objet 15).

**Les pompes à chaleur eau glycolée/eau** avec sondes géothermiques dépassent ces valeurs avec **4,23** en moyenne (plage TUC de 3,00 pour l'objet 26 à 5,18 pour l'objet 21).

Les évaluations annuelles sont formulées dans le chapitre 2 «Résultats et évaluations des installations de pompes à chaleur» et le chapitre 3 traite de thèmes spéciaux en accord avec le mandant OFEN. Cette année, les quatre thèmes suivants sont analysés plus en détail.

1. Le besoin en électricité des pompes à chaleur au cours de la journée et les économies d'énergie possibles en déplaçant le fonctionnement vers d'autres créneaux horaires.
2. Une représentation claire du comportement des pompes à chaleur en fonction du moment de la journée au moyen de heatmaps.
3. Avantages et inconvénients des pompes à chaleur Inverter par rapport aux pompes à chaleur On/Off.
4. Une comparaison entre les pompes à chaleur pour eau chaude sanitaire et les pompes à chaleur air/eau.

# 1. Projektziele

Die Effizienz von Wärmepumpen hängt stark von der Einbindung in das Heizsystem sowie der Einstellungen des Wärmepumpenreglers ab. Dies wurde bereits in der langjährigen Feldmesskampagne «FAWA» und in den Nachfolgeprojekten festgestellt. Der im Projekt FAWA gesammelte, signifikante Datensatz besteht aus Handablesungen und einigen Datenlogger-Messungen. Viele der heute gültigen Design- und Installations-Richtlinien sind basierend auf diesen Auswertungen entstanden.

Durch die technologische Weiterentwicklung und Digitalisierung ist es heute möglich, Wärmepumpen-Feldmessungen zu automatisieren und hochauflösende Sensor-Datenreihen zu erfassen. Basierend auf diesen hochauflösenden Datenreihen können Analysen getätigt werden, welche bei Handablesungen nicht möglich waren. Analysiert werden zum Beispiel:

- Anlaufverhalten
- Abtaungen
- Taktverhalten
- Detaillierte Aufschlüsselung nach unterschiedlichen Nutzungsgraden
- Messung an den unterschiedlichen Systemgrenzen, örtlich wie auch zeitlich (z.B. Heiz-Auflade- oder Kühlbetrieb, Abtaungen, etc.)
- Aussagen über das Gebäude und das Nutzerverhalten
- Einfluss der Nebenaggregate auf die Effizienz (Umwälzpumpen, Heizstäbe, usw.)

Spezifische Ziele des Projekts «WP Feldmessung» sind somit die automatisierte, zeitlich hochauflösende Erfassung von Wärmepumpenanlagen im Feld und die Analyse der Messergebnisse. Für einen Vergleich werden geeignete Kennzahlen ermittelt und publiziert.

Bis zum Jahr 2020 sind nur neue Wärmepumpenanlagen aufgenommen worden, welche vorwiegend in einem Einfamilienhaus (Neubau oder Sanierung) installiert sind. Ab 2021 werden nur noch Anlagen in Mehrfamilienobjekten mit einer Heizleistung von ca. 20-30 kW in die Feldmesskampagne aufgenommen. Bestandsanlagen können nicht teilnehmen, da das Messequipment vor Ort mit der Neuinstallation eingebaut werden muss. Auch werden die Wärmepumpen vor der Installation im Wärmepumpen-Testzentrum WPZ in Buchs SG ausgemessen und dabei das Messequipment der Feldmessung kalibriert. Eine Ausnahme bildete Objekt 26, dessen Wärmepumpen aufgrund der Grösse nicht nach Buchs versandt wurde.

Durch die Messung am WPZ kann die Performance der Wärmepumpen im Feld mit der Performance im Labor verglichen und bei allfälligen Unterschieden die Ursachen ermittelt werden, die bei der Herstellung der Wärmepumpe, den Regler-Einstellungen, den Installationen der Anlage, etc. liegen können.

## 1.1 Objektbeschreibungen

Im vergangenen Betrachtungszeitraum sind eine grosse Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage für zwei zusammenhängenden Mehrfamilienhäuser als Ersatz für eine Ölheizung aufgenommen worden und eine Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage in einem neugebauten Einfamilienhaus.

Per Ende August 2022 befinden sich somit insgesamt 25 Anlagen in der Feldmessung, welche in diesem Bericht dargestellt werden. Enthalten sind 13 Luft/Wasser-Wärmepumpen, davon neun drehzahlgeregelte Modelle, sowie zwölf Sole/Wasser-Wärmepumpen mit sieben drehzahlgeregelten Modellen. Bei vier Objekten wird das Trinkwarmwasser mittels separater Trinkwarmwasser-Wärmepumpe erwärmt. Der Kühlbetrieb ist bei sechs Objekten aktiviert. Die vier Objekte 2, 10, 13 und 21 kühlen passiv mittels Erdwärmesonde, die zwei Luft/Wasser-Wärmepumpen in den Objekten 15 und 25 kühlen aktiv mit Verdichter.

Aktuell gibt es mit den Objekten 22 und 26 zwei Mehrfamiliengebäude mit auswertbaren Daten im Feldmessprogramm. Objekt 19 ist die einzige Wärmepumpenanlage mit reiner Wasserfüllung der Erdwärmesonde (EWS) in dieser Messkampagne. Zur besseren Übersicht wird dieses Objekt auch in der Kategorie Sole/Wasser-Wärmepumpen aufgeführt. Tabelle 1 stellt eine Kurzübersicht aller Anlagen dar.

Mittlerweile können pro Anlage bis zu sechs Heizperioden (2016/17, 2017/18, 2018/19, 2019/20, 2020/21 und 2021/22) ausgewertet werden. Im vorliegenden Bericht werden der Übersichtlichkeit halber aber höchstens fünf Heizsaisons dargestellt. Bei neu aufgenommenen Objekten wird baubedingt in der ersten Messperiode häufig noch keine vollständige Heizsaison mit 365 Tagen gemessen. Liegen weniger als 350 Messtage vor, wird diese Heizsaison in den Abbildungen mit einem Stern gekennzeichnet. (Ein Vergleich mit anderen Perioden oder Anlagen ist durch den kürzeren Winterbetrieb nur bedingt möglich). Objekte mit weniger als 300 Messtage pro «Heizsaison» werden nicht dargestellt, wie beispielsweise Anlage 14, welche während der Heizsaison 2020/21 einen längeren Ausfall bei der Datenübertragung hatte, sodass keine 300 Messtage erfasst werden konnten. Bei Objekt 2 ist im Winter 2021 der Volumenstromsensor für die Senke ausgefallen, welcher auf Grund von Lieferengpässen bei Ersatzprodukten erst verzögert ausgetauscht werden konnte. Somit konnte die thermische Heizleistung nicht korrekt ermittelt werden, weshalb alle Grössen, welche diesen Messwert benötigen, für die Heizsaison 2020/21 nicht dargestellt werden. Die restlichen Messdaten (inklusive der thermischen Aufladeleistung) wurden korrekt erfasst und werden entsprechend dargestellt. Der Austausch des Volumenstrommessers erfolgte aber noch rechtzeitig vor Beginn der Heizsaison 2021/22.

Bei Anlage 16, einer aussenaufgestellten leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpe, trat im Dezember 2020 ein schleichender Verdichterschaden mit abnehmender Heizleistung und Effizienz auf, sodass der Verdichter am 12.01.2021 ausgetauscht worden ist. Daher sind für die Heizperiode 2020/2021 nur 345 Messtage vorhanden.

Bei Objekt 18 sind während der Heizperiode 2020/21 Umbauarbeiten an der Heizungsanlage durchgeführt worden, daher konnte diese Anlage in der entsprechenden Heizperiode nur bedingt ausgewertet werden. Das Objekt war in der Heizperiode 2020/21 teilweise und in der Heizperiode 2021/22 komplett unbewohnt, wurde aber beheizt. Bei Objekt 18 und 26 kann aufgrund der Hydraulik nicht zwischen Heiz- und Aufladetrieb unterschieden werden, weshalb hier spezifische Heiz- oder Auflade-Kennwerte (Bezeichnungen mit „\_Heizen“, „\_AL“ oder „\_Aufladung“) nicht berechnet und dargestellt werden.

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Objekte

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
1	11.05.2017	X		X				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (über 20 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung)</li> <li>• Seit Servicewartung 24.09.2019 wöchentliches Legionellenschaltung aktiv</li> <li>• Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 3.85</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 2.95</li> </ul>
2	01.01.2017		X	X		X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objekt wurde im Dez. 2016 bezogen.</li> <li>• Heizt und kühlt immer wieder am gleichen Tag</li> </ul>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
								<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizstäbe: Nur TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 4.9</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = n.a. – Energielabel A++</li> <li>• Ausfall des Volumenstromsensor im Frühjahr 2021. Daher ist diese Anlage nicht in der Auswertung 2020/21 enthalten</li> </ul>
3	01.07.2016	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (über 20 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung)</li> <li>• Seit Sept. 2016 kein Kühlbetrieb mehr aufgetreten</li> <li>• Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 4.78</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 3.68</li> </ul>
4	01.07.2017		X		X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbau wärmeisolierter Fenster im Dez. 2017</li> <li>• WP läuft öfters 24h durch (z.B. vom 11. Nov. bis 11. Dez. 2017 durchgehend in Betrieb)</li> <li>• Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.23</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 4.13</li> <li>• Schwerkraftzirkulationsleitung</li> </ul>
5	25.10.2017 (Bewohnt seit 24.3.18)	X		X				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung seit dem 25.10.2017, aber erst seit dem 24.3.2018 bewohnt</li> <li>• Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 3.85</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 2.95</li> </ul>
6	01.08.2017		X		X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solarthermie Unterstützung für Heizen und Trinkwassererwärmung</li> <li>• Heizstab in der WP ist sechsstufig 1-6 kW modulierend. Aufgrund kalter Sonde häufiges Zuschalten</li> <li>• Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> </ul>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
								<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.20</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 4.20</li> </ul>
7	12.01.2017		X		X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizt jeden Tag (auch wenn Tagesmittel der Umgebungstemperatur über 28 °C war)</li> <li>• Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Samstag für 0.5 bis 1h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet. Auffallend ist, dass der Elektroein-satz 2mal hintereinander einschaltet)</li> <li>• Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.43</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 4.03</li> </ul>
8	12.01.2017	X			X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmepumpenboiler mit Kellerluft (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden)</li> <li>• Aufgrund der zwei Wärmepumpen können die gemeinsamen Kennwerte JAZ+, COP+ nicht ermittelt werden =&gt; Es werden nur die Kennwerte der Betriebsziele JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung betrachtet!</li> <li>• Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (20 bis 42 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung)</li> <li>• Heizstäbe: Pufferspeicher und Trinkwarm-wasser-Wärmepumpe</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 4.20</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = n.a.</li> </ul>
9								<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drittanlage, für welche die Messdatenbank dieser Feldmessung verwendet worden ist</li> </ul>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
10	10.11.2018		X		X		X	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäude war bis 1.7.20 wegen Umbau nur teilweise bewohnt</li> <li>Erdsonde mit 280 m zunächst mit Wasser geplant, WP-Hersteller schreibt jedoch Glykolmischung vor.</li> <li>SCOP<sub>35</sub> = 5.6</li> </ul>
11	01.08.2017	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Montag ab dem 13.11.2017 für ca. 1h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet. Vor dem 13.11.2017 wurde keine Legionellen-Schaltung gemessen)</li> <li>Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>SCOP<sub>35</sub> = 4.35</li> <li>SCOP<sub>55</sub> = 3.38</li> </ul>
12	25.01.2019	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>Bis 24.1.2019 fehlte Temperatursensor im Trinkwarmwasserspeicher, daher erfolgte bis dahin die Aufladungen ausschliesslich mit dem Elektroheizstab</li> <li>1/3 der Aufladeenergie für Legionellenschaltung mittels Elektroheizstab</li> <li>SCOP<sub>35</sub> = 5.05</li> <li>SCOP<sub>55</sub> = 3.90</li> </ul>
13	01.08.2017		X		X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Freitag für ca. 0.5 h bis 0.9 h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet)</li> <li>WP läuft am Wochenende öfters 24h durch (Unter der Woche häufig 22.9h aufgrund einer 1h EW Sperre der EKZ<sup>1</sup>)</li> <li>Heizstäbe: WP und TWW-Speicher</li> <li>SCOP<sub>35</sub> = 5.20</li> <li>SCOP<sub>55</sub> = 3.95</li> </ul>

<sup>1</sup> Details zur EW-Sperre des EKZ: <https://www.ekz.ch/content/dam/ekz-internet/downloads/ekz-zusaetzliche-eisungen.pdf>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
14	01.12.2017		X		X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzige Wärmepumpenboiler mit Aussenluft (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden). Austausch März 2019. Neues Modell hat 700 W Heizstab. Unterscheidung Heizstab vs. Verdichterbetrieb nicht mehr sicher möglich. WP-Boiler kann aber nun Abtauen, Analysen bei -8°C Aussentemperaturen deutet darauf hin, dass kein Heizstab mehr benötigt wird (Bsp. 15.1.2021, Verlauf der Verdichterleistung sowie Quellen Ein- und Ausgangstemperatur der TWW)</li> <li>• Legionellen: Dürfte jeweils am Montag aktiviert sein: Zuerst mit dem TWWP-Verdichter, dann mit dem TWWP-Heizstab (Zeitpunkt dürfte temperaturgesteuert sein, da sie zu unterschiedlichen Uhrzeiten erfolgen [Bsp. 9.8 &amp; 16.8.22])</li> <li>• Aufgrund der zwei Wärmepumpen können die gemeinsamen Kennwerte JAZ+, COP+ nicht ermittelt werden =&gt; Es werden nur die Kennwerte der Betriebsziele JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung betrachtet!</li> <li>• Heizstäbe: Pufferspeicher und Trinkwarmwasser-Wärmepumpe</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.20</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 3.95</li> <li>• Ausfall Datenübertragung, daher nur 293 Messtage 2020/21</li> </ul>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
15	01.01.2018	X			X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doppelhaushälfte mit Minergie-Standard, Baujahr 2005</li> <li>• Wärmepumpe steht in einem Gerätehaus (Aussenklima)</li> <li>• TWW über Frischwasserstationen</li> <li>• Besitzer ist HLK-Ingenieur und Betriebsoptimierer (Eigenverbrauchsoptimierung mit der installierte PV-Anlage, besonders auch für die Kühlfunktion)</li> <li>• Heizstäbe: Nur im TWW-Speicher</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 4.83</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 3.98</li> </ul>
16	01.11.2017	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizstäbe: WP, TWW-Speicher und Pufferspeicher</li> <li>• Legionellen Schaltung: Heizstab des TWW-Speichers kommt jede Woche für ca. 0.5 bis 1.2 Stunden (Nacht Samstag auf Sonntag)</li> <li>• WP-Störung am 4.2.18 – danach war der Heizstab im Pufferspeicher aktiv. Nach entsprechender Information wurde der Heizstab-Einsatz dann wieder deaktiviert.</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = n.a. – Energielabel A++</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = n.a. – Energielabel A++</li> </ul>
17	06.11.2018 bewohnt ab 22.12.2018	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfänglich tägliches Legionellenschaltung mit Heizstab, erste Inbetriebnahme nicht vollständig, zweite IB am 21.01.2019: Nun wöchentliches Legionellenschaltung</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 4.41</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 3.37</li> </ul>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
18	15.03.2019		X		X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäude mit 3 Wohnungen (EBF: 400 m<sup>2</sup>)</li> <li>• Frischwassermodul (FWM) mit Zirkulation</li> <li>• Spezielle Hydraulik, Heizkreisverteiler für Radiatoren im Altbau und Fussbodenheizung, Rücklauf für Vorerwärmung Speicher FWM Daher ist eine Aufteilung der Kennziffern nach Betriebszielen («Heizen», «Aufladung») nicht möglich</li> <li>• Defekte Solepumpe, Umbauarbeiten, Heizstabeinsatz</li> <li>• In HS 2020/21 teilweise, in HS 2021/22, komplett unbewohnt (aber beheizt, Gesamtenergie 57.1 MWh bzw. 40.7 MWh in HS 2021/22)</li> </ul>
19	09.05.2019		X		X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmepumpenboiler im Keller (Waschküche) (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden)</li> <li>• Wassergefüllte Erdwärmesonde</li> <li>• Identische Wärmepumpe zu Anlage 7, jedoch TWW mittels Wärmepumpenboiler</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.43</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 4.03</li> </ul>
20	10.05.2019	X			X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fussbodenheizung</li> <li>• Ersatz für eine funktionstüchtigen Luft/Wasser-Wärmepumpe aus dem Jahr 1994</li> </ul>
21	09.02.2020		X		X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fussbodenheizung</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.2</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 4.0</li> </ul>
22	13.07.2019		X		X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehrfamilienhaus</li> <li>• 500l Pufferspeicher, 1000l Trinkwasserspeicher</li> </ul>

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
23	27.07.2019	X			X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wärmepumpenboiler in kleinem Heizungskeller (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden)</li> <li>Kühlmöglichkeit am 18.08.2020 aktiviert</li> <li>Minergie-Holzbauweise aus den 1990igern</li> </ul>
24	13.02.2020	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zirkulationspumpe</li> <li>Radiatorenheizung</li> <li>SCOP<sub>35</sub> = 4.5</li> <li>SCOP<sub>55</sub> = 3.4</li> </ul>
25	23.09.2020	X		X		X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zweifamilienhaus</li> <li>Begleitheizung für TWW</li> <li>Heizstäbe: Der im TWW-Speicher wird häufig verwendet (PV-Optimierung), der WP-Heizstab ist deutlich seltener in Betrieb.</li> </ul>
26	11.02.2021		X		X			<ul style="list-style-type: none"> <li>MFH (2x 18 Wohnungen)</li> <li>Zirkulationspumpe</li> <li>Kein Heizstab</li> <li>2 Wärmepumpen mit je 2 Kompressoren</li> <li>Gemeisamer Heiz- und Aufladespeicher, weshalb keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb möglich ist.</li> </ul>

Die Höhe des Gebäudestandortes, die Energiebezugsfläche (EBF), die Anzahl der gemeldeten Personen sowie Informationen zum Wärmeverteilsystem (Radiators, Fussbodenheizung, etc.) sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Der Heizwärmebedarf (dargestellt in Kapitel 2.4) hängt wesentlich vom Standort, der Bausubstanz, der Objektgrösse und dem Benutzerverhalten (Wohnraumtemperatur, Lüftungsverhalten) ab. Der tiefste Gebäudestandort liegt auf 393 m, der höchste Gebäudestandort auf 834 m. Geografische Unterschiede führen auch zu beträchtlichen Unterschieden bei den Aussen- und Quellentemperaturen (sowohl bei Luft/Wasser als auch bei Sole/Wasser-Wärmepumpen).

Ebenfalls sind bei der beheizten Wohnfläche (siehe Energiebezugsfläche EBF) und der Gebäudebelegung (anhand der gemeldeten Personen) erhebliche Unterschiede zu erkennen. Die Personenanzahl beeinflusst wiederum den Trinkwarmwasserbedarf. Aus Datenschutzgründen und der hohen Belegungsvolatilität wurde hier keine zusätzliche Unterscheidung vorgenommen (z.B. Personenalter, Kind, Erwachsener, Senior), Berufstätigkeit, Besuchshäufigkeiten, etc.).

Als Wärmeverteilsystem verwenden die meisten Objekte eine Fussbodenheizung, teilweise noch kombiniert mit Radiatoren (Mischsystem). Bemerkenswert ist die grosse Varianz der Vorlauftemperaturen bei reinen Fussbodenheizsystemen (siehe Kapitel 2.2), welche nicht nur mit dem geografischen Standort erklärbar ist.

Tabelle 2: Nächstgelegene Meteo-Messstation, Energiebezugsflächen (EBF), Höhe des Gebäudestandortes, gemeldete Personen und Angaben zum Wärmeverteilsystem der einzelnen Objekte

Objekt	Meteostation für Auslegungspunkt	EBF [m <sup>2</sup> ]	Standorthöhe	Personen	FBH / RH *
1	Vaduz	277	481	unb.	FBH
2	Vaduz	418	452	unb.	FBH
3	Vaduz	180	460	6	FBH
4	Zürich	230	473	unb.	unb.
5	Vaduz	252	468	4	FBH
6	St. Gallen	240	755	5	RH, wenig FBH
7	Bern-Liebefeld	235	565	2.5	RH
8	Vaduz	228	451	unb.	unb.
10	St. Gallen	251	614	3	FBH
11	Buchs-Aarau	220	465	4	FBH
12	Glarus	120	427	unb.	FBH und RH
13	Zürich	190	419	4	FBH
14	Zürich	163	393	5	FBH
15	Zürich	224	402	5	FBH
16	Zürich	225	541	5	RH
17	St. Gallen	187	737	2	FBH
18	Payerne	450	755	unb.	RH und FBH
19	St. Gallen	195	600	unb.	RH
20	Wynau	140	458	unb.	FHB
21	St. Gallen	278	834	2	FBH
22	Schaffhausen	466	428	10	FBH
23	Güttingen	240	445	4	FBH
24	Güttingen	173	478	4	RH
25	Vaduz	318	495	6	FBH
26	St. Gallen	4270	780	44	RH

\* FBH = Fussbodenheizung, RH = Radiatoren-Heizung

Die geografische Verteilung der Wärmepumpenanlagen ist in Abbildung 1 dargestellt.

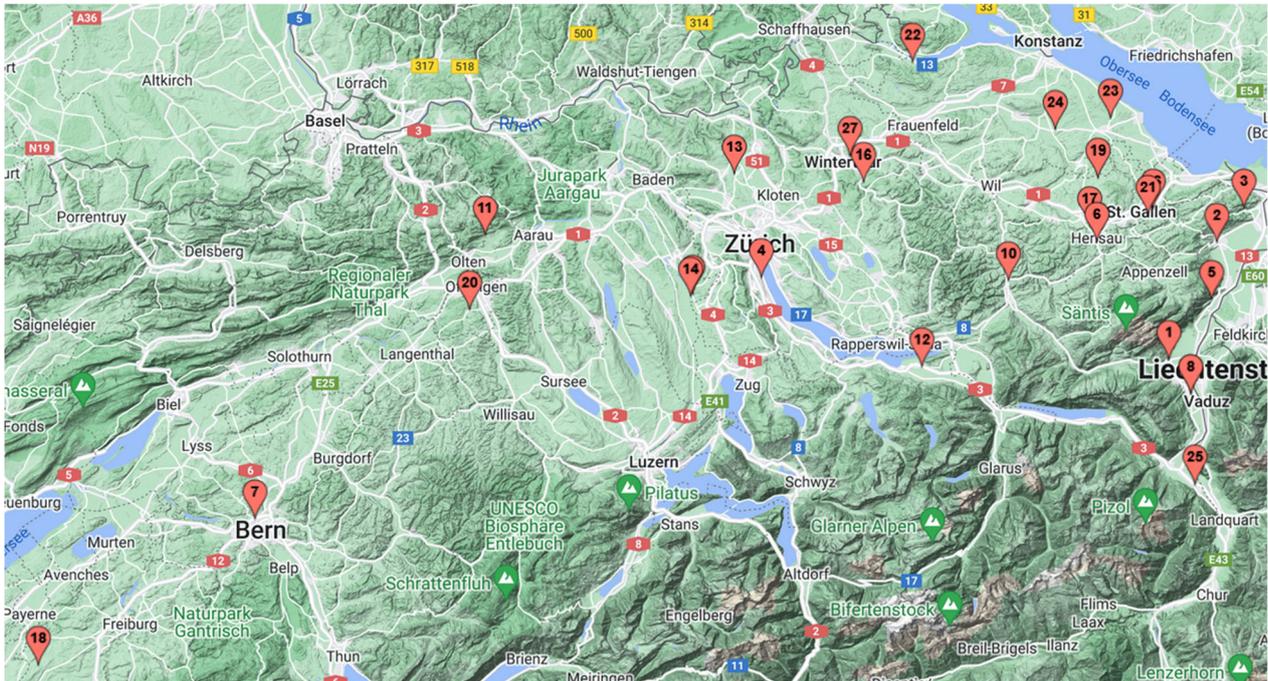


Abbildung 1: Standorte der Wärmepumpenanlagen mit zugeordneter Objekt Nummer (Grafik erstellt mit <http://batchgeo.com>).

## 1.2 Systemgrenzen und Kennzahlen

In Analogie zum Beschrieb und den Anwendungshinweisen der verschiedenen Nutzungsgrade des BFE werden folgende Kennzahlen pro Wärmepumpenanlage dargestellt. Aufgelistet werden nur die in den hier dargestellten Abbildungen verwendeten Kennzahlen.

Der allgemeine Begriff der Effizienz der Wärmepumpe wird mit der Jahresarbeitszahl JAZ+, die Effizienz der Wärmepumpenanlage mit dem Wärmenutzungsgrad WNG und die Effizienz in Verbindung mit dem Nutzerverhalten beim Trinkwarmwasser als Systemnutzungsgrad SNG<sub>TWW</sub> beschrieben. Für die Messdatenauswertung werden folgende Formeln und Messgrößen verwendet:

$$\begin{aligned}
 JAZ+ &= (Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / (E_{\text{Tot}} - E_{\text{UP\_Senke}} - E_{\text{ext\_HS}}) && \text{Jahresarbeitszahl [-]} \\
 WNG &= (Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / E_{\text{Tot}} && \text{Wärmenutzungsgrad [-]} \\
 SNG_{\text{TWW}} &= Q_{\text{TWW}} / E_{\text{Aufladung}} && \text{Systemnutzungsgrad Trinkwarmwasser [-]}
 \end{aligned}$$

Die Jahresarbeitszahl JAZ+ ist ein Kennwert für die Effizienz der Wärmepumpe. In dieser Kennzahl werden nur die elektrischen Energien von Verdichter, Steuerelektronik, Gebläse (bei Luft/Wasser-Wärmepumpen) oder Quellenpumpe (bei Sole/Wasser-Wärmepumpen) berücksichtigt.

Der Wärmenutzungsgrad (WNG) beschreibt die Effizienz des Wärmeerzeugungs- und Verteilungssystem. Hier werden auch die elektrischen Energien der Senke-Umwälzpumpe und aller Elektroheizstäbe miteinbezogen.

Der Systemnutzungsgrad der Trinkwassernutzung (SNG<sub>TWW</sub>) beschreibt die Effizienz der gesamten Wasseraufbereitung, ausgehend vom tatsächlich genutzten Trinkwarmwasser ab Speicheraustritt. Der SNG<sub>TWW</sub> beinhaltet die Speicherverluste des Trinkwarmwasserspeichers und ggf. Zirkulationsverluste. Ein geringer TWW-Bedarf führt im Allgemeinen zu einem geringen Energiebedarf, aber auch zu einem geringeren Effizienzkennwert, da die auftretenden Verluste dadurch stärker ins Gewicht fallen. Der SNG<sub>TWW</sub> kann auch bei den Trinkwarmwasser-Wärmepumpen ermittelt werden, wodurch ein Vergleich mit der TWW-Aufladung mithilfe der Heizwärmepumpen möglich ist.

Der gesamte Bedarf an elektrischer Energie für die gesamte Wärmepumpenanlage, geläufig als Strombezug genannt, ist unter E<sub>Tot</sub> aufgeführt.

Die Kenngrößen Heiz- und Gesamtwärmebedarf beziehen die benötigte Heiz- bzw. Gesamtenergie auf die Energiebezugsfläche (EBF). Damit werden unterschiedliche Gebäudegrößen berücksichtigt. Die Heizgradtage spiegeln den Witterungseinfluss einer Periode (Monat oder Heizsaison) und/oder des Standortes wider:

$$\begin{aligned}
 HWB &= Q_{\text{Heizen}} / EBF && \text{Heizwärmebedarf [kWh/m}^2\text{]} \\
 HWB_{\text{el}} &= E_{\text{Heizen}} / EBF && \text{elektrischer Heizwärmebedarf [kWh}_{\text{el}}\text{/m}^2\text{]} \\
 GWB &= (Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / EBF && \text{Gesamtwärmebedarf [kWh/m}^2\text{]} \\
 HGT_{20\_12} \text{ bzw. } HGT_{20\_16} &&& \text{Heizgradtage [}^\circ\text{C]} \text{ (20/12 für Neubau, 20/16 für Altbau)}
 \end{aligned}$$

Mit:

$Q_{\text{Heizen}}$	Thermische Energie im Heizbetrieb [kWh]
$Q_{\text{Aufladung}}$	Thermische Energie im Aufladebetrieb [kWh]
$Q_{\text{TWW}}$	Thermische Energie des gezapften Trinkwarmwassers
$E_{\text{Tot}}$	Elektrische Energie des gesamten Wärmepumpensystems [kWh]
$E_{\text{Heizen}}$	Elektrische Energie im Heizbetrieb [kWh]
$E_{\text{UP\_Senke}}$	Elektrische Energie der Umlaufpumpe Senke [kWh]
$E_{\text{ext\_HS}}$	Elektrische Energie der externen Heizstäbe [kWh]
$EBF$	Energiebezugsfläche [m <sup>2</sup> ]

Bei der Ermittlung der Heizgradtage  $HGT_{20\_12}$  für Neubauobjekte wird eine Grenztemperatur von 12 °C und eine Soll-Innentemperatur von 20 °C verwendet. Heizgradtage werden nur gezählt, wenn der Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur die Heizgrenze (hier 12 °C) unterschreitet. Die HGT ergeben sich dann aus der Differenz zwischen der mittleren Tagestemperatur und 20 °C. Für sanierte Objekte wird die Heizgrenze gewöhnlich bei 16 °C gesetzt, sodass hier die Kennzahl der Heizgradtage  $HGT_{20\_16}$  verwendet wird.

Beim Kennwert «Trinkwarmwasserbedarf» (TWWB) wird für eine bessere Vergleichbarkeit die benötigte Aufladeenergie auf die Energiebezugsfläche (EBF) bezogen:

$$\begin{aligned}
 TWWB &= Q_{\text{Aufladung}} / EBF && \text{Trinkwarmwasserwärmebedarf [kWh/m}^2\text{]} \\
 TWWB_{\text{el}} &= E_{\text{Aufladung}} / EBF && \text{elektrischer Trinkwarmwasserwärmebedarf [kWh}_{\text{el}}\text{/m}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

Mit:

$Q_{\text{Aufladung}}$	Thermische Energie der Trinkwarmwasseraufbereitung [kWh]
$E_{\text{Aufladung}}$	Elektrische Energie des gesamten Wärmepumpensystems während der Aufladung [kWh]
$EBF$	Energiebezugsfläche [m <sup>2</sup> ]

Die unterschiedlichen Systemgrenzen und Kennwertebezeichnungen sind in Abbildung 2 exemplarisch für eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Direktkreisheizung und Trinkwarmwasserspeicher dargestellt.

Systemgrenzen werden nicht nur örtlich, spezifisch zu den Anlagenkomponenten gezogen, sondern auch zeitlich. Hier werden die Betriebsziele «Heizen», «Warmwasser-Aufladung» und «Kühlen» unterschieden. Der elektrische Standby-Stromverbrauch (Standby meint hier: Verdichter-Stillstand und kein Kühlbetrieb) wird entsprechend der Position des Umschaltventiles dem Heizbetrieb oder dem Aufladebetrieb zugeordnet. Die Kennwerte  $JAZ+_{\text{netto}}$ ,  $JAZ+_{\text{Heizen}}$ ,  $JAZ+_{\text{Aufladung}}$  und  $SNG_{\text{TWW}}$  enthalten keine Standby-Verluste, da hier die elektrischen Leistungen nur während aktivem Verdichter-Betrieb berücksichtigt werden (Indikator ist, dass bei der Statusvariable «47\_Dig» Bit 7 = 1 ist).

Der Anteil der elektr. Standby-Verluste beträgt im Mittel 2 % bis 3 % des gesamten elektrischen Jahresenergiebedarfs.

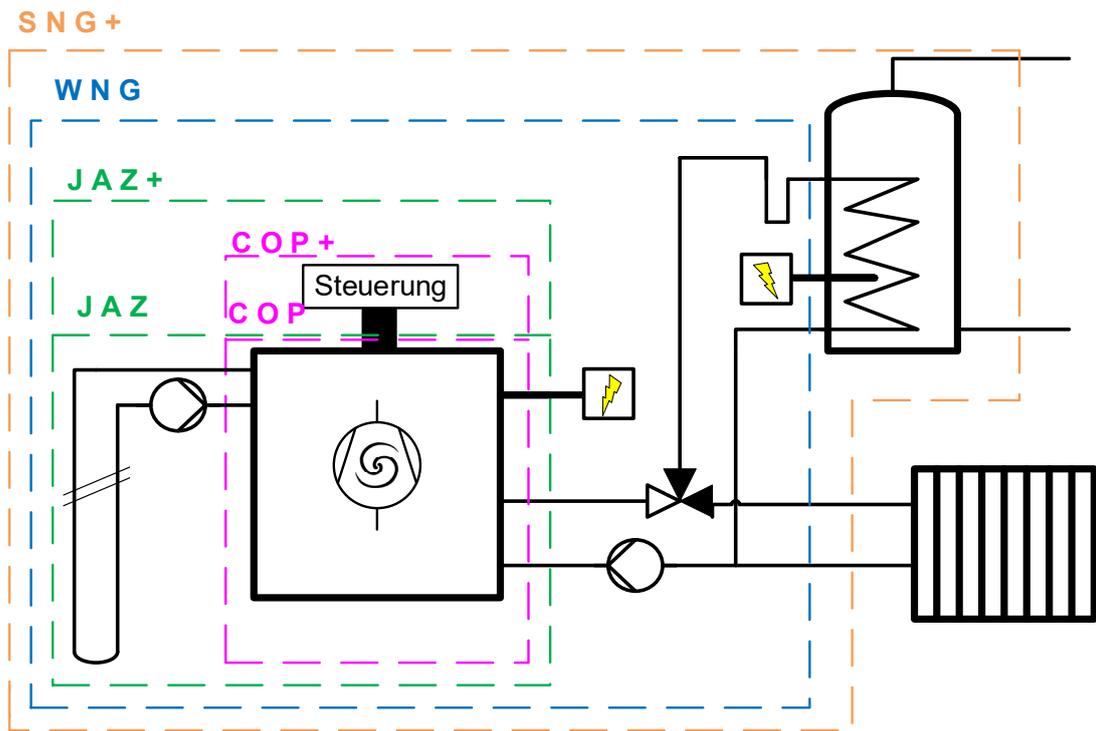


Abbildung 2: Vereinfacht dargestellte Systemgrenzen einer Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Direktheizkreis und Trinkwassererwärmung mittels Speicher.

Die detaillierten Systemgrenzen gemäss BFE-Vorgaben können der Abbildung 3 entnommen werden.

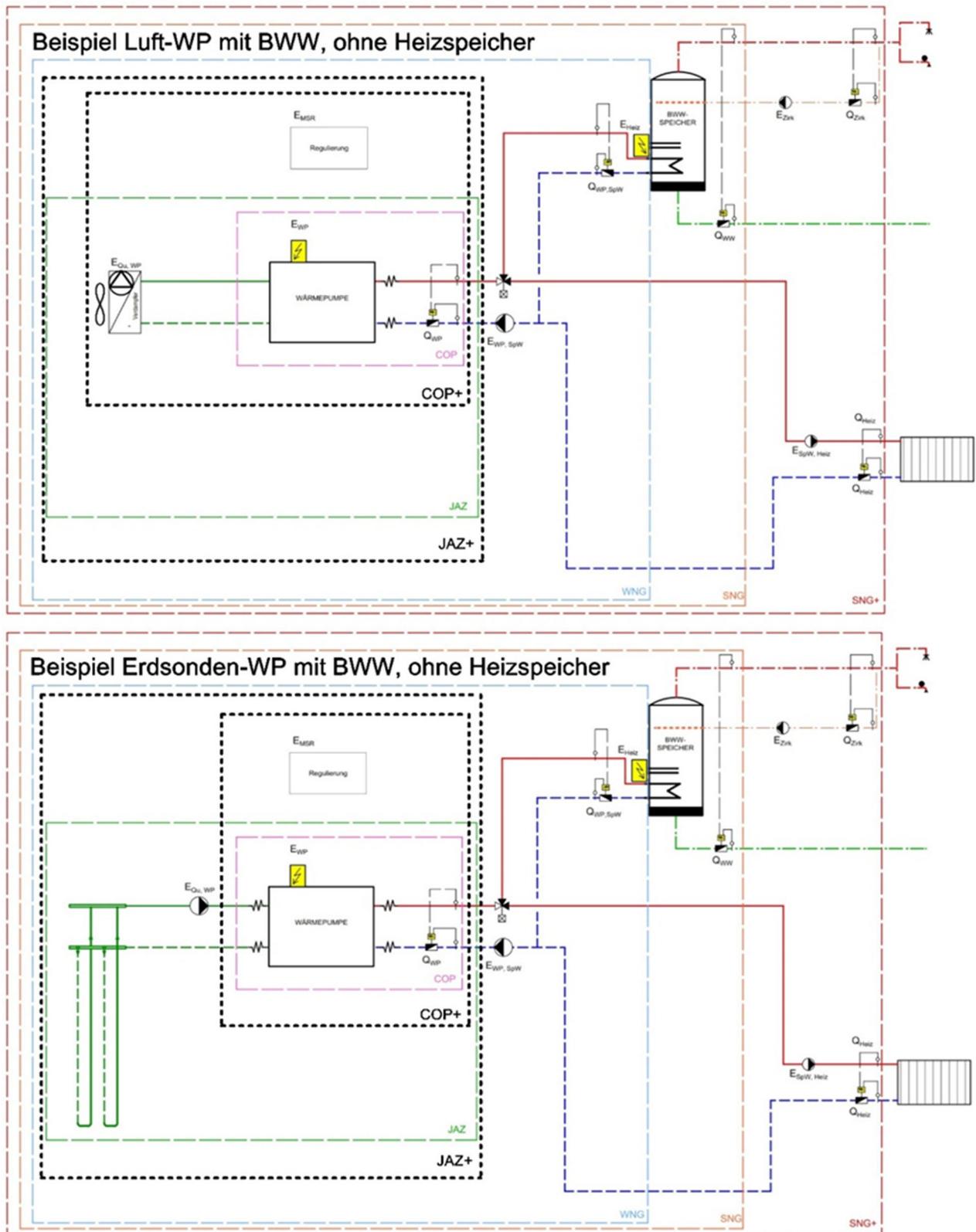


Abbildung 3: Systemgrenzen gemäss BFE für Luft- und Erdsonden-WP mit Trinkwasserspeicher, aber ohne Heizspeicher. Der Kennwert JAZ+ beinhaltet im Gegensatz zum COP+ den Energiebedarf der Quellen-Umwälzpumpe bei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

## 2. Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen

In diesem Kapitel werden die Wärmepumpenanlagen im Verlauf der maximal fünf aufgezeichneten Heizperioden miteinander verglichen. Neben der allgemeinen Energieeffizienz wird auch auf den Einfluss der Quellen- bzw. der Senken Temperatur eingegangen. Die ausgewerteten Daten beziehen sich auf die jeweilige Heizperiode vom 1. September bis zum 31. August. Liegen für ein Objekt nur 300 bis 350 von 365 möglichen Tagen vor (z.B. aufgrund späterer Inbetriebnahme), wird diese Heizperiode in den Grafiken mit einem Stern (\*) gekennzeichnet. Diese Werte sind dann nur begrenzt aussagekräftig und können nicht ohne Weiteres mit den Folgeperioden verglichen werden.

### 2.1 Vergleich der Effizienzkennziffern (JAZ+ und WNG)

In Abbildung 4 und Abbildung 5 werden die Jahresarbeitszahlen JAZ+ und die Wärmenutzungsgrade WNG kombiniert für Heizen und Aufladung der gemessenen Objekte dargestellt. Im Gegensatz zur Jahresarbeitszahl JAZ+ werden beim Wärmenutzungsgrad der elektrische Energiebedarf der Senken-Umwälzpumpe und die externen elektrischen Heizstäbe (z.B. «Legionellenschaltungen» mit dem Heizstab im Trinkwarmwasserspeicher) mitberücksichtigt. Dementsprechend spiegelt diese Kennziffer die Effizienz der Wärmeerzeugung aus Nutzersicht wider. Der Kennwert JAZ+ verdeutlicht hingegen die Effizienz der Wärmepumpe als einzelne Komponente.

Bei den Objekten 8, 14, 19 und 23 wird das Trinkwarmwasser mittels einer eigenen Trinkwarmwasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Dadurch können bei diesen vier Systemen nicht alle Kennziffern gebildet werden. Die JAZ+ und der WNG beziehen sich deshalb für diese Objekte nur auf den Heizbetrieb.

Mit einer Historie von bis zu sechs Messperioden können nun auch Veränderungen bei einzelnen Anlagen festgestellt werden. Die Gründe dafür sind nicht immer eindeutig zuordenbar. Die Heizgradtage (HGT) sind ein quantitativer Indikator bzgl. klimatischer Unterschiede. Den qualitativen Verlauf einer Heizsaison (z.B. «Ist eine kurze, intensive Kältewelle aufgetreten?»), welcher auch einen Einfluss auf die Effizienz hat, spiegeln sie aber nicht wider. Weitere Einflussfaktoren sind z.B. eine veränderte Belegungssituation, veränderte Einstellungen an der Heizungsanlage (z.B. Temperatursollwerte), oder auch unterschiedlich starke Solarstrahlung. Abbildung 4 zeigt die Effizienzkennzahlen der gemessenen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen über die letzten fünf Heizperioden.

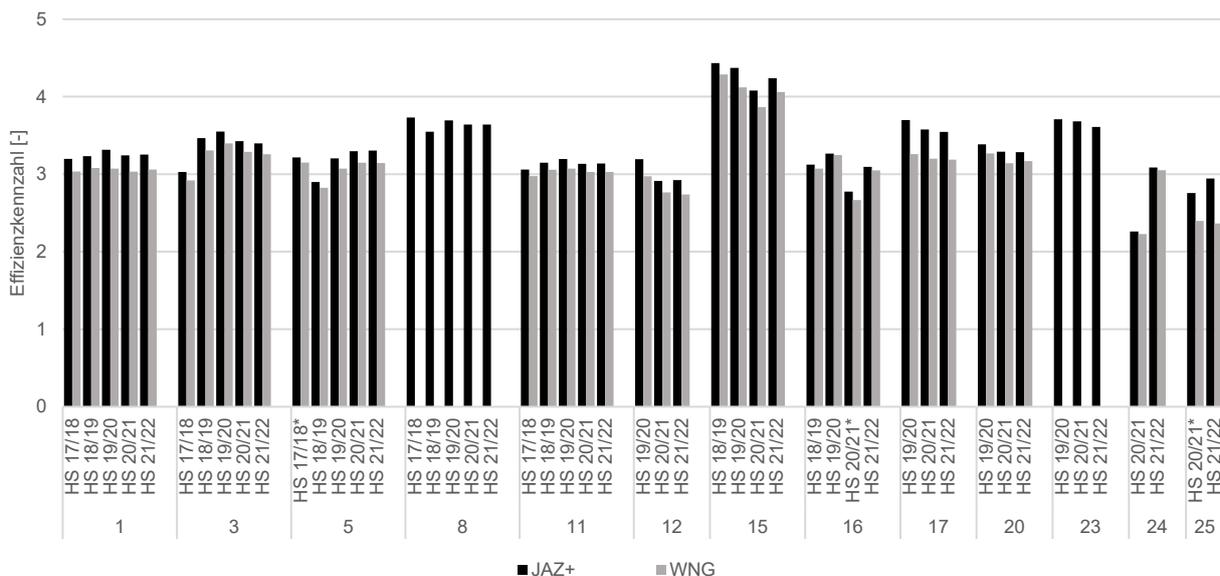


Abbildung 4: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Luft/Wasser-Wärmepumpensystemen

Der Winter der Heizperiode 2019/20 war aussergewöhnlich mild und wies durchschnittlich 2'818 Heizgradtage<sup>2</sup> und somit vergleichsweise hohen durchschnittliche Quellentemperaturen bei Luft/Wasser Wärmepumpen auf. Die nachfolgende Heizsaison 2020/21 war mit durchschnittlich 3'219 Heizgradtagen deutlich kälter. Die Heizsaison 2021/22 fiel dann mit durchschnittlichen 3'014 Heizgradtagen wieder geringfügig milder aus.

Während die WNG der meisten Anlagen in der letzten Heizsaison (2021/22) fast unverändert auf dem Vorjahresniveau blieben, stieg der WNG von Anlage 24 markant. Diese Effizienzsteigerungen können auf die Optimierungsmassnahmen zurückgeführt werden, welche vor der Heizsaison 2021/22 durchgeführt wurden und in Kapitel 2.7 detaillierter beschrieben werden.

Auch bei Anlage 15 wurde in der Heizsaison 2021/22 eine deutliche Zunahme des WNG gegenüber dem Vorjahr festgestellt, was auf die ebenfalls in Kapitel 2.7 beschriebenen Veränderungen an der Anlage zurückzuführen ist. Bei den Anlagen 16 und 25 ist ein Vergleich mit der der vorhergehenden Heizsaison kaum möglich, da die Heizsaison 2020/21 zu wenige Messstage aufweist.

Anlage 24 wies in der Heizsaison 2020/21 mit einem WNG von 2.23 den geringsten Wert auf. In der Heizsaison 2021/22 weist die neu aufgenommen Anlage 25 mit 2.36 den tiefsten WNG aller Anlagen auf. Damit ist nun zum zweiten Mal eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit einem Wärmenutzungsgrad von deutlich unter 3 gemessen worden. Anlage 25 weist in der Heizsaison 2021/22 mit 20% auch den grössten Unterschied zwischen WNG und JAZ+ auf, welcher auf den häufigen Einsatz des Heizstabes zurückzuführen ist (z.B. lag der Heizstab-Anteil bei der Aufladung des TWW-Speichers bei 62%). Zum Vergleich: In der vorigen Heizsaison wies Anlage 17 mit 10 % den grössten Unterschied auf. Über alle Luft/Wasser-Wärmepumpen liegt der Unterschied zwischen WNG und JAZ+ in der Heizsaison 2021/22 im Durchschnitt bei 7%.

Den höchsten Wärmenutzungsgrad (WNG) aller Luft/Wasser-Wärmepumpen weist mit einem Wert von 4.29 immer noch Anlage 15 auf, welcher in der Heizsaison 2018/19 gemessen wurde. Dieser Wert wurde dank sehr tiefer Vorlauftemperatur und gezielter Verlagerung der Heizanforderung in die wärmeren Nachmittagsstunden erreicht (→ höhere Quellentemperatur bei LW-WP, Details im Bericht «WP-Feldmessungen Jahresbericht 2018», Kapitel 4.3).

Die Effizienzkennzahlen der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen werden in Abbildung 5 dargestellt. Abgesehen von Objekt 18, welches in dieser Heizsaison nicht bewohnt war, kam es gegenüber der Vorjahresperiode nur zu sehr geringen Veränderungen in den Effizienzkennzahlen JAZ+ und WNG.

Anlage 2 wies in Heizsaison 2020/21 einen defekten Volumenstrommesser im Senkenkreis auf (siehe Kapitel 1.1), weshalb hier keine Werte dargestellt wurden.

Die Sole/Wasser-Wärmepumpen weisen entsprechend der Messdaten eine hohe Varianz bei den Jahresarbeitszahl JAZ+ auf. Der Tiefstwert liegt bei 3.02 (Anlage 26, MFH), der Höchstwert bei 5.63 (Anlage 13, EFH). Die Wärmepumpentechnologie, die Quellentemperatur sowie die benötigten Temperaturniveaus eines Objektes haben dabei einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz einer Wärmepumpenanlage. Bemerkenswert ist die hohe JAZ+ von über 5 bei den Anlagen 13, 19 und 21. Die Gründe hierfür liegen einerseits an den günstigen Temperaturniveaus der Wärmequelle und –senke (siehe Abbildung 7) bzw. auch an der fehlenden TWW-Aufbereitung bei Anlage 19. Über alle Heizperioden weist Anlagen 6 mit einem Wert von 3.0 den tiefsten WNG auf. Objekt 6 hat eine eher knapp dimensionierte Erdwärmesonde, welche schon von der vorherigen Wärmepumpe verwendet wurde. Die Quellentemperaturen sind daher relativ tief. Anlage 26 versorgt ein Mehrfamilienhaus und weist nach der ersten Messperiode (und noch vor ggf. möglichen Optimierungsmassnahmen) ebenfalls einen WNG von nur 3.0 auf. Den höchsten WNG von 5.24 erreichte Anlage 21, welche relativ tiefe Vorlauftemperaturen im Heiz- und Aufladebetrieb ausweist.

Die Differenzen zwischen JAZ+ und WNG liegen bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen im Bereich von 1% bis 8% - und fallen damit deutlich geringer aus als bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen.

<sup>2</sup> Mittelwert der Heizgradtage 20/16 (Kennwerte "HGT\_20\_16") über alle Objekte in der entsprechenden Heizsaison)

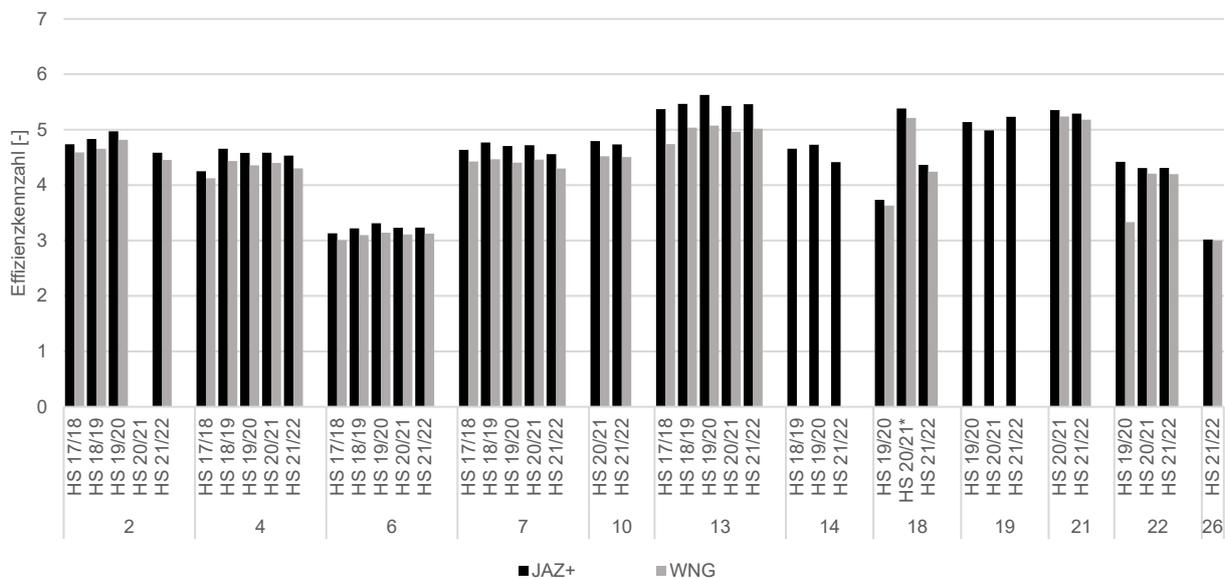


Abbildung 5: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Sole/Wasser-Wärmepumpensysteme

Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen aufgrund der häufig tieferen Quellentemperaturen eine geringere Effizienz auf als Sole/Wasser-Wärmepumpen. Der in der letzten Heizsaison über alle ausgewerteten Luft/Wasser-Wärmepumpen gemittelte JAZ+ liegt bei 3.34, der Mittelwert aller Sole/Wasser-Wärmepumpen liegt bei 4.48. Damit liegt die JAZ+ der besten Sole/Wasser-Wärmepumpen mit 5.46 genau 1.22 Punkte über der JAZ+ der besten Luft/Wasser-Wärmepumpe, welche 4.24 aufweist. Bei den jeweils schlechtesten Systemen beträgt der Unterschied nur 0.1 Punkte (2.92 / 3.02).

Entsprechend ähnlich verhält es sich auch mit dem über alle Anlagen gemittelten WNG. Der in der letzten Heizsaison über alle Luft/Wasser-Wärmepumpen gemittelte Wert liegt bei 3.10. Die Sole/Wasser-Wärmepumpen weisen einen um 1.13 Punkte höheren mittleren WNG von 4.23 auf.

## 2.2 Einfluss des Temperaturniveaus

Nun werden die verschiedenen Temperaturniveaus der Wärmepumpen gegenübergestellt. Herangezogen werden dabei ausschliesslich jene Zeitbereiche, in welchen die Wärmepumpen in Betrieb waren. Entsprechend dem Betriebsmodus der Wärmepumpe («Heizbetrieb» oder «Aufladebetrieb») erfolgt eine entsprechende Zuordnung zu den Kennwerten.

In den Abbildungen werden dabei folgende Abkürzungen verwendet:

- T\_Qein\_Heizen: Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Heizbetriebs» der Wärmepumpe.
- T\_Qein\_AL: Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Aufladebetriebs» der Wärmepumpe.
- T\_VL\_Heizen: Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Heizbetriebs» der Wärmepumpe.
- T\_VL\_AL: Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Aufladebetriebs» der Wärmepumpe.

In Abbildung 6 sind die Temperaturniveaus der Luft/Wasser-Wärmepumpen, unterschieden nach Betriebsmodus Heizen und Aufladung, dargestellt.

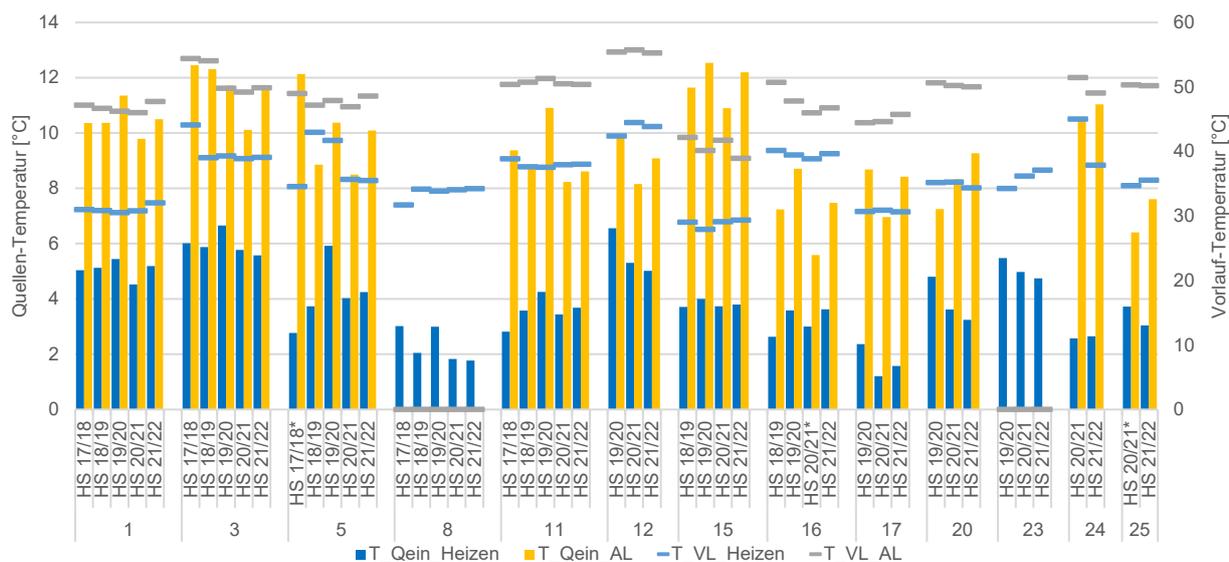


Abbildung 6: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Luftansaugung) und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsmodi «Heizen» und «Aufladung» für Luft/Wasser Wärmepumpen. Die Objekte 8 und 23 verfügen über eine zusätzliche Trinkwarmwasser-Wärmepumpe, weshalb die «AL»-Kennwerte fehlen.

Die letzten beiden Heizsaisons weisen in Bezug auf die Quelleneintrittstemperaturen der meisten Luft/Wasser-Wärmepumpen keine grossen Unterschiede auf. Auch die Vorlauftemperaturen blieben im Heizbetrieb als auch bei der Aufladung ähnlich, mit Ausnahme der Anlagen 15 und 24. Hier kam es zu einer Reduktion der Vorlauftemperaturen aufgrund von Optimierungsmassnahmen, welche in Kapitel 2.7 noch genauer beschrieben werden. Objekt 15 weist im Heizbetrieb die tiefste mittlere Vorlauftemperatur auf, der Abstand gegenüber der zweit tiefsten Vorlauftemperatur von Anlage 17 beträgt rund 1.3 Kelvin. Bei der Aufladung kommt Anlage 15, welche das Trinkwasser mittels Frischwasserstation erwärmt, ebenfalls mit der tiefsten mittleren Vorlauftemperatur aus. Hier beträgt die Differenz zu Anlage 17 sogar über 6 Kelvin. Auffallend ist, dass die Quellentemperaturen der LWWP im Heizbetrieb je nach Anlage gegenüber der Heizsaison 2020/21 teilweise etwas höher, teilweise etwas tiefer lagen, die Heizgradtage aber bei allen Objekten sanken. Das unterschiedliche Verhalten zeigt sich auch bei den Energiekennzahlen für den Heizbetrieb. Die mittlere Quellentemperatur während der Aufladung war hingegen bei allen Anlagen in der Heizsaison 2021/22 etwas höher als 2020/21. Trotzdem konnte für den Aufladebetrieb kein einheitlicher Anstieg der Effizienzkennzahlen festgestellt werden.

Abbildung 7 zeigt die Quellen- und Senkentemperaturen für Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Die Objekte 14 und 19 haben eine eigene TW-Wärmepumpe, weshalb die Werte der TW-Aufladung nicht dargestellt werden können.

Bei Objekt 18 und Objekt 26 ist aus hydraulischen Gründen keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb möglich. Deshalb wurde hier bei «T\_Heizen» die Quellentemperatur «T\_Heizen\_WP» dargestellt, und die Balken zur optischen Unterscheidung «gestreift» dargestellt.

Bei Objekt 6 muss von allen Anlagen der grösste Temperaturhub überwunden werden. Hier liegen sehr hohen Senken-Vorlauftemperaturen für die Radiatorenheizung und niedrige Quellentemperaturen der Erdwärmesonde vor. Auch das Objekt 14 wird mit tiefen Quellentemperaturen betrieben. Bei beiden Anlagen sind die Erdwärmesonden knapp dimensioniert.

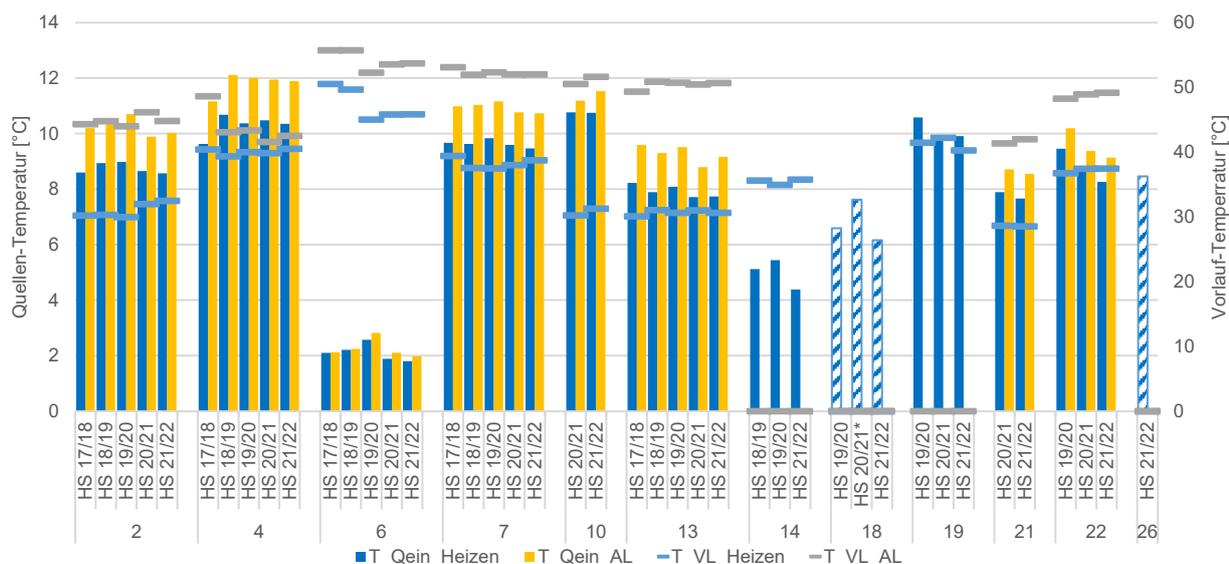


Abbildung 7: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Erdsondenvorlauf) und des Senken-Vorlaufs während den unterschiedlichen Betriebsmodi «Heizen» und «Aufladung» für Sole/Wasser Wärmepumpen. Objekt 14 und 19 haben eine eigene TW-Wärmepumpe, weshalb die Werte der TW-Aufladung nicht dargestellt werden können. Bei Objekt 18 und Objekt 26 ist aus hydraulischen Gründen keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb möglich. Deshalb wurde hier bei «T\_Quin\_Heizen» die Quellentemperatur «T\_Quin\_WPein» dargestellt, und die Balken zur optischen Unterscheidung «gestreift» dargestellt.

Abbildung 8 (Luft/Wasser-Wärmepumpen) und Abbildung 9 (Sole/Wasser-Wärmepumpen) zeigen den Ein- und Auslauf der Temperaturniveaus von Quelle und Senke auf den Wärmenutzungsgrad.

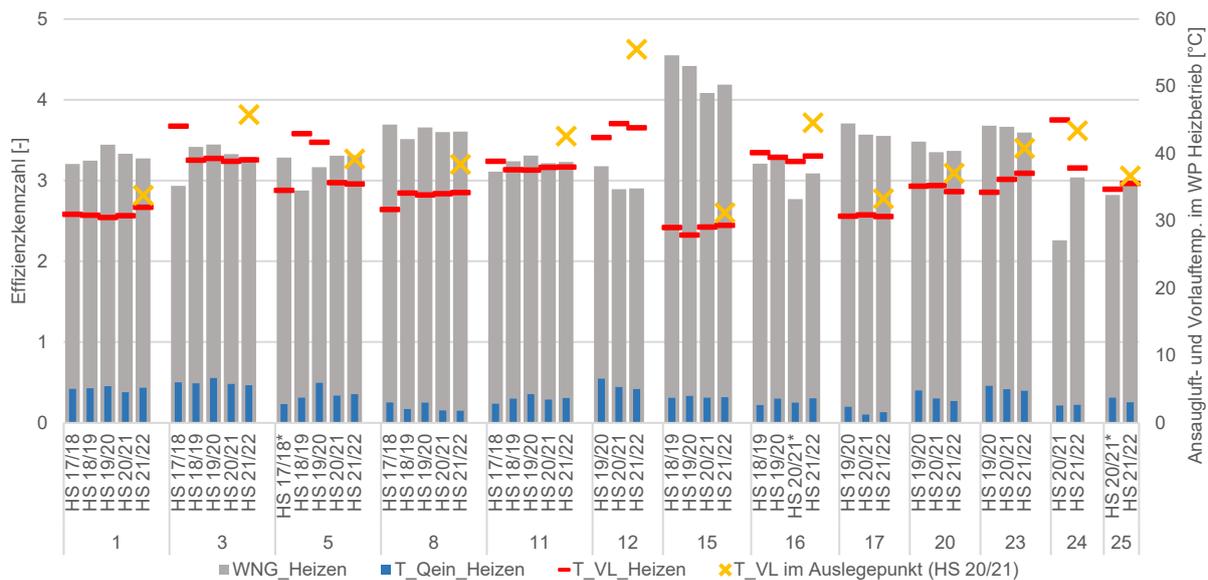


Abbildung 8: Wärmenutzungsgrad der Luft/Wasser-Wärmepumpen und die Temperaturen der Ansaugluft (blau) sowie des mittleren Senkenvorlaufs (rot) während des Heizbetriebs. Zusätzlich ist die Vorlauf-Temperatur im Auslegepunkt (gelbes Kreuz) dargestellt.

Dargestellt sind Jahresmittelwerte der Temperaturen (zeitgewichtet), ausschliesslich im Heizbetrieb. Eine grosse Distanz zwischen der blauen Säule für die Quelleneintrittstemperatur «T\_Quin\_Heizen» und dem roten Balken «T\_VL\_Heizen» für die gemessene mittlere Vorlauf-Temperatur im Heizbetrieb veranschaulicht einen hohen Temperaturhub, welchen die Wärmepumpe bewerkstelligen muss. Grundsätzlich gilt, je geringer der Temperaturhub, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe und entsprechend höher sollte der «WNG\_Heizen» sein.

Über alle Heizperioden von 2017/18 bis 2021/22 betrachtet wurde bei den Anlagen mit neu errichteten Erdwärmesonden im Heizbetrieb im Mittel eine Quellentemperatur von 9.3 °C erreicht. Bei den zwei älteren Objekten liegt sie deutlich tiefer. Anlage 6 weist eine mittlere Quellentemperatur von 2.1 °C, bei Anlage 14 liegt sie bei 5.0 °C. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen war die mittlere Quellentemperatur im Heizbetrieb mit

4.0 °C deutlich um 5.3 Kelvin kälter. Die Senken-Vorlauftemperaturen liegen mit 36.3°C (SW-WP) und 36.0°C (LW-WP) deutlich näher zusammen.

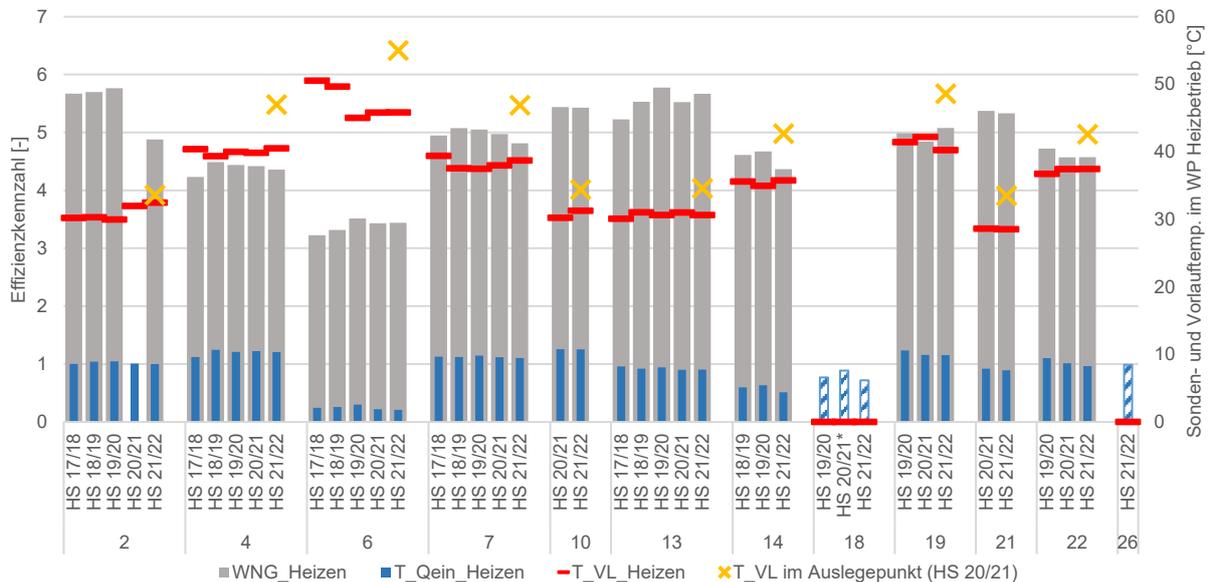


Abbildung 9: Wärmenutzungsgrad der Sole/Wasser Wärmepumpen und die Temperaturen der Erdwärmesonde (blau) sowie des Senkenvorlaufs (rot) während des Heizbetriebs. Zusätzlich ist die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt (gelbes Kreuz) dargestellt. Bei Objekt 18 und Objekt 26 ist aus hydraulischen Gründen keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb möglich. Deshalb wurde hier bei «T\_Quin\_Heizen» die Quelltemperatur «T\_Quin\_WPein» dargestellt, und die Balken zur optischen Unterscheidung «gestreift» dargestellt.

Werden die Mittelwerte der WNG\_Heizen für alle Sole/Wasser- bzw. alle Luft/Wasser -Wärmepumpen in gleicher Weise gebildet, wie vorhin die Mittelwerte der Temperaturen, so zeigt sich, dass der mittlere «WNG\_Heizen» von Sole/Wasser-Anlagen mit 4.9 um 1.2 Punkte höher liegt als der Mittelwert aller Luft/Wasser-Anlagen mit einem «WNG\_Heizen» von 3.7. Wird der Einfluss, der um 5.3 K höheren Quelltemperatur bei Sole/Wasser-Anlagen mit einem Effizienzzuwachs von 2-3 % / K berücksichtigt, so stiege der WNG\_Heizen der Luft/Wasser-Anlagen um ca. 13% von 3.7 auf 4.2 an. Die Differenz ist dann immer noch 0.7 Punkte, welche z.B. auf fehlende Abtaungen bei SWWP, etc. zurückzuführen sind.

In den Abbildungen sind auch die Vorlauftemperaturen im Auslegepunkt der Objekte mit einem gelben Kreuz dargestellt<sup>3</sup>. Anlagen mit einer Fussbodenheizung weisen tendenziell eine «flachere» Heizkennlinie auf, entsprechend liegen bei diesen Gebäuden die gemessenen Vorlauftemperaturen relativ nahe bei der Vorlauftemperatur im Auslegepunkt. Dies ist bei den Luft/Wasser-Anlagen der Objekte 1, 5, 15, 17, 20, 23 und 25 sowie bei den Sole/Wasser-Anlagen der Objekte 2, 10, 13, 21 und 22 gut zu erkennen

### 2.3 Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung

In Abbildung 10 werden die drei Effizienzkennwerte ( $JAZ_{+Aufladung}$ ,  $WNG_{Aufladung}$  und  $SNG_{TWW}$ ) der gemessenen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen dargestellt. Bei den Trinkwarmwasser-Wärmepumpen (TWW-WP) kann die thermische Aufladeenergie nicht ohne grösseren Umbau und Eingriff in den Kältekreis des Messobjekts ermittelt werden. Deshalb wurde die thermische Aufladeleistung «Pth\_AL» bei den TWW-WP nicht gemessen, weshalb der Wärmenutzungsgrad sowie die Jahresarbeitszahl für die Aufladung bei den Anlagen 8 und 23 nicht ermittelt und dargestellt werden.

Die Jahresarbeitszahl  $JAZ_{+Aufladung}$  und der Wärmenutzungsgrad  $WNG_{Aufladung}$  beziehen sich auf die Effizienz der Aufladung. Demgegenüber steht der Systemnutzungsgrad  $SNG_{TWW}$ , der die Trinkwarmwassernutzung in der Effizienzkennzahl mitberücksichtigt. Im  $SNG_{TWW}$  sind somit die Wärmeverluste des Trinkwarmwasserspeicher, der Zirkulationsleitung und der heizungsseitigen Hydraulik berücksichtigt.

<sup>3</sup> Die Einstellwerte im Heizungsregler sind bei den Feldmessungen nicht bekannt. Die Heizkurve wird anhand von Messwerten berechnet und daraus die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt bestimmt bzw. extrapoliert.

Bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen liegen die über eine vollständig gemessene Heizperiode gemittelten Jahresarbeitszahlen für die Trinkwassererwärmung je nach Anlage zwischen 2.5 und 3.8. Den Bestwert erreichte Anlage 15, bei welcher die  $JAZ_{+Aufladung}$  zwischen den letzten beiden Heizperioden eine deutliche Steigerung erfuhr. Eine noch stärkere Zunahme der  $JAZ_{+Aufladung}$  ist bei der Anlage 24 zu sehen. An beiden Anlagen wurden vor der Heizsaison 2021/22 Optimierungen vorgenommen die in Kapitel 2.7 näher erläutert werden.

Beim Vergleich der Kennwerte mit unterschiedlichen Systemgrenzen fällt auf, dass der über alle Luft/Wasser-Anlagen und Perioden gemittelte Wärmenutzungsgrad  $WNG_{Aufladung}$  mit 2.5 um 15 % tiefer liegt, als die Jahresarbeitszahl  $JAZ_{+Aufladung}$  mit 2.9. Die maximale Abweichung für ein einzelnes Objekt liegt bei 39 % und tritt bei Objekt 25 und Objekt 12 auf. Dieser Unterschied entsteht, da in der  $JAZ_{+Aufladung}$  die energetischen Anteile des externen Heizstabes und der Senken-Umwälzpumpe nicht berücksichtigt werden. Bei Objekt 25 wird der Heizstab im TWW-Speicher zur PV-Eigenverbrauchs-Optimierung sehr häufig eingeschaltet. Bei Objekt 12 ist eine tägliches Legionellenprogramm mithilfe des TWW-Heizstabes aktiviert.

Der  $SNG_{TWW}$ , in welchem das Nutzerverhalten mit eingeht, variiert bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen zwischen 0.64 und 2.84. Der tiefste  $SNG_{TWW}$  (0.64) wurde bei Objekt 24 in der Heizsaison 2020/21 gemessen. Der Grund liegt einerseits bei der eher bescheidenen Effizienz der Wärmepumpe und andererseits beim grossen Anteil der Trinkwarmwasser-Aufbereitung am gesamten Wärmebedarf. Der  $SNG_{TWW}$  konnte aber durch Optimierungsmassnahmen im Folgejahr deutlich auf 1.21 verbessert werden.

Der höchste  $SNG_{TWW}$  aller Luft/Wasser-Anlagen wurde am Objekt 15 ermittelt. Die hohe Effizienz der Wärmepumpe bei der TWW-Aufbereitung hat mehrere Ursachen, z.B. Frischwasserstation mit ca. 45 °C Vorlauf, Aufladung immer nur zur Mittagszeit bei den annähernd höchsten Aussentemperaturen. Insgesamt weisen fünf Anlagen über alle auswertbaren Perioden Systemnutzungsgrade  $SNG_{TWW}$  von über 2 auf.

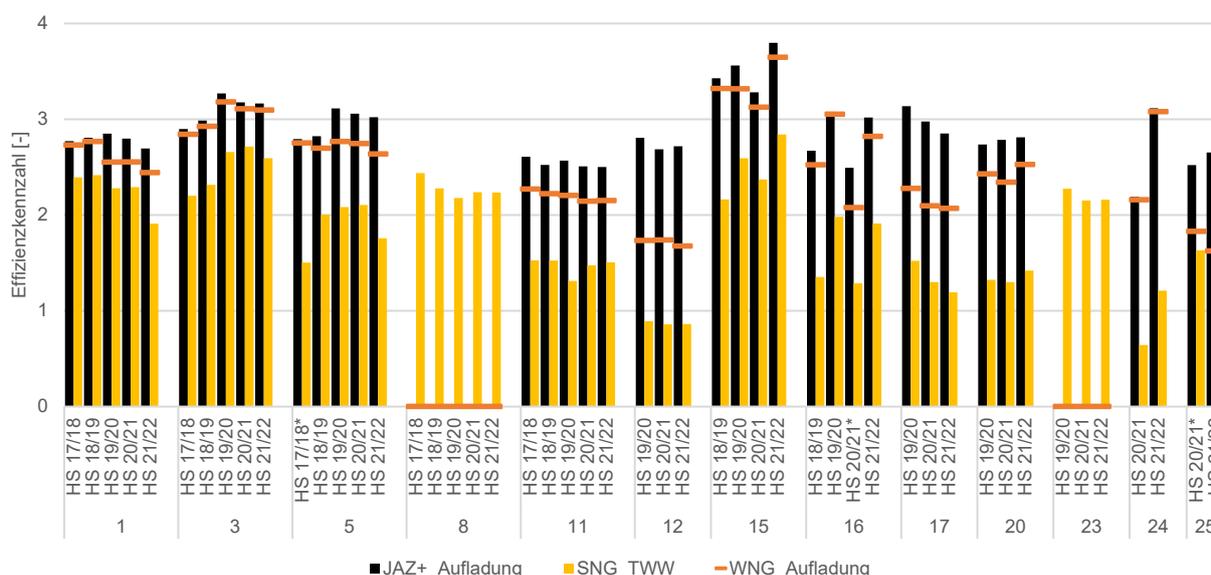


Abbildung 10: Jahresarbeitszahl  $JAZ_{+Aufladung}$ , Wärmenutzungsgrad  $WNG_{Aufladung}$  und Systemnutzungsgrad  $SNG_{TWW}$  der Trinkwassererwärmung für Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen.

Ein Vergleich der Effizienzen für die Trinkwassererwärmung bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen zeigt Abbildung 11 auf. Auch hier sind der Wärmenutzungsgrad und die Jahresarbeitszahl der beiden Anlagen mit Trinkwarmwasser-Wärmepumpen (Objekt 14 und 19) nicht enthalten.

Die Jahresarbeitszahlen  $JAZ_{+Aufladung}$  liegen zwischen 1.6 und 4.8, der Mittelwert bei 3.3. Die Wärmenutzungsgrade  $WNG_{Aufladung}$  variieren zwischen 1.4 und 4.7 und sind mit einem Schnitt von 2.9 um 12 % tiefer als die  $JAZ_{+Aufladung}$ . Der Unterschied dieser beiden Kenngrössen liegt bei Sole/Wasser-Wärmepumpen im selben Bereich wie bei Luft/Wasser-Wärmepumpen. Die Effizienzkennzahlen bei Anlage 6 mit einer zusätzlichen Solaranlage sind nur bedingt aussagekräftig, da dieser Wärmeintrag nicht gemessen wird.

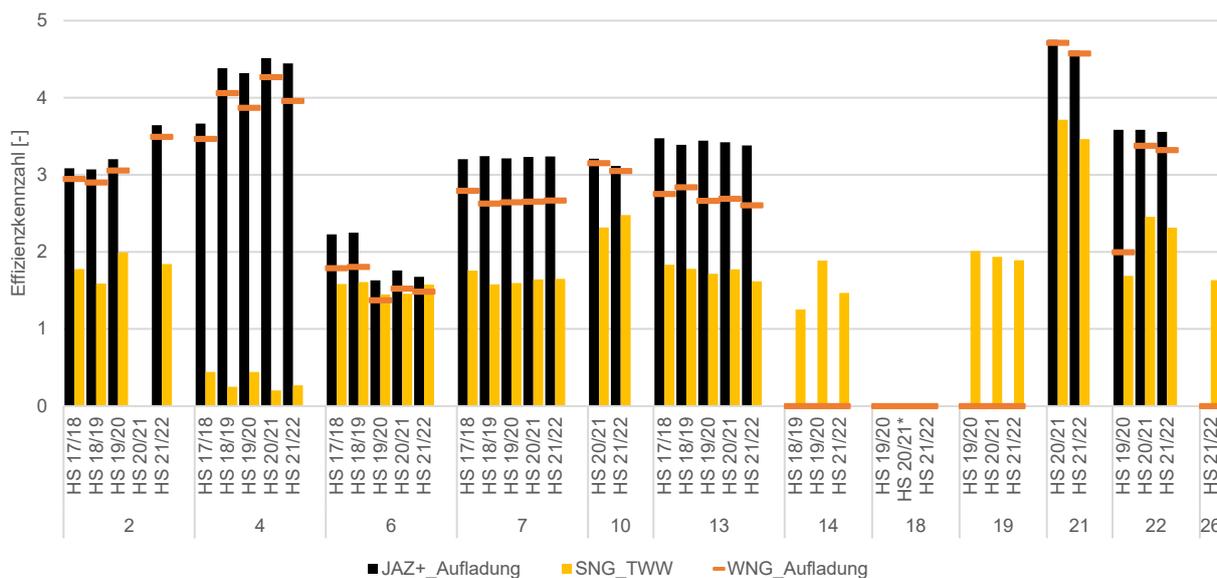


Abbildung 11: Jahresarbeitszahl JAZ+Aufladung, Wärmenutzungsgrad WNG\_Aufladung und Systemnutzungsgrad SNG\_TWW der Trinkwassererwärmung für Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen. Grosse Unterschiede zwischen JAZ+ und WNG weisen oft auf eine energieintensive Legionellenschaltung hin.

Bei Objekt 22 wurde nach der Heizsaison 2019/20 die tägliche Legionellenschaltung auf wöchentlich umgestellt. Nun wird jeden Samstag der TWW-Speicher mithilfe des Heizstabes auf über 55 °C erwärmt. Diese Umstellung erhöhte die Gesamteffizienz deutlich, was sich in den deutlichen höheren Effizienzwerten WNG\_Aufladung und SNG\_TWW widerspiegelt.

Bemerkenswert ist der Unterschied zwischen Objekt 4 und 21. Beide Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden führen die Aufladung sehr effizient mit hohem Wärmenutzungsgrad durch, der Systemnutzungsgrad fällt bei Objekt 4 sehr tief aus (SNG<sub>TWW</sub> von 0.2). Dieser tiefe SNG<sub>TWW</sub> beruht auf einem sehr geringen Warmwasserbedarf der je nach Heizsaison einen Tagesmittelwert zwischen 10 l/d (HS 2020/21) und 28 l/d (HS 2017/18) aufweisen kann. Zusätzlich weist dieses Objekt noch eine Schwerkraftzirkulation der Trinkwasserhydraulik auf, welche in Bezug auf Energieeffizienz und Hygiene hinterfragbar ist. Generell möchten wir aber noch einmal darauf hinweisen, dass ein geringer Warmwasserverbrauch die grösste Energieeinsparung bewirkt, auch bei einer geringeren Effizienz.

Entsprechend der bisherigen Auswertungen haben folgende Faktoren einen grossen Einfluss auf die Höhe des Systemnutzungsgrades SNG<sub>TWW</sub>:

- Warmwasser-Zirkulationssysteme: Diese können die thermischen Verluste erheblich erhöhen
- Trinkwarmwassernutzung: Die genutzte TWW-Menge hat einen grossen Einfluss auf den SNG<sub>TWW</sub>, da dies hier die Bezugsgrösse ist. Eine Reduktion des TWW-Bedarfs führt aber zu einer Reduktion des absoluten Energiebedarfes, auch wenn sich dieser relative Effizienzparameter dadurch ggf. verschlechtern kann.
- Die Wärmedämmung des Speichers und die dadurch anfallenden Verluste.
- Legionellenschaltung: Viele Anlagen führen derzeit die Legionellenschaltung rein zeitgesteuert mithilfe des elektrischen Heizstabes durch, ohne Einbindung der Wärmepumpe. Damit wird auf eine mögliche, deutlich effizienterer Vorerwärmung mithilfe der Wärmepumpe verzichtet. Die überarbeiteten SIA 385/1 wird jedoch eine grösstmögliche Vorerwärmung mittels Verdichter der Wärmepumpe fordern. Dies sollte dann bei der Erstellung neuer Anlagen berücksichtigt werden. Dies erfordert eine Abstimmung zwischen Installation, Inbetriebnahme und Service, was dann aber den elektrischen Energiebedarf reduzieren und die System-Wirkungsgrade erhöhen wird.

## 2.4 Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage

Die Einsatzbedingungen der Wärmepumpensysteme können mithilfe einer Gebäude-, einer Verbrauchs- und einer Standortkenngrösse besser beschrieben werden:

$$QH\_HWB = Q_{Heizen} / EBF$$

$$GWB = (Q_{Heizen} + Q_{Aufladung}) / EBF$$

$$HGT\_20\_16$$

$$HGT\_20\_12$$

spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m<sup>2</sup>]

Gesamtwärmebedarf [kWh/m<sup>2</sup>]

Heizgradtage [°C] mit Heizgrenze 16 °C und Raumtemperatur von 20 °C (Sanierung)

Heizgradtage [°C] mit Heizgrenze 12 °C und Raumtemperatur von 20 °C (Neubau)

Der Grenzwert des Gesamtwärmebedarfs für Minergie liegt bei 55 kWh/m<sup>2</sup>a und bei Minergie A bei 35 kWh/m<sup>2</sup>a. Der Gesamtwärmebedarf (GWB) entspricht der Summe aus Heizwärmebedarf und Trinkwasserwärmebedarf. Bei den Sanierungen werden die Heizgradtage auf 20/16 und bei den Neubauten auf 20/12 bezogen. Die Verwendung der Heizgradtage als Kennziffer sind in Kapitel 1.2 näher beschrieben.

Der Heizwärmebedarf der einzelnen Objekte variiert während der letzten Heizperiode zwischen 30 und 213 kWh/m<sup>2</sup> bei einer Betrachtung von ausschliesslich vollständig gemessenen Jahresperioden. Dieser Wert ist stark von der Bausubstanz abhängig. Der Trinkwarmwasserbedarf, welcher vom Nutzungsverhalten abhängig ist, weist eine Bandbreite von 3 bis 10 kWh/m<sup>2</sup> auf.

Abbildung 12 beschreibt den thermischen Energiebedarf der Gebäude, aufgeteilt nach Raumwärme und TWW-Bedarf. Die klimatischen Einflüsse geben die Heizgradtage wieder. Beim Raumwärmebedarf ist der Unterschied zwischen Neubau und Altbau signifikant. Bei den Neubauten mit Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen (Objekte 1, 5 und 25) ist der thermische Energiebedarf relativ gering. Sanierungsobjekte weisen eine grössere Divergenz auf: Es gibt sowohl Objekte mit tiefen wie auch mit sehr hohem Energiebedarf. Eine möglichst effiziente Umsetzung von Wärmepumpenanlagen ist deshalb bei Sanierungsobjekten besonders wichtig, da hier viel thermische Energie benötigt und entsprechend viel elektrische Energie eingespart werden kann. Durch den höheren Heizwärmebedarf bei Altbauten führen Wärmepumpen hier auch zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen, wenn sie fossile Feuerungsanlagen ersetzen.

In der Feldmesskampagne weist Objekt 12 den höchsten spezifischen Gesamtwärmebedarf von ca. 213 kWh/m<sup>2</sup> auf. Wegen einer Kombination von Fussboden- und Radiatorsystemen kann dieser hohe Heizwärme nur mithilfe hoher Vorlauftemperaturen abgegeben werden. Die mittlere Vorlauftemperatur beträgt hier 44.5 °C in der Heizsaison 2020/21, 43.8 °C in der letzten Heizsaison 2021/22. Trotzdem wird ein relativ hoher Wärmenutzungsgrad im Heizbetrieb erreicht (2.89 in 2020/21 und 2.90 in 2021/22).

Abbildung 12 zeigt auch eindrücklich, wie unterschiedlich der Anteil des Heizwärmebedarfes (HWB) am Gesamtwärmebedarf für Heizen und Trinkwarmwasser-Bedarf (HWB+TWB) ist. In der Heizsaison 2021/22 liegt der HWB-Anteil bei Anlage 12 bei 92%, beim Neubauobjekt 25 reduziert sich der HWB-Anteil auf 68%. Dies zeigt aber auch, dass auch bei einem Neubau der Heizwärmebedarf etwas mehr als zwei Drittel des Gesamtwärmebedarfs ausmacht. Auffallend ist auch der tiefe Heizwärmebedarf von Objekt 24, handelt es sich hierbei doch um ein umfangreich saniertes Objekt aus dem Jahr 1975.

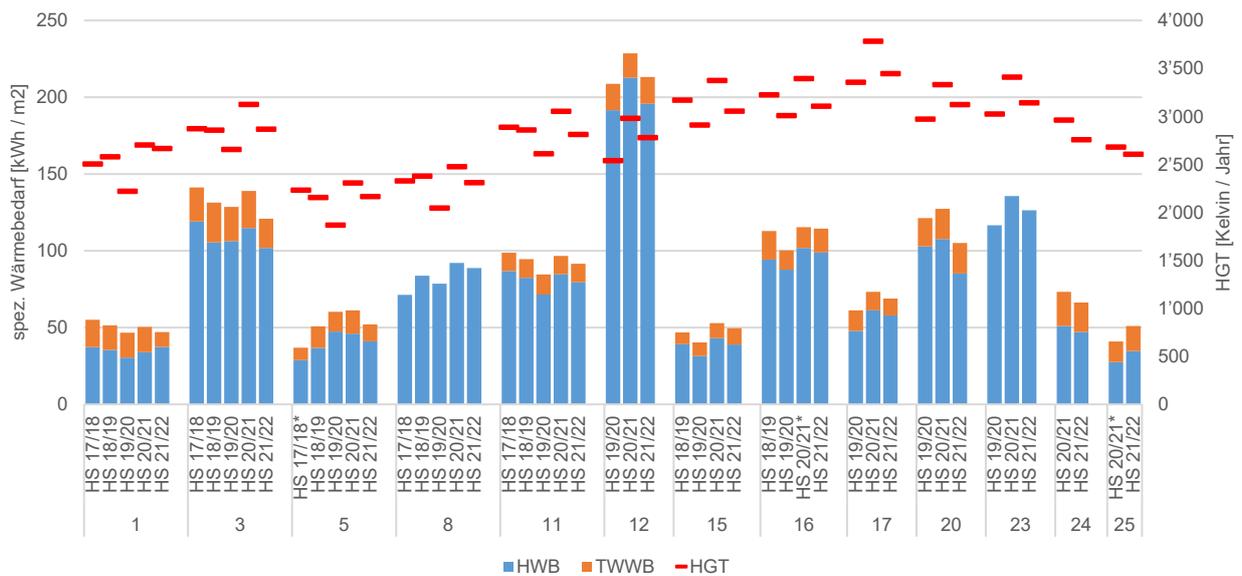


Abbildung 12: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfs (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Von Interesse ist auch, wie viel elektrische Energie ein Gebäude für Heizen und die Aufladung benötigt. In Abbildung 13 ist daher der spezifische elektrische Energiebezug für die Heizungs- und Trinkwarmwassererzeugung dargestellt.

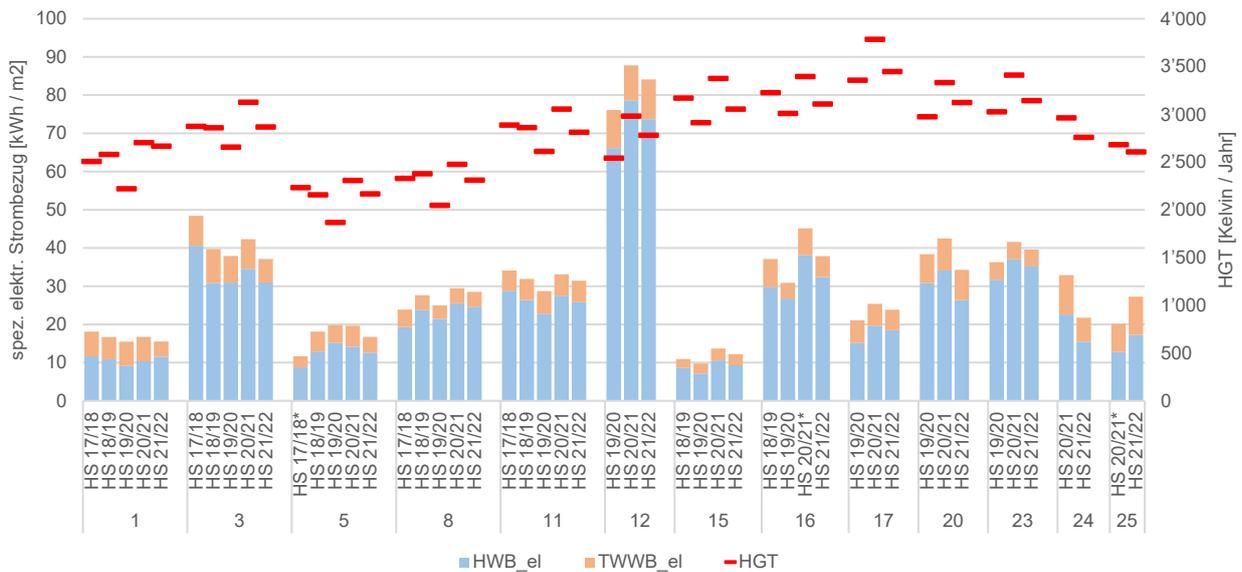


Abbildung 13: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m<sup>2</sup>, sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Auffallend ist zum Beispiel der Vergleich von Objekt 5 und 25: Der spezifische Gesamt-Wärmebedarf (HWB + TWWB) fällt bei beiden Anlagen ähnlich aus (52 vs. 51 kWh/m<sup>2</sup>), der elektrische Energiebedarf liegt jedoch aufgrund der Effizienzunterschiede bei Objekt 25 mit 27 kWh<sub>el</sub>/m<sup>2</sup> um 60 % über dem elektrischen Bedarf von Objekt 5, welches 17 kWh<sub>el</sub>/m<sup>2</sup> benötigt.

Ab Abbildung 14 werden die Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen untersucht. Hier liegen die Heizwärmebedarfswerte zwischen 37 und 98 kWh/m<sup>2</sup> während der letzten, vollständig gemessenen Heizperiode. Der Trinkwarmwasserbedarf liegt im Bereich von 8 bis 21 kWh/m<sup>2</sup>. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen wird mit Objekt 2 nur ein Neubau gemessen, alle anderen Objekte sind Bestandsgebäude. Auch hier zeigt sich, dass der Bedarf an Raumwärme im Neubau mit 37 kWh/m<sup>2</sup> wesentlich unter dem Durchschnitt der Bestandsgebäude liegt, welche hier im Schnitt 67 kWh/m<sup>2</sup> benötigen. Es gibt aber auch hier Objekte mit kleinem Heizwärmebedarf, zum Beispiel das Objekt 21, welches in der Saison 2021/22 mit einem Raumwärmebedarf von 37 kWh/m<sup>2</sup> mit dem Neubau gleich auf liegt.

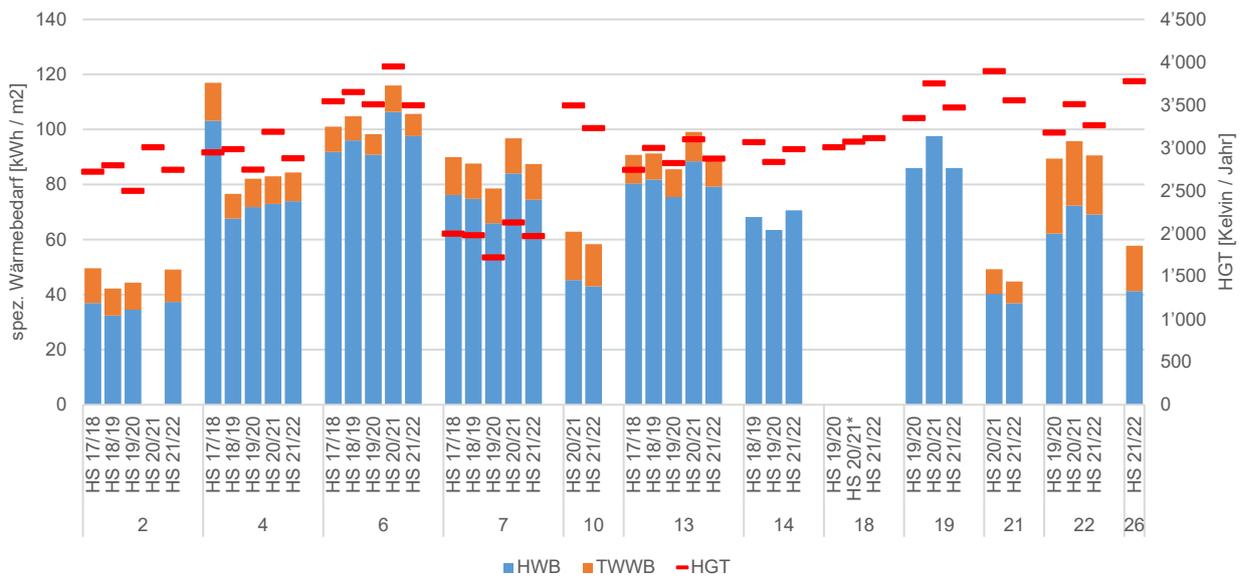


Abbildung 14: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfes (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Der Strombedarf der Gebäudeheizungsanlagen der Sole/Wasser-Wärmepumpen ist in Abbildung 15 ersichtlich.

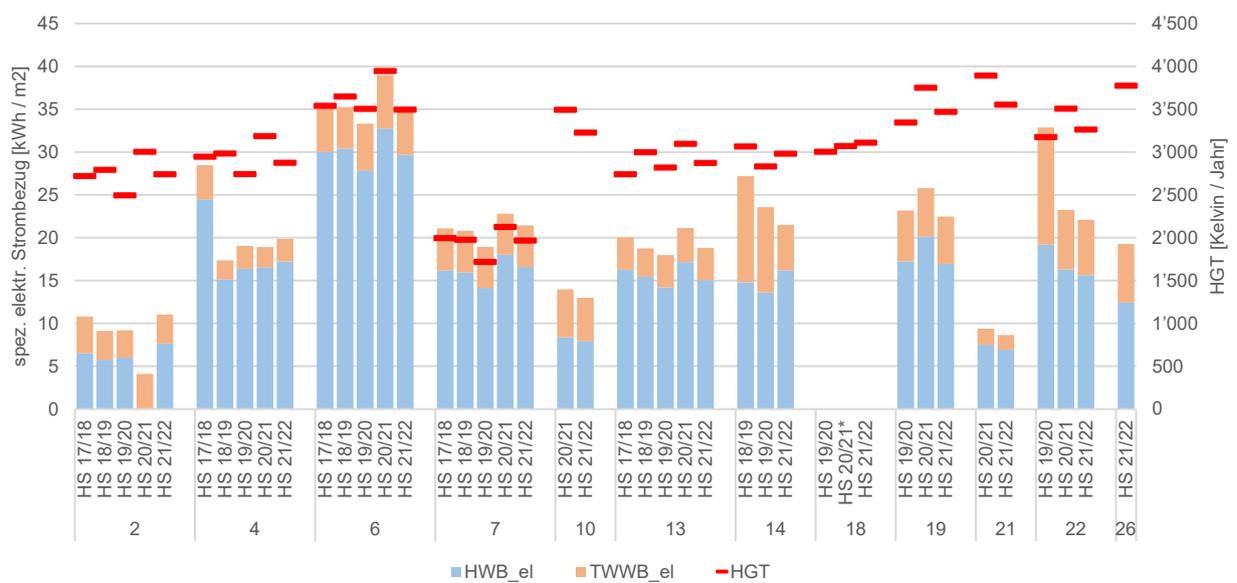


Abbildung 15: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m<sup>2</sup>, sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Bei den Objekten 14 und 19 erfolgt die TWW-Aufbereitung mittels Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler) und für die Anlage 18 ist eine Unterscheidung zwischen Heizung und TWW-Aufbereitung aufgrund der speziellen Hydraulik nicht möglich, daher fehlen die Daten in den Diagrammen der Abbildung 15.

Auffallend ist, dass der elektrische Energiebedarf der Trinkwassererwärmung (TWWB\_el) der Anlagen 14 und 22, seit der Heizsaison 2020/21, stark abgenommen hat und nun im Bereich der anderen Anlagen liegt. Bei der Anlage 22 wurde vor Beginn der Heizsaison 2020/21 das Legionellenprogramm geändert, was zu einer erheblichen Reduktion der aufgenommenen elektrischen Energie führte.

Bei Objekt 14 wurden die Einstellungen, der im März 2019 ausgetauschten Trinkwarmwasser-Wärmepumpe Anfang der Saison 2021/22 optimiert. Dabei war der Besitzer von Anlage 15 behilflich. Nun kommt der Elektro-Heizstab kaum mehr zum Einsatz.

## 2.5 Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb

Abbildung 16 zeigt den Vergleich des durchschnittlichen Temperaturniveaus der Energiequellen Aussenluft (LW) und Erdwärmesonde (SW) in den Betriebsmodi Heizen ( $T_{\text{Qein\_Heizen}}$ , gelb) und Heizen mit Aufladung ( $T_{\text{Qein\_WPein}}$ , grün). Bei diesen Kennwerten wird der Mittelwert der Quellentemperatur über jenen Zeitbereich gebildet, in welchem die Wärmepumpe im Heiz-Betrieb war ( $T_{\text{Qein\_Heizen}}$ ) bzw. im Heiz- oder Aufladebetrieb war ( $T_{\text{Qein\_WPein}}$ ).

Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen, verändern sich die Quellentemperaturen über das Jahr sehr stark, da die Quelle ja die Umgebungsluft ist. Dementsprechend weisen diese beiden Kennwerte bei den LWWP einen deutlich höheren Unterschied auf, da Aufladungen auch bei hohen Aussentemperaturen im Sommer stattfinden. Im Gegensatz dazu erfolgt der Heizbetrieb nur bei niedrigen Aussentemperaturen und somit vorwiegend im kälteren Winter. In der Heizsaison 2021/22 liegt die mittlere Quellentemperatur  $T_{\text{Qein\_WPein}}$  somit 0.7 Kelvin über der reinen Quellentemperatur im Heizbetrieb  $T_{\text{Qein\_Heizen}}$ . Bei SWWP ist dieser Unterschied nur sehr gering, da die Soletemperaturen in den wenigen Sommerbetriebsstunden auch nur wenige Kelvin über den Soletemperaturen des Winters liegen, in welchen die Wärmepumpe deutlich mehr Betriebsstunden aufweist.

Die mittleren Aussentemperaturen über alle Gebäude lag in der Heizsaison 2021/22 bei 12.2 °C.

Die meisten Sole/Wasser-Wärmepumpen zeigen gegenüber Luft/Wasser-Wärmepumpen höhere Quellentemperaturen auf, wie Abbildung 16 zeigt. Die mittlere Quellentemperatur aller Sole-Wasser Anlagen beträgt 7.9 °C. Die mittlere Quellentemperatur aller Luft/Wasser-Wärmepumpen beträgt 4.5°C im Ganzjahresbetrieb ( $T_{\text{Qein\_WPein}}$ ), bzw. 3.8°C nur im Heizbetrieb ( $T_{\text{Qein\_Heizen}}$ ). Damit liegen die Quellentemperaturen der SWWP im Schnitt um 3.4 Kelvin bzw. 4.1 Kelvin im Heizbetrieb über den LWWP.

Die jeweils tiefsten auftretenden mittleren Quellentemperaturen liegen hier bei den LWWP mit Objekt 8 und SWWP mit Objekt 6 aber fast gleichauf. Wichtig: Bei den Objekten 6 und 14 wurde eine alte WP durch eine neue, effizientere Wärmepumpe getauscht. Die bestehenden Erdwärmesonden wurden weiterverwendet, was die tiefen Quellentemperaturen erklärt. Die Luft/Wasser-Anlage 17 liegt auf einer Höhe von 737 m.ü.M und weist die tiefste Heiz-Quellentemperatur  $T_{\text{Qein\_Heizen}}$  auf. Die Objekte 8, 14, 19 und 23 haben eine eigene Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (TWWP) weshalb  $T_{\text{Qein\_Heizen}}$  und  $T_{\text{Qein\_WPein}}$  ident sind.

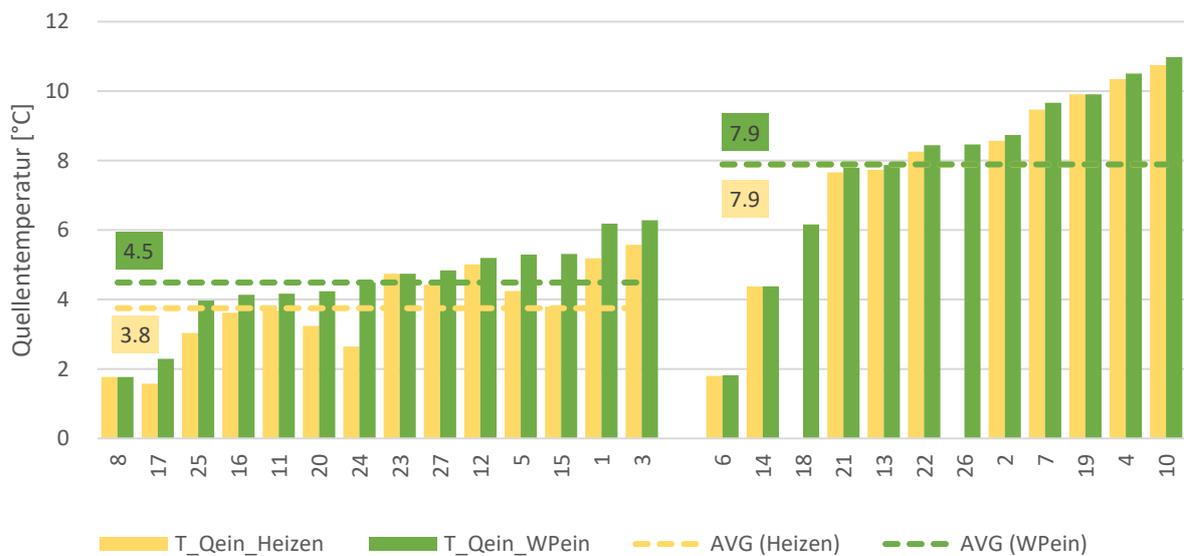


Abbildung 16: Quellentemperaturen im Heizbetrieb und gesamt für die Heizsaison 2021/22, getrennt nach Luft/Wasser- (LW) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (SW), aufsteigend sortiert

## 2.6 Temperaturverlauf der Erdwärmesonden (EWS)

Bei neu erstellten Erdwärmesonden (EWS) wird häufig davon ausgegangen, dass es zu einem deutlichen Temperaturabfall nach den ersten Betriebsjahren kommt, abhängig von der Geologie und der Auslegung bezüglich Wärmeentzugsleistung und -menge. Mit den Feldmessungen können nun einige Anlagen über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Bei den Anlagen 6, 14, 19 und 22 wurden in den Betrachtungsperioden 2019/20 und 2020/21 abfallende Vorlauftemperaturen aus den EWS (Quellentemperaturen) im Heizbetrieb festgestellt, siehe Abbildung 7. Die Reduktion der Quellentemperaturen ( $\Delta T_{Qein\_Heizen}$ ) war überall grösser als 0.7 Kelvin, was auf eine mögliche Auskühlung des Erdreichs hindeuten könnte. Eine Überprüfung der Messdaten aus der letzten Periode zeigt nun aber nur noch bei Anlage 22 eine erneute grössere Absenkung der Quellentemperatur im Heizbetrieb ( $\Delta T_{Qein\_Heizen} \approx 0.4K$ ). Bei Anlage 22 sind die Quellentemperaturen der EWS sowohl im Heiz- als auch im Aufladebetrieb über alle drei gemessenen Heizperioden kontinuierlich gesunken. Dies könnte auf eine mögliche Auskühlung des Erdreiches hindeuten.

In Abbildung 17 sind die Tagesmittelwerte der EWS-Austrittstemperatur im WP-Betrieb von Objekt 22 mit blauen Kreuzen dargestellt. Die rote Kurve zeigt den Mittelwert über die letzten 365 Tage. Dieser Mittelwert ist zuerst deutlich abgesunken, der Trend geht später aber wieder nach oben. Ob der Anstieg auf den geringeren Energiebezug in der letzten Heizsaison begründet ist, wird sich frühestens bei den Auswertungen der nächsten Heizperiode zeigen.

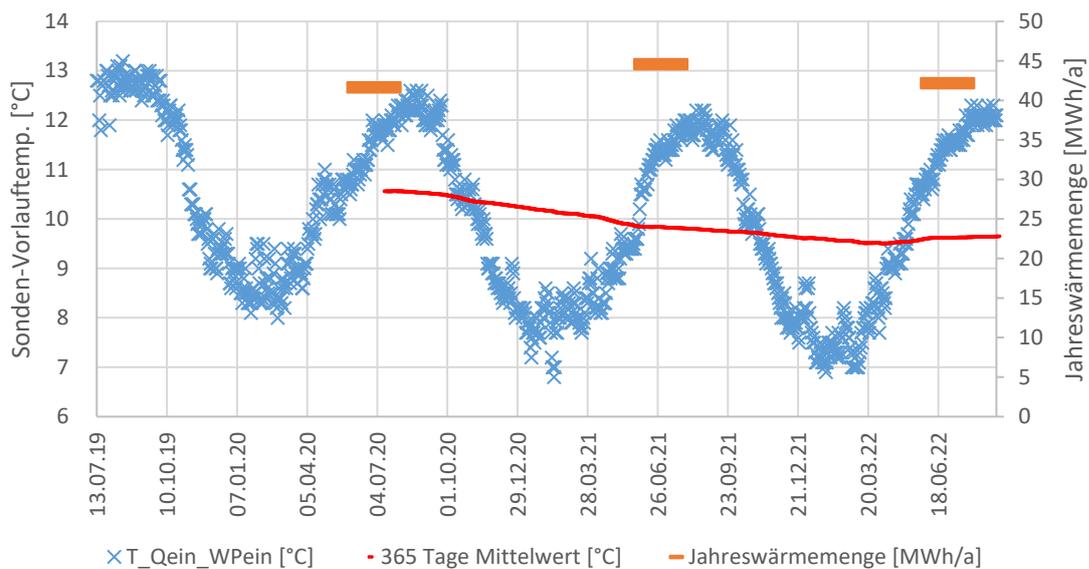


Abbildung 17: Temperatur am Austritt der Erdwärmesonde der Anlage 22 mit drehzahlvariabler Wärmepumpe und ohne Kühlfunktion bzw. Regeneration der Erdwärmesonde.

Bei den anderen Anlagen war der Grund für die Temperaturreduktion eher die deutlich kältere Heizperiode 2020/21. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, hat auch bei der Anlage 18 die Sondentemperatur in der Saison 2020/21 abgenommen. Hier hat sich die Temperatur allerdings schon in der letzten Heizsaison wieder stabilisiert.

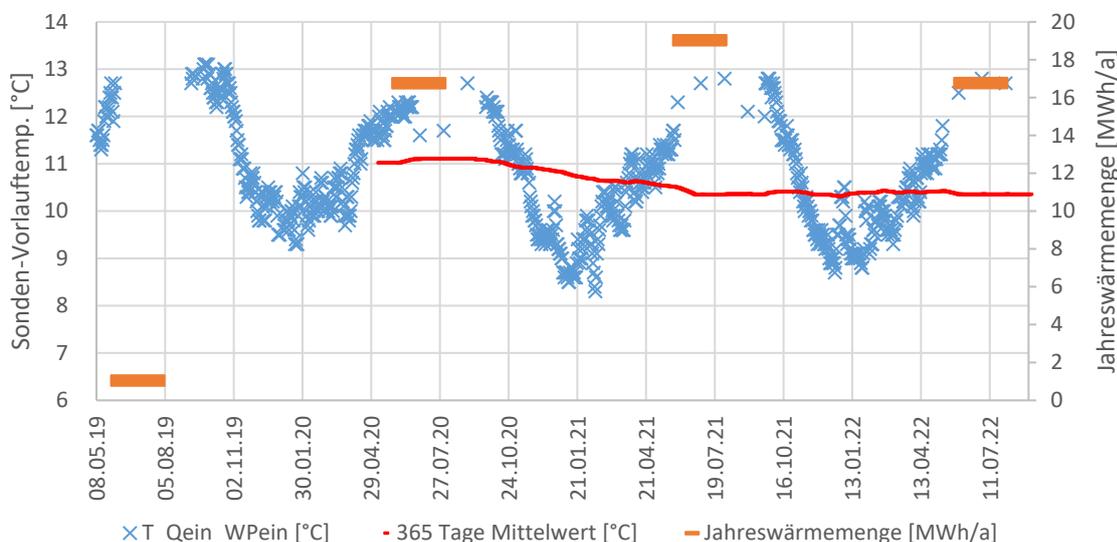


Abbildung 18: Temperatur am Austritt der Erdwärmesonde der Anlage 19 mit On-/Off-Wärmepumpe und ohne Kühlfunktion bzw. Regeneration der Erdwärmesonde.

Abbildung 19 stellt die Sondentemperatur der Anlage 10 dar, die mit einer Kühlfunktion ausgestattet ist. Hier kann das gegenläufige Verhalten des 365-Tage Mittelwertes (rote Kurve) zur bezogenen Jahresenergie gesehen werden. Auffallend ist, dass die Temperatur der EWS hier kleinere Amplituden aufweist als bei den Objekten 22 und 19, obwohl Anlage 19 eine vergleichbare Jahreswärmemenge bezieht.

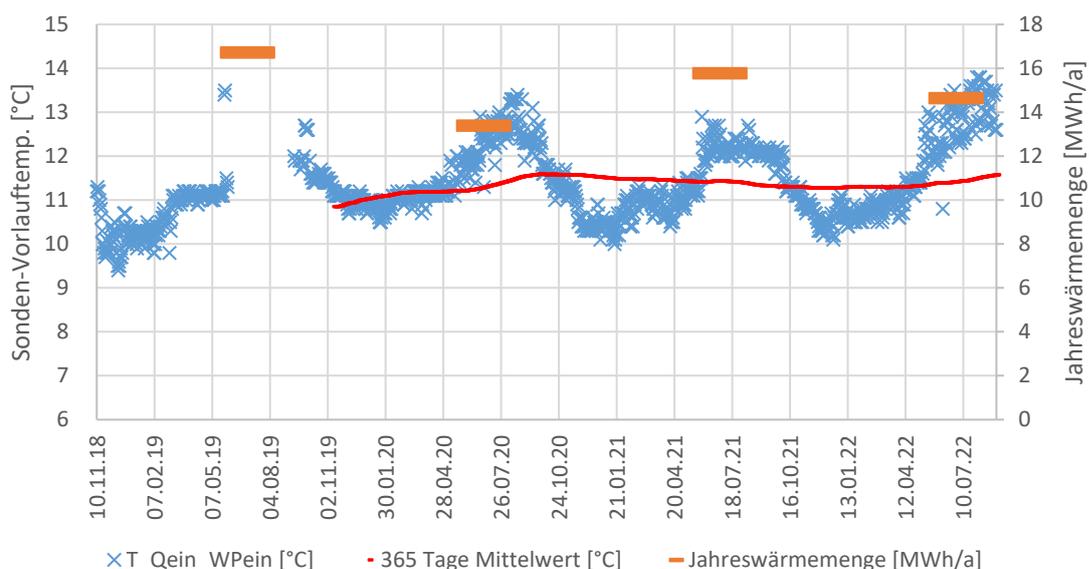


Abbildung 19: Temperatur am Austritt der Erdwärmesonde der Anlage 10 mit On-/Off-Wärmepumpe und mit Kühlfunktion bzw. Regeneration der Erdwärmesonde.

Bei Anlage 7 sind seit 2017 Messdaten vorhanden. In Abbildung 20 kann daher der Verlauf der Sonden-temperatur über fünf Heizperioden aufgezeigt werden. Hier ist die Temperatur über alle Jahre sehr konstant, sie wird offensichtlich nur geringfügig von der jährlich bezogenen Energiemenge beeinflusst.

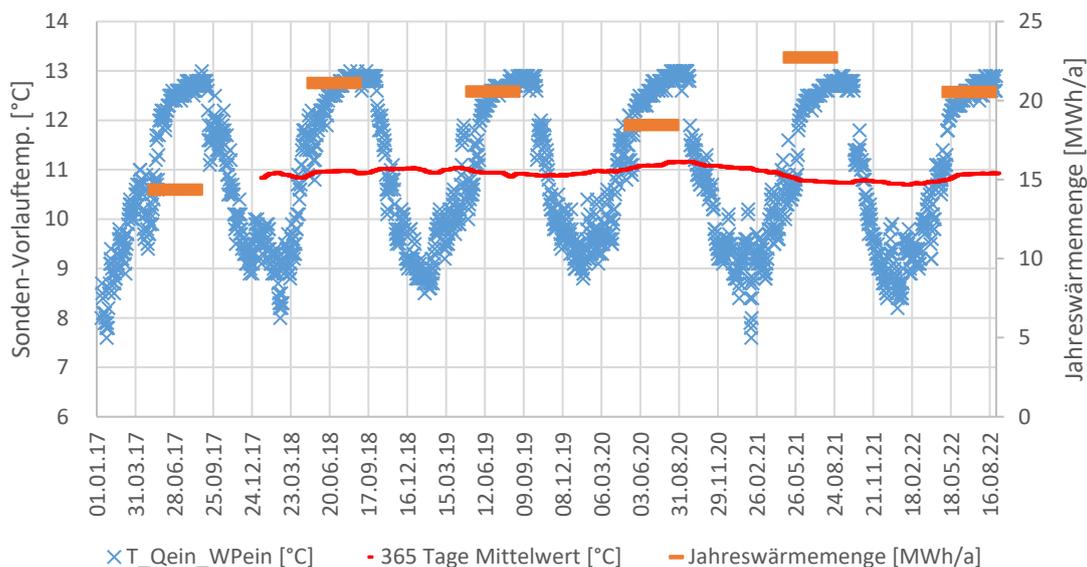


Abbildung 20: Temperatur am Austritt der Erdwärmesonde der Anlage 7 mit On-/Off-Wärmepumpe und ohne Kühlfunktion bzw. Regeneration der Erdwärmesonde

## 2.7 Optimierungen und Diverses

Bei Anlage 15 wurde am Anfang der Heizsaison 2021/22 der technische Speicher durch einen neuen Schichtspeicher ersetzt, um ein Durchmischen des warmen Speicherinhaltes mit dem kalten Rücklauf zu minimieren. Die geringeren Druckverluste im neuen Speicher und die Reduktion der Senkenpumpen-Drehzahl bewirkten Einsparungen in der elektrischen Energie. Ein Vergleich der letzten beiden Heizperiode zeigt, dass der gesamte Heizwärmebedarf um 7% von 11.86 MWh auf 11.11 MWh gesunken ist, die elektrische Energieaufnahme bei der Senkenpumpe aber um 39% zurückgegangen ist (von 161 kWh<sub>el</sub> auf 115 kWh<sub>el</sub>).

Bei Anlage 16 wurde gegen Ende von Heizsaison 2020/21 der Einsatz des Heizstabes für die Legionellen-schaltung deaktiviert. Aussagen über die Auswirkung können aufgrund der unvollständig gemessenen Heiz-saison 2020/21 aber nicht gemacht werden.

Der Eigentümer von Objekt 17 nahm im September 2022 eine PV-Anlage in Betrieb und kündigte an, dass er in der kommenden Heizsaison eine Eigenverbrauchs-Optimierung anstrebt.

Bei Objekt 20 wurde gegen Ende der Heizsaison 2020/21 das Dach, sowie die Vor- und Rücklaufleitungen der Wärmepumpe neu isoliert. Die Heizsaison 2021/22 weist nun einen Rückgang des thermischen Heiz-wärmebedarfs von 21% auf, die Heizgradtage reduzierten sich aber nur um 7%. Der thermische Trinkwarm-wasser-Bedarf hat sich kaum verändert (siehe z.B. Abbildung 12).

### 2.7.1 Optimierungsmassnahmen bei Objekt 24

Nach der ersten Messperiode konnten bei Objekt 24 einige mögliche Optimierungsmassnahmen identifiziert werden, welches für HS 2021/22 umgesetzt wurden. Dadurch war auch ein Vergleich der beiden Heizsai-sonen möglich:

- Senkenpumpe: Hier wurde die Drehzahl um ca. 10% reduziert, wodurch die mittlere Pumpenlei-stung von 30.4 W auf 17.3 W sank. Die Laufzeit der Senkenpumpe reduzierte sich in der Heizsaison 2021/22 um knapp 4%, der Jahresenergieverbrauch der Senkenpumpe sank aber um 45 % von 78.1 kWh/a (HS 2020/21) auf 42.7 kWh/a (HS 2021/22).
- Verdichter: Hier wurde die Minimaldrehzahl des Verdichters reduziert, dadurch sank die minimale Verdichter-Leistungsaufnahme von 4 kW auf 2 kW. Damit wurde der Regelbereich des Verdichters erhöht. Die Betriebsstunden des Verdichters stiegen daraufhin um 2.5% auf 2374 Stunden, obwohl der thermische Wärmebedarf (HWB + TWWB) um 9 % auf 66.3 MWh zurückging.
- Aufladung: Die maximale thermische Leistung im Aufladebetrieb des TWW-Speichers wurde von 8 kW auf 6 kW reduziert, um tiefere Vorlauftemperaturen während der Speicheraufladung zu er-möglichen - und damit die Effizienz zu verbessern. Wie Abbildung 22 zeigt, ist die mittlere Vorlauf-temperatur bei der Aufladung von 51.4 °C in HS 2020/21 auf 49.0 °C in HS 2021/22 gesunken. Entsprechend Abbildung 23 sank der elektrische Energiebedarf für die Aufbereitung des Trinkwarm-wasser (TWWB\_el) gegenüber dem Vorjahr auf 61 %, der thermische Energiebedarf (TWWB\_th) sank aber nur auf 87 %.
- Heizkennlinie und Pufferspeicher: Die Temperaturüberhöhung im Pufferspeicher wurde reduziert und damit die Senken-Vorlauftemperatur im Heizbetrieb abgesenkt. Wie in Abbildung 21 dargestellt, liegt die neue Heizkurve um ca. 7 Kelvin tiefer. Der Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur im Heizbetrieb hat sich von HS2020/21 auf HS2021/22 von 45.0 °C auf 37.8 °C reduziert (siehe Abbil-dung 22).

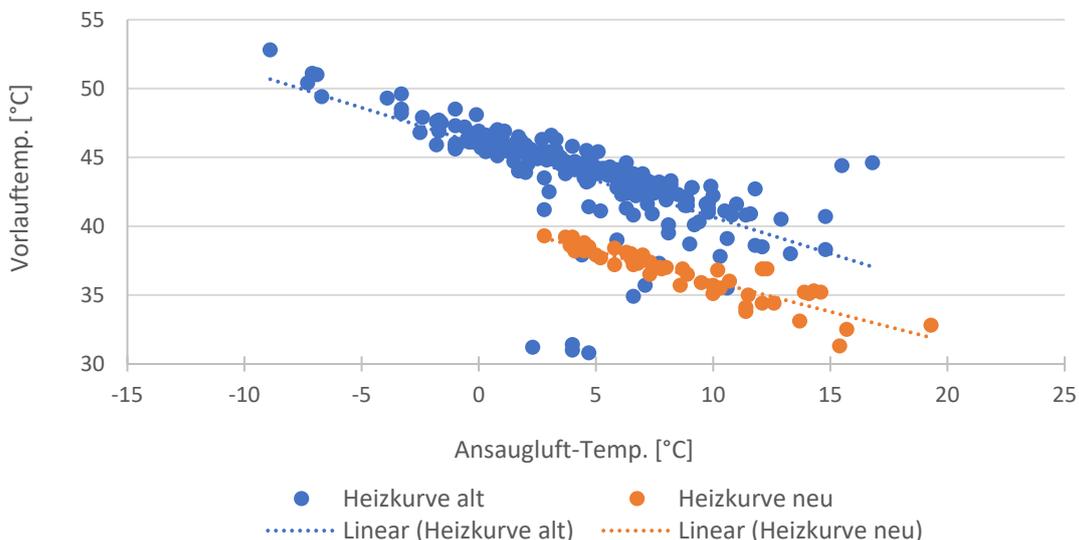


Abbildung 21: Veränderung der Heizkurve bei Anlage 24 nach einer Reduktion der Temperaturerhöhung im Pufferspeicher.

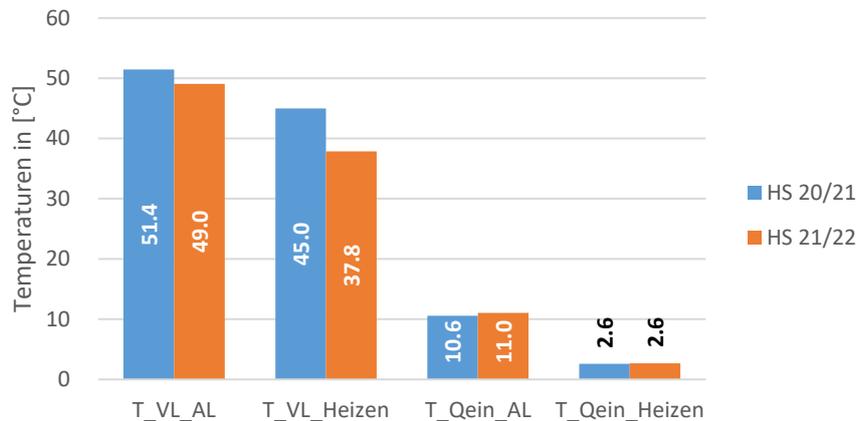


Abbildung 22: Vergleich der Vorlauf- und Quellentemperaturen im Heiz- und Aufladebetrieb von Objekt 24 in den Heizperioden HS2020/21 und HS2021/22.

Die Veränderungen des thermischen und elektrischen Energiebedarfs im Vergleich zu den Heizgradtagen sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Heizgradtage sanken um 7 %, der thermische Heizbedarf sank fast ident um 8 %. Der elektrische Energiebedarf für den Heizbetrieb reduzierte sich aber um 31 % (!), was auf eine höhere Effizienz zurückzuführen ist. Bei der Aufladung sank der thermische Energiebedarf um 13 %, der elektrische Energiebedarf um 39 %.

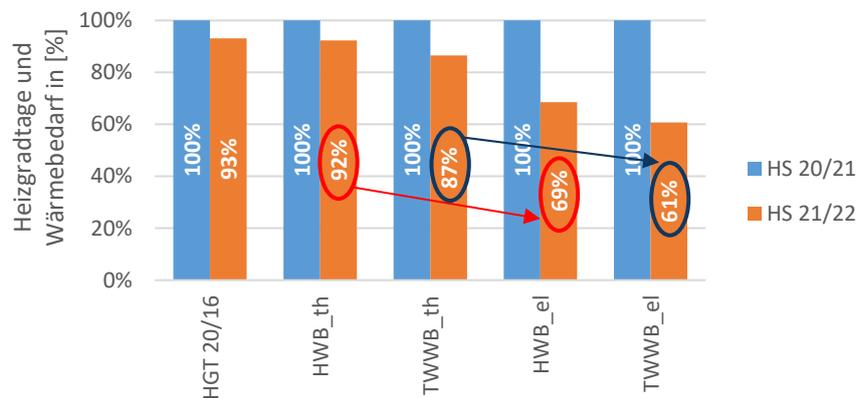


Abbildung 23: Vergleich der Heizgradtage sowie des thermischen und elektrischen Bedarfs im Heiz- und Aufladebetrieb. Die Heizgradtage bei Objekt F024 sanken von Heizperiode HS2020/21 auf HS2021/2 um 7 %, der thermische Heizwärmebedarf sank um 8 % und der elektrische Heizwärmebedarf sank durch die höhere Effizienz sogar um 31%. Die thermische Aufladeenergie sank auf 87 %, die elektrische Aufladeenergie auf 61 %.

Die Effizienzsteigerungen in den Betriebszuständen Heizen und Aufladung sind in Abbildung 24 dargestellt. In der Heizsaison 2021/22 erhöhten sich die Jahreskennwerte JAZ+, WNG und JAZ+\_Heizen um ca. 37%. Der JAZ+\_AL und der WNG\_AL erhöhten sich um 42%, beim SNG\_TWWS kam es sogar fast zu einer Verdoppelung.

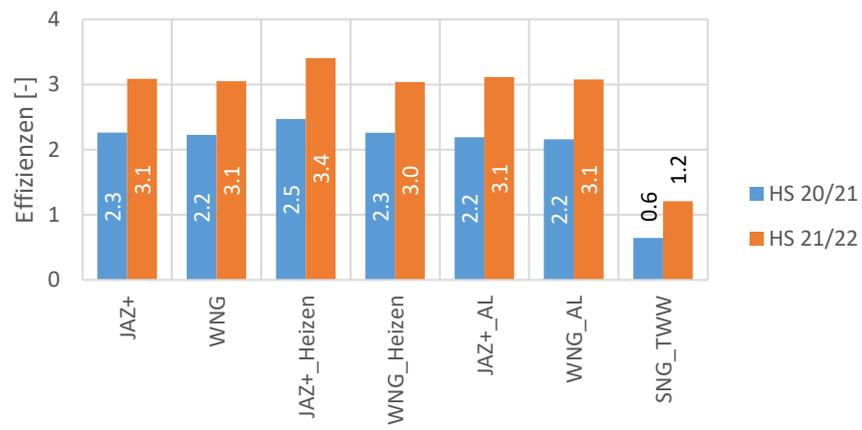


Abbildung 24: Vergleich der Effizienz-Kennzahlen (kombiniert, heizen und aufladen) von Objekt F024 für die Heizperioden HS2020/21 und HS2021/22.

### 3. Spezialauswertungen im Detail

#### 3.1 Strombedarf und ausgewählte Grössen im Tagesverlauf

Wärmepumpen können zu ganz unterschiedlichen Tageszeiten betrieben werden. Je nachdem, ob dies aus Sicht des Anlagenbetreibers oder eines Energieversorgungsunternehmens (EVU) betrachtet wird, können die gewählten Zeitfenster vorteilhaft sein oder nicht. Hierbei gibt es unterschiedliche Optimierungsziele, z.B. möglichst hohe Gesamteffizienz bei möglichst geringem elektrischem Energiebedarf, eine Optimierung des Eigenverbrauchs bei PV-Anlage, etc.

In diesem Kapitel wird am Beispiel der Luft/Wasser-Anlage F001 gezeigt, welches Potenzial zur Energieeinsparung durch Verschiebung der Betriebszeit der Wärmepumpe bestehen würde.

Abbildung 25 zeigt die über den Januar 2022 gemittelten Stundenwerte der Aussenlufttemperatur (rote Kurve) und die aufgenommene mittlere Leistung des Kompressors bei Anlage F001 (hellbraune Fläche). Die Stunden-Leistungen ergeben sich durch das jeweilige Verhältnis von Lauf- und Stillstandzeiten des On/Off-betriebenen Kompressors über die Uhrzeit und jeden einzelnen Tag im Jänner 2022. Die hellbraune Fläche stellt somit auch ein Mass für die elektr. Energie dar, welche vom Kompressor im Januar über den durchschnittlichen Tagesverlaufs aufgenommen wurde. Die strichlierte Linie gibt den entsprechenden Tages-Mittelwert der Leistungsaufnahme von 1'008 W an. Die gemittelte Aussenlufttemperatur im Januar 2022 lag zwischen  $-0.5^{\circ}\text{C}$  (Stunde 3) und  $5.8^{\circ}\text{C}$  (Stunde 13), der 24-Stunden-Mittelwert betrug  $1.6^{\circ}\text{C}$  (zeitliche Mittelwert ohne Energiegewichtung).

Abbildung 25 zeigt, dass diese Wärmepumpe im Januar überwiegend zwischen 19 Uhr abends und 8 Uhr morgens gelaufen ist. Dies entspricht jenem Zeitbereich, welcher die tiefste Aussenlufttemperaturen bzw. Quelltemperaturen der LWWP aufweist, entsprechend liegt der energiegewichtete Mittelwert bei  $1.0^{\circ}\text{C}$ .

Würden die Betriebszeiten der Wärmepumpe gleichmässig über den ganzen Tag verteilt werden, würde sich die mittlere Quelltemperatur um 0.6 K auf den Zeitmittelwert von  $1.6^{\circ}\text{C}$  erhöhen. Unter der Annahme einer Effizienzsteigerung von 2-3% pro Kelvin höherer Quelltemperatur, ergäbe sich durch diese Anpassung der Betriebszeiten eine Effizienzerhöhung um 1.5%. Dies würde für den Jänner 2022 bei einer mittleren elektrischen Verdichterleistung von 1'008 W eine mögliche elektrische Energieeinsparung von 11.2 kWh ergeben, ohne Änderung der thermischen Energieabgabe.

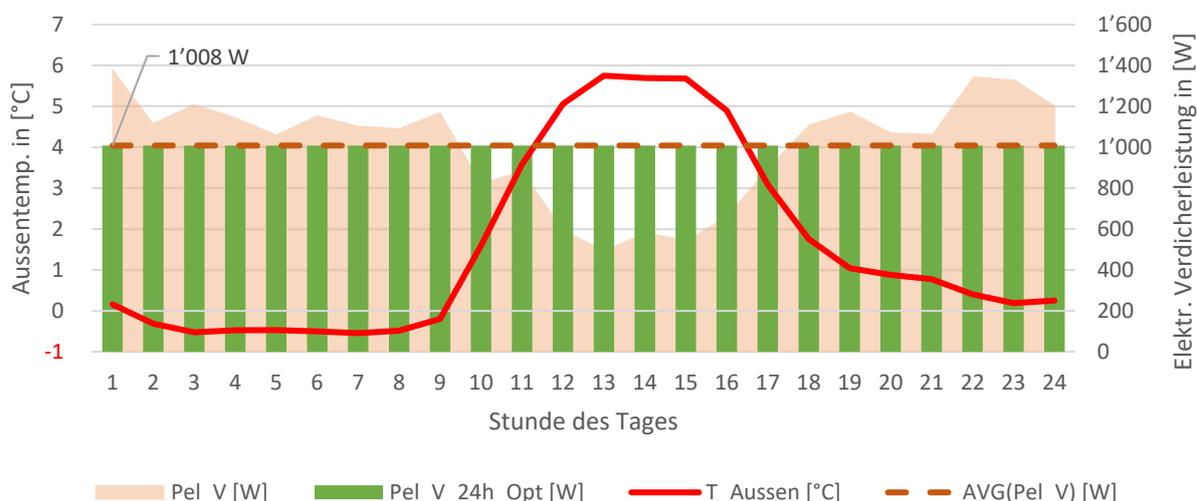


Abbildung 25: Stunden Mittelwerte der Leistungsaufnahme des Kompressors der Anlage F001 im Januar 2022: Verteilung des Wärmepumpenbetriebs auf 24 Stunden im Vergleich zur Referenz aus den Messungen mit einer mittleren Leistung von 1008 W<sub>el</sub> bei einer mittleren Umgebungstemperatur von  $1.6^{\circ}\text{C}$ .

Würde man den Wärmepumpenbetrieb auf jene 12 Stunden verschieben, welche die höchsten mittleren Aussenlufttemperaturen aufweisen (hier Stunde 10 bis Stunde 21, siehe Abbildung 26), erhöht sich die mittlere Quelltemperatur um 2.3 Kelvin auf  $3.3^{\circ}\text{C}$ . Dies entspricht einer Effizienzsteigerung von 5.7%, wenn wieder mit einer Steigerung von 2.5 %/K gerechnet wird. Bei gleicher thermischer Abgabeenergie könnte aufgrund der höheren Effizienz im Januar 2022 ca. 42.8 kWh elektrischen Energie eingespart werden.

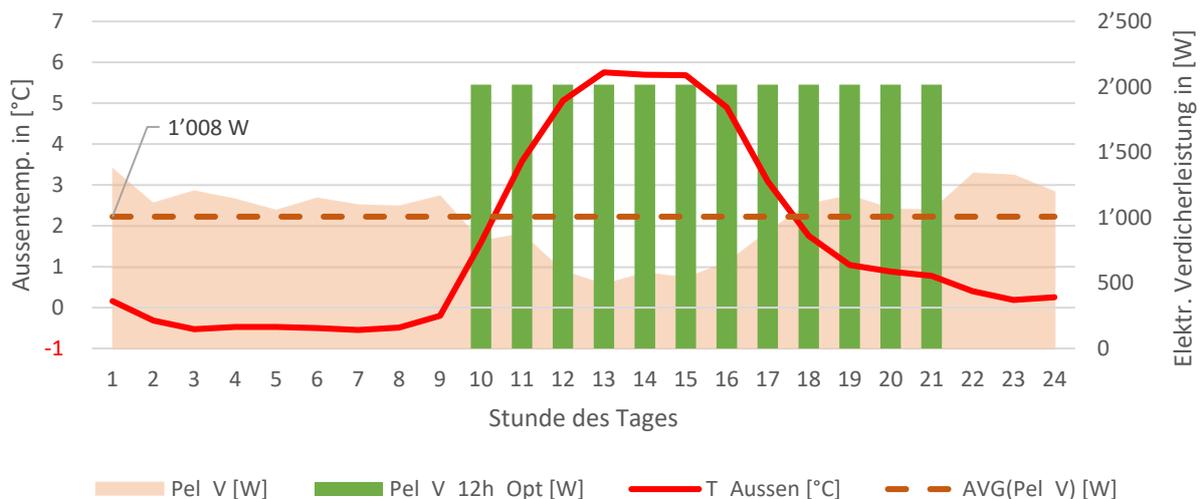


Abbildung 26: Stunden Mittelwerte der Leistungsaufnahme des Kompressors der Anlage F001 im Januar 2022: Verschiebung des Wärmepumpenbetriebs zu zwölf Stunden mit hohen Quellentemperaturen im Vergleich zur Referenz aus den Messungen mit einer mittleren Leistung von 1008 W<sub>el</sub> bei einer mittleren Umgebungstemperatur von 1,6°C.

Anlage F001 soll beispielhaft zeigen, welches Effizienzpotential eine temperaturangepassten Betriebsweise bei LWWP-Anlagen aufweisen könnte. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass

- die Gebäudemasse die Wärme für den entsprechenden Zeitbereich ohne merkbaren Komfortverlust speichern kann (hier z.B. 12 Stunden),
- die tägliche Wärmepumpenlaufzeit die «Verschiebezeit» (hier 12 Stunden) nicht übersteigt, bzw. der benötigte Wärmeeintrag innerhalb der restlichen Betriebszeit erzeugt und abgegeben werden kann.

Während der Heizsaison 2021/22 gab es z.B. bei Objekt 1 genau 15 Tage, an welchen die Wärmepumpe mehr als 12 Stunden gelaufen ist. An diesen 15 Tagen hätte diese Betriebszeit somit nicht gereicht. Die durchschnittliche Laufzeit in der Winterperiode (1. Dezember 2021 bis 28. Februar 2022, sind 90 Tage) betrug 9.2 Stunden pro Tag. Der Maximalwerte wurde am 31. Dezember 2021 mit 18.7 Stunden, der Minimalwert wurde am 3. Januar (somit nur 3 Tage später) mit 0.6 Stunden Wärmepumpenbetriebszeit gemessen.

### 3.2 Heatmaps ausgewählter Grössen und Zeitbereiche

Bei der Analyse der Wärmepumpenbetriebsweise oder eines Nutzerverhaltens über den Tagesverlauf können sogenannte Heatmaps hilfreich sein. Dabei wird auf der x-Achse die Tageszeit (hier die Stunden eines Tages von 0 bis 24 Uhr), auf der y-Achse die Tage einer festgelegten Periode dargestellt. Der Farbwert des entsprechenden Rechteckes gibt den Betrag der physikalischen Grösse wieder. Hier wurden im Wesentlichen drei Zeiträume ausgewertet:

- Heizsaison 2021/22 (1.9.2021 bis 31.8.2022): Diese bildet das gesamte Betriebsjahr ab
- Jänner 2022 (1.1.2022 bis 31.1.2022): Bildet häufig den kältesten Heizmonat ab. Dieser eignet sich für die Analyse des WP-Einsatzes im Heiz- und Aufladebetrieb.
- Juni 2022 (1.6.2022 bis 30.6.2022): Bildet einen Sommerbetrieb ab. Dieser eignet sich zur Analyse eines reinen Aufladebetriebs sowie entsprechend eingestellter Heizgrenze und Kühlfunktionalität zur Analyse des Heiz- und/oder Kühlbetriebes.

Während der Sommerzeitperiode wurde der Zeitstempel auf Sommerzeit (MESZ) umgerechnet, um die Abläufe zeitrichtig darstellen zu können. Anhand einiger Beispielen sollen nun mögliche Analysen mithilfe von Heatmap-Darstellungen vorgestellt werden.

### 3.2.1 Auflade-Verlauf

Als erstes Beispiel werden zwei mit Inverter ausgestattete Luft/Wasser-Wärmepumpen bezüglich der Aufladung verglichen. Abbildung 27 zeigt die thermischen Aufladeleistungen (Pth\_WP\_AL) von Objekt 15 über die gesamte Heizsaison 2021/22. Man erkennt, dass sich die Aufladungen vor allem auf die Mittagszeit konzentrieren: 88% der thermischen Auflade-Energie wurden im Zeitfenster 12 bis 15 Uhr erbracht.

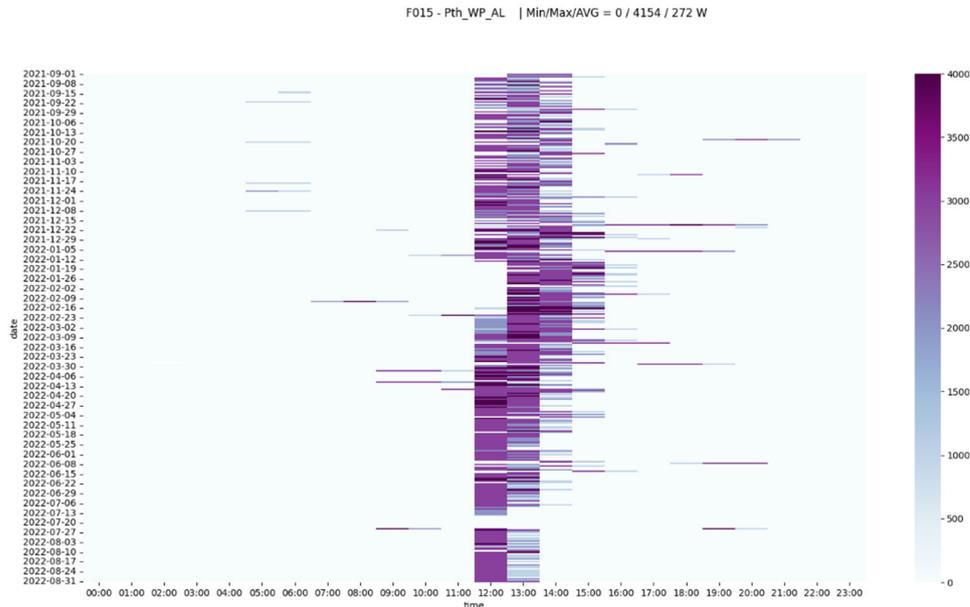


Abbildung 27: Bei Anlage F015 erfolgt die Aufladung vor allem über Mittag im Zeitbereich von 12 bis 15 Uhr. Hier werden 88% der thermischen Aufladeenergie erbracht.

Die Grafen in Abbildung 28 zeigen für mehrere Grössen die über der Heizperiode 2021/22 gemittelten Stundenwerte. Die Legende weist auch den Tagesmittelwert über den entsprechenden Analysezeitraum aus.

Anhand des Grafen «thermische Aufladeleistung (Pth\_WP\_AL)» wird zum Beispiel ersichtlich, dass die Aufladungen durch die Wärmepumpe mehrheitlich dann stattfinden, wenn die Aussenlufttemperatur (T\_Aussen\_17) bzw. die Quelltemperatur der Wärmepumpe nahe bei ihrem täglichen Höchstwert liegt. Im gewählten Zeitbereich 12 bis 15 Uhr liegt die mittlere Aussentemperatur bei 15.7°C. Um die maximal mögliche Quelltemperatur von hier 17.2°C zu erhalten, müsste die Aufladung idealerweise noch zwei Stunden später stattfinden, da die höchste, mittlere Aussentemperatur im Zeitfenster 14 bis 17 Uhr auftritt. (Anmerkung: Hier bitte die Sommerzeit-Verschiebung beachten. Im Jänner ist das ideale Zeitfenster zwischen 12 und 14 Uhr (MEZ), im Juni erreichen wir die höchsten Umgebungstemperaturen zwischen 14 und 17 Uhr (MESZ). Eine Stunde Verschiebung kommt bereits von der Umstellung der Uhrzeit auf «Sommerzeit MESZ». Eine weitere Verschiebung erfolgt aufgrund der thermischen Trägheit, welche die Tageshöchsttemperaturen im Sommer abhängig von der Sonneneinstrahlung und der Saison nach «hinten schiebt». Dieser Effekt ist im Juli und August meist ausgeprägter als im hier ausgewerteten Juni<sup>4</sup>).

<sup>4</sup> Weitere Infos z.B. unter <https://www.srf.ch/meteo/meteo-stories/wetterwissen-die-hoechste-temperatur-gibt-es-meist-erst-gegen-abend>

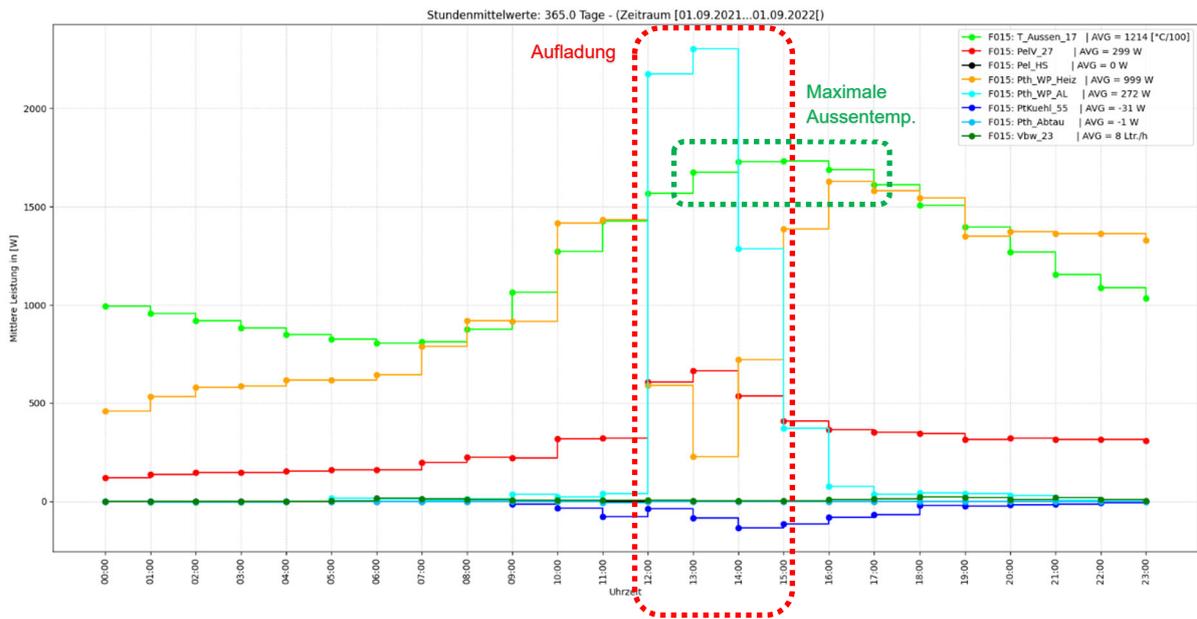


Abbildung 28: Aufladung bei der Anlage F015 bei hohen Aussentlufttemperaturen

Eine analoge Darstellung für Objekt 11 ist in Abbildung 29 und Abbildung 30 ersichtlich. Hier findet die Aufladung (Pth\_WP\_AL) häufig im Zeitfenster 7 bis 8 Uhr statt. Auf dieses Zeitfenster fallen 48% der thermischen Aufladeenergie, welche somit bei einer jahresdurchschnittlichen Aussentemperatur (T\_Aussen\_17) von 10.0 °C erfolgt. Dies entspricht nahezu dem Zeitpunkt mit der tiefsten Aussentemperatur. Die höchste Aussentemperatur lag bei Objekt 11 in der Heizsaison 2021/22 bei 16.6 °C und trat zwischen 15 und 16 Uhr auf.

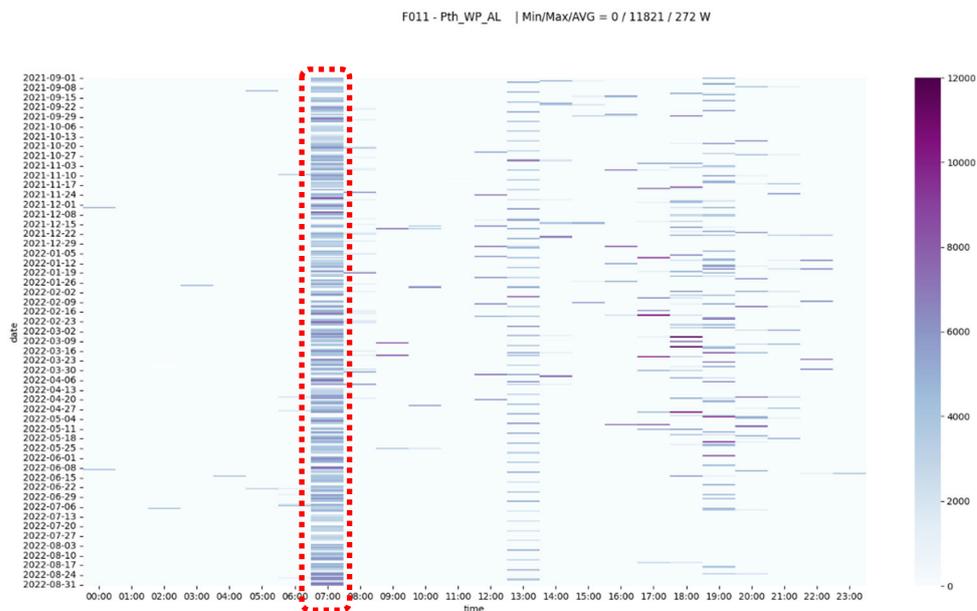


Abbildung 29: Heatmap der Aufladeleistung Pth\_WP\_AL der Anlage 11. Die Aufladung erfolgt vorwiegend im Zeitfenster 7 bis 8 Uhr.

Durch Verschiebung der Aufladung zu Zeiten mit höheren Aussenlufttemperaturen könnte die Gesamteffizienz der Anlage verbessert werden, falls dadurch keine Komforteinbussen aufgrund von zu tiefen Zapftemperaturen bewirkt wird.

Die elektrische Verdichterleistung «PeIV\_27» ist aufgrund einer aktiven EW-Sperre im Zeitfenster 11 bis 12 Uhr nahezu null<sup>5</sup>.

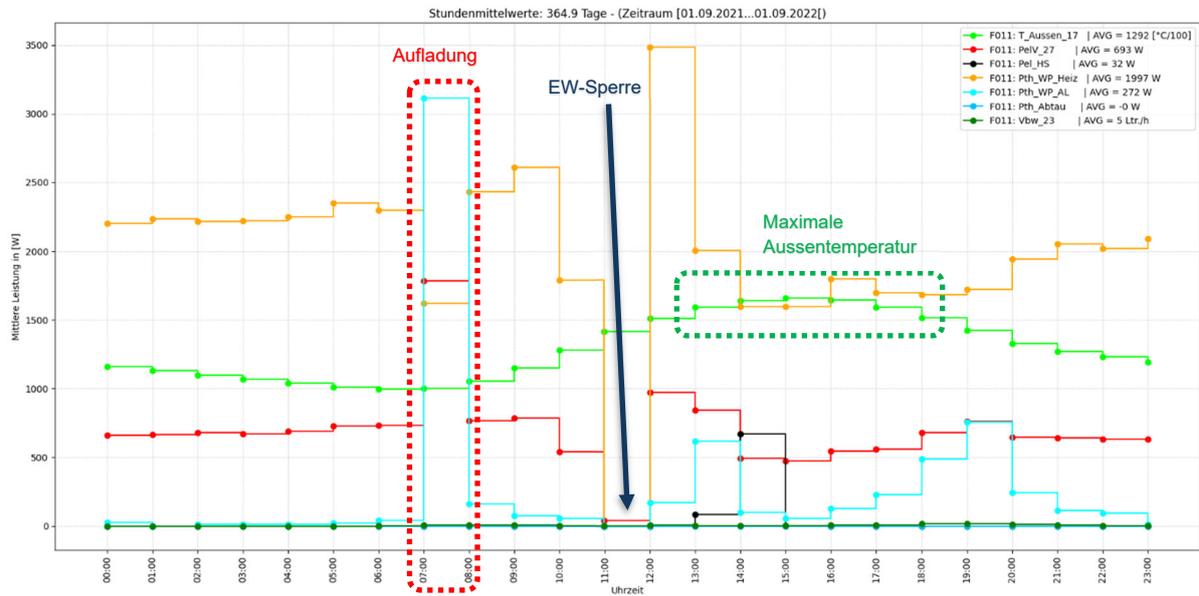


Abbildung 30: Aufladung bei Anlage F011 erfolgt überwiegend zwischen 7 und 8 Uhr bei tiefen Aussenlufttemperaturen. Die höchsten Aussenlufttemperaturen werden bei Objekt 11 zwischen 15 und 16 Uhr gemessen. Im Zeitfenster 11 bis 12 Uhr ist eine EW-Sperre aktiv.

<sup>5</sup> Da die EW-Sperre im Gegensatz zum Messsystem nicht Sekundengenau wirkt, ist der Mittelwert nicht exakt null.

### 3.2.2 Heizstab-Einsatz

Wie regelmässig oder wie häufig ein Heizstab eingesetzt wurde, kann mithilfe einer Heatmap dargestellt werden.

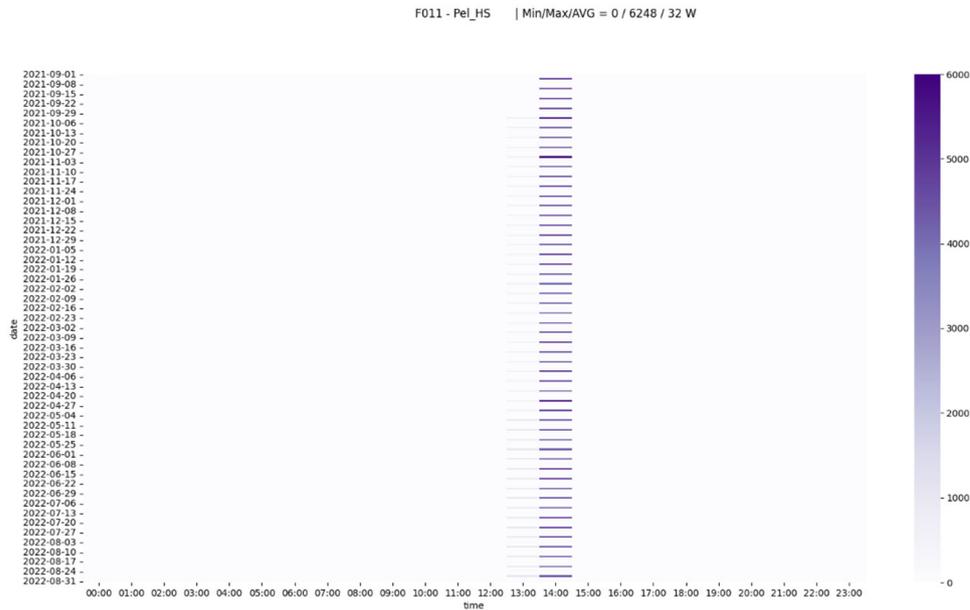


Abbildung 31 zeigt für alle Tage der Heizsaison 2021/22 die elektrische Leistungsaufnahme des Heizstabes (PeL\_HS) im TWW-Speicher. Der Heizstab wird in diesem Fall jeden Samstag um ca. 14 Uhr von der Legionellenschaltung zur thermischen Desinfektion des Trinkwarmwassers aktiviert.

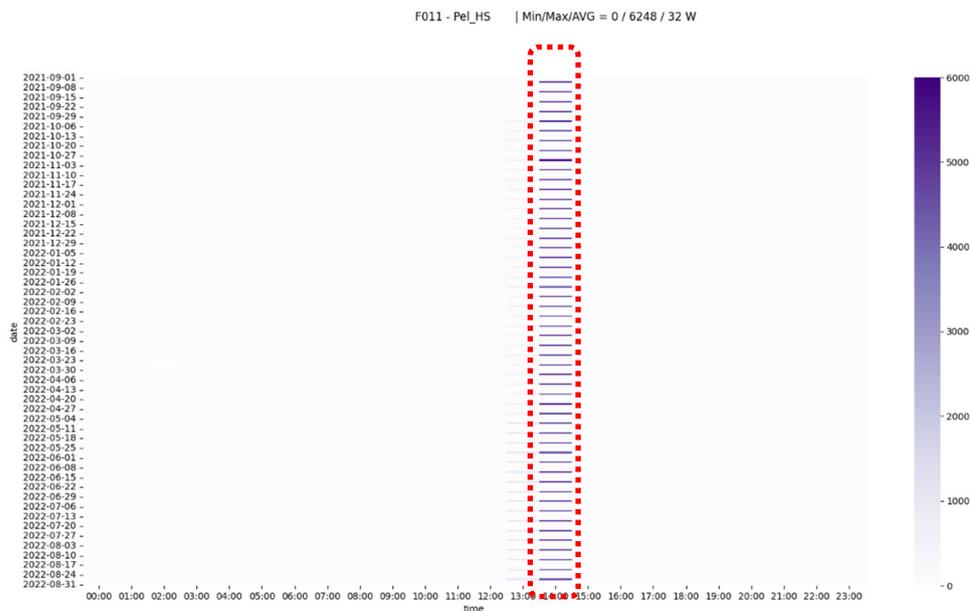


Abbildung 31: Wöchentliche Legionellenschaltung mit dem Heizstab des TWW-Speichers bei Objekt 11 über die Heizsaison 2021/22. Die Schaltung erfolgt jeden Samstag um ca. 14 Uhr.

Die Heatmap der «thermischen Aufladeleistung (Pth\_WP\_AL)» in Abbildung 32 zeigt, dass der TWW-Speicher mithilfe der Wärmepumpe von 13 bis 14 Uhr energieeffizient vorerwärmt wird, bevor die Legionellenschaltung mit dem Heizstab erfolgt.

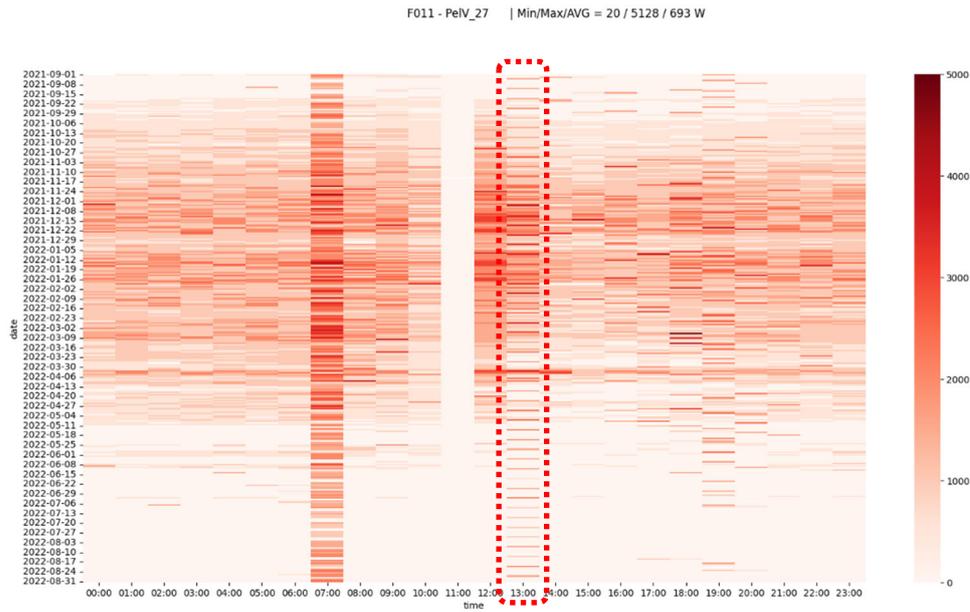


Abbildung 32: Elektrische Verdichterleistung von Objekt 11 in der Heizsaison 2021/22. Von 13 bis 14 Uhr erfolgt wöchentlich eine Aufladung mithilfe des Verdichters, vor Aktivierung des Heizstabes für die wöchentliche Legionellenschaltung. Dies dient der effizienten Vorwärmung des TWW-Speichers.

Die Vorwärmung mithilfe der Wärmepumpe erkennt man leichter, wenn man den Zeitbereich auf Juni 2022 einschränkt. Hier erkennt man, dass die Wärmepumpe jeden Samstag um 13 Uhr mit einer «eigenen» Aufladung startet (hier 4., 11., 18. und 25. Juni in Abbildung 33). Direkt darauf erfolgt dann um 14 Uhr die Legionellenschaltung mithilfe des Heizstabes, wie in Abbildung 34 gut zu erkennen ist.

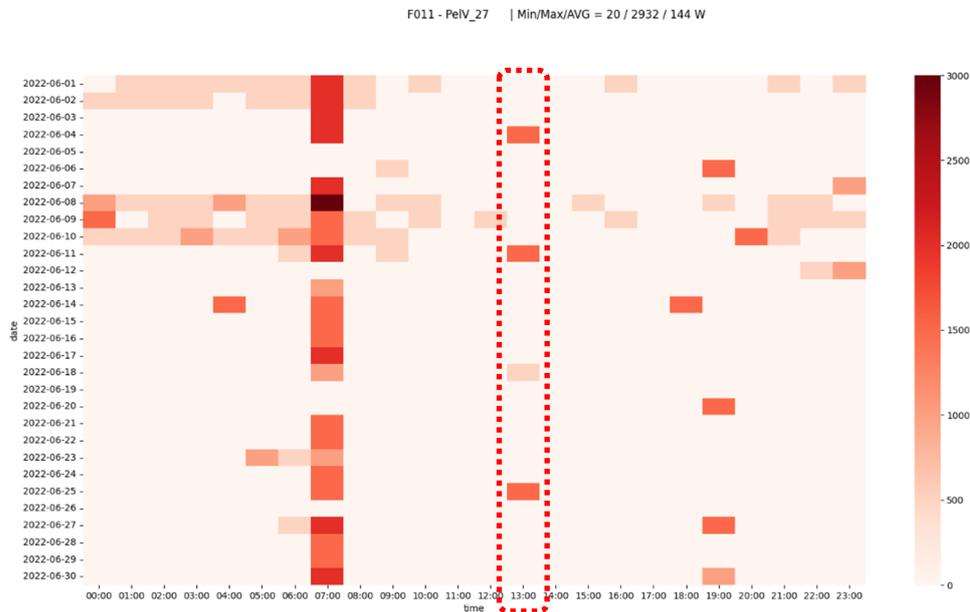


Abbildung 33: Detailbetrachtung - elektrische Verdichterleistung von Objekt 11 im Juni 2022. Von 13 bis 14 Uhr erfolgt jede Woche eine Aufladung mithilfe des Verdichters, vor Aktivierung des Heizstabes für die wöchentliche Legionellenschaltung.

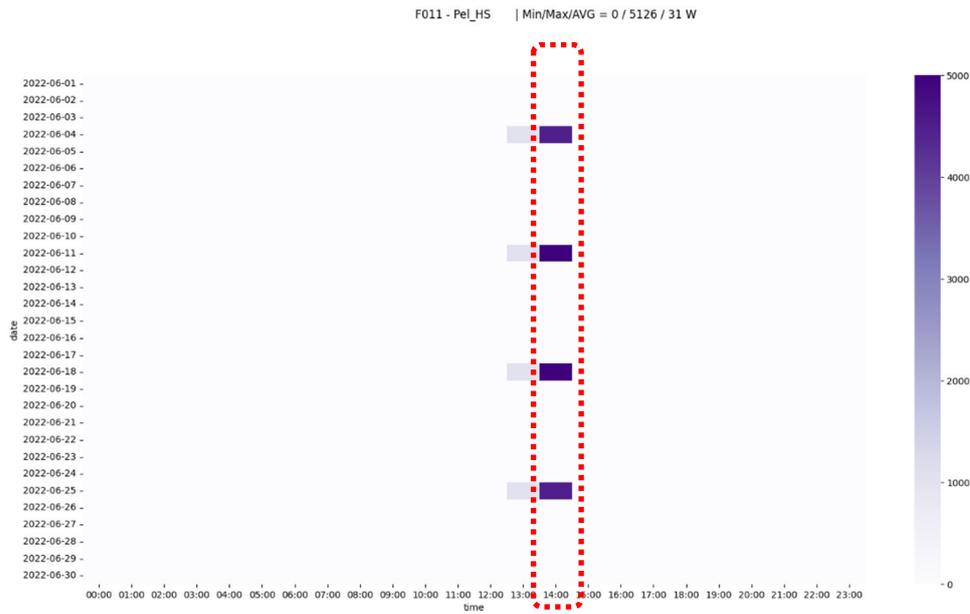


Abbildung 34: Detailbetrachtung - elektrische Heizstabeleistung von Objekt 11 im Juni 2022. Die wöchentliche Legionellenschaltung mithilfe des Heizstabes erfolgt im Zeitfenster 14 bis 15 Uhr.

Unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen bei Heizstab-Einsätzen sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 ersichtlich. Während der Heizstab bei Anlage 3 sehr selten in Betrieb ist, wird er bei Anlage 25 über die gesamte Heizsaison sehr häufig eingesetzt. Bei Objekt 25 erfolgt eine Eigenverbrauchsoptimierung der PV-Anlage mithilfe des Heizstabes (und nicht mithilfe der Wärmepumpe). Entsprechend reduziert sich die Gesamt-Effizienz der Aufladung (WNG\_Aufladung) auf 1.62. Würde die Aufladung ohne Heizstab nur mithilfe der Wärmepumpe erfolgen, könnte die Auflade Effizienz bei Objekt 25 auf nahezu 2.65 steigen, entsprechend dem Kennwert JAZ+ \_Aufladung. Der Kennwert JAZ+ \_Aufladung berücksichtigt den elektrischen Bedarf des TWW-Heizstabes und der Senkenpumpe nicht.

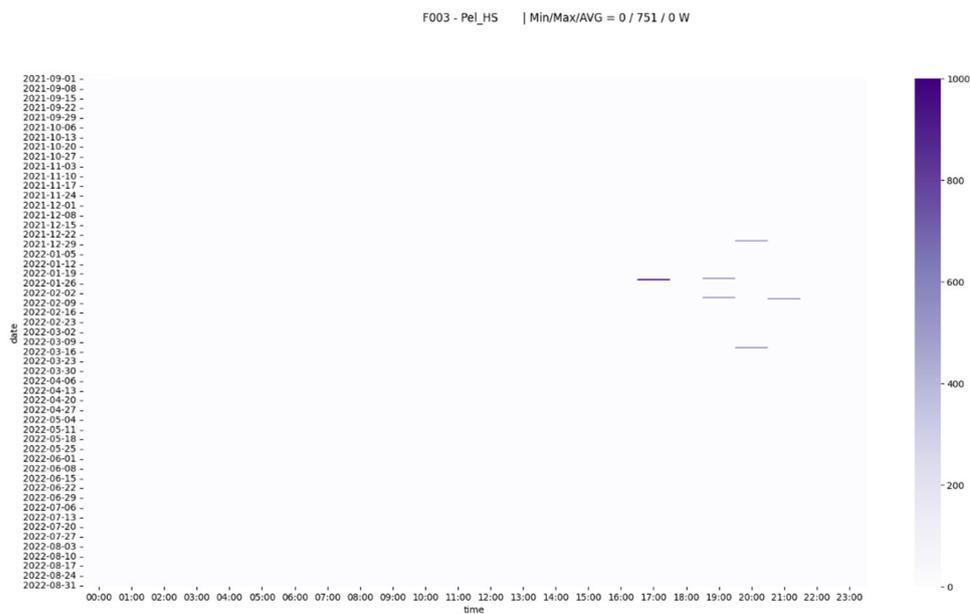


Abbildung 35: Elektrische Leistungsaufnahme des Heizstabes im TWW-Speicher zum Objekt 3 in der Heizsaison 2021/22.

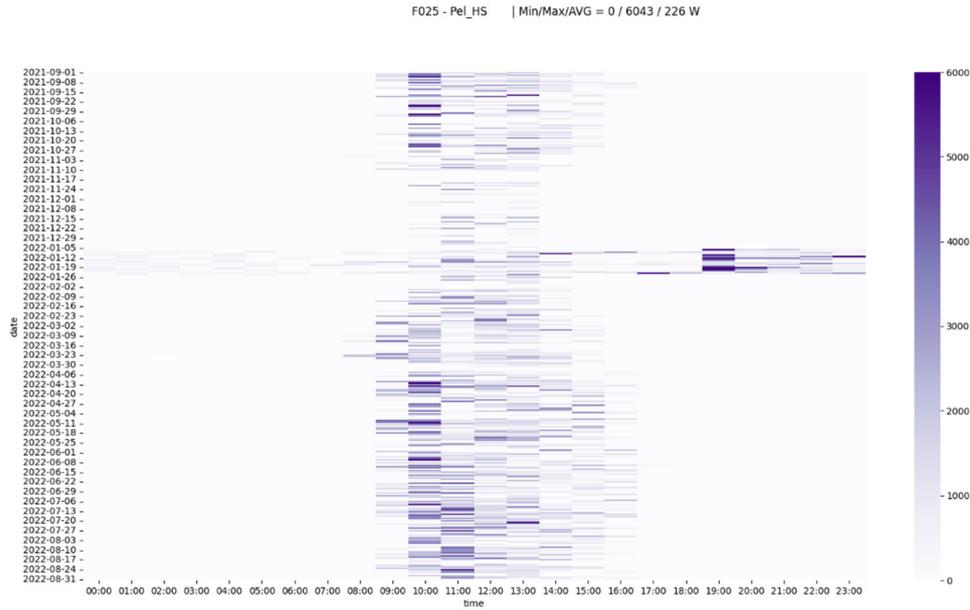


Abbildung 36: Elektrische Leistungsaufnahme des Heizstabes im TWW-Speicher von Objekt 25 in der Heizsaison 2021/22.

### 3.2.3 EW-Sperre

Abbildung 37 zeigt die elektrische Verdichterleistung (PelV\_27) von Objekt 2 über die gesamte Heizsaison 2021/22 als Heatmap. Hier ist gut zu erkennen, dass über die gesamte Heizperiode der Verdichter von 11 Uhr bis 12 Uhr keine elektrische Leistung bezieht, da hier eine EW-Sperre aktiv ist (auch am Wochenende und an Feiertage). Das Erkennen von Sperrzeiten kann hilfreich sein, da EW-Sperren einschränkend auf eine PV-Eigenverbrauchsoptimierung oder Quellentemperatur-Maximierung wirken können.

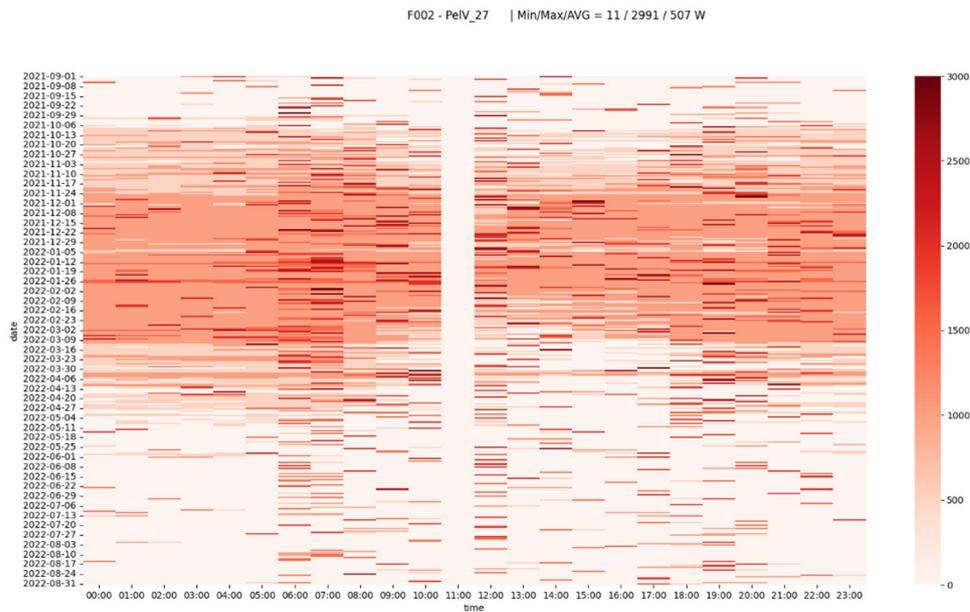


Abbildung 37: Elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters (PelV\_27) von Anlage 2 während der gesamten Heizsaison HS 2021/22 über die Uhrzeit

### 3.2.4 Laufzeitvergleich zweier drehzalgeregelten Luft/Wasser Wärmepumpen (Inverter-WP)

Abbildung 38 stellt die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters von Anlage 23 im Januar 2022 dar. Die drehzalgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpe weist im Januar 2022 genau 3 Starts bei einer Laufzeit von 739.7 h auf (entspricht 99.4% der 744 Stunden des Januar). Die relativ gleichmässige Farbverteilung der Heatmap lässt diese lange Laufzeit bereits erkennen.

Zum Vergleich wird in Abbildung 39 die elektrische Verdichterleistung in 10-Sekunden Auflösung als Graf dargestellt. Gut zu erkennen ist hier, dass der Regelbereich des elektrischen Verdichters überwiegend im Bereich zwischen 500 W und 4'200 W liegt. Die Minimalleistung von 500 W wird bei der Abtauung erreicht, was in Abbildung 38 gut erkennbar ist.

F023 - PeIV\_27 | Min/Max/AVG = 8 / 4250 / 2228 W

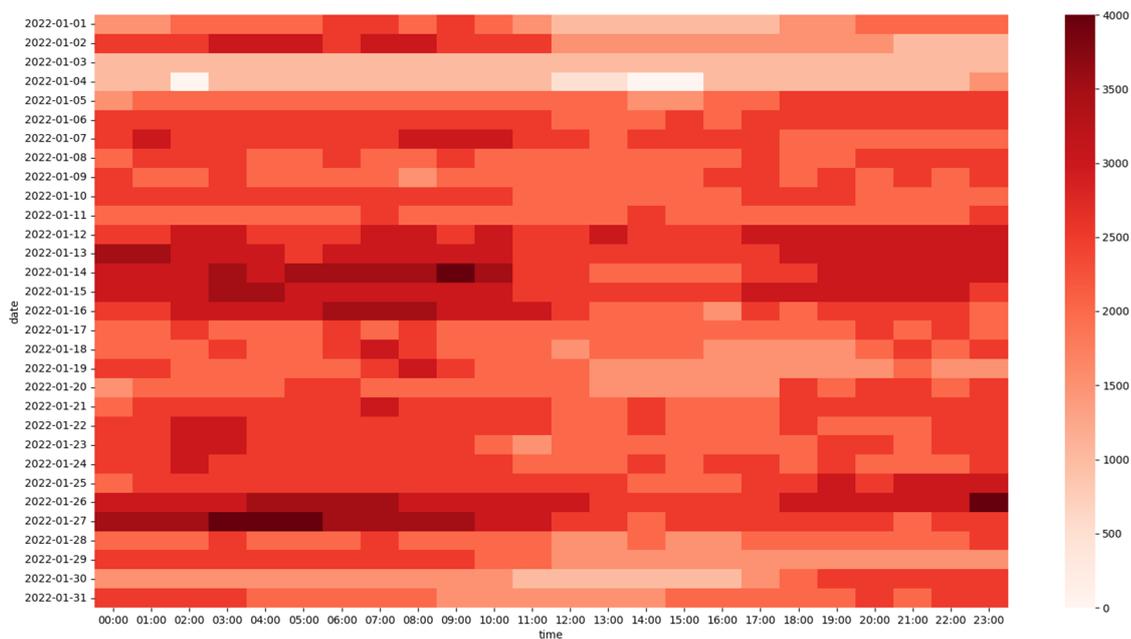


Abbildung 38: Vom Verdichter der Anlage 23 aufgenommene Leistung zum Januar 2022. Die gleichmässige Einfärbung der Felder weist auf lange WP-Laufzeiten hin.

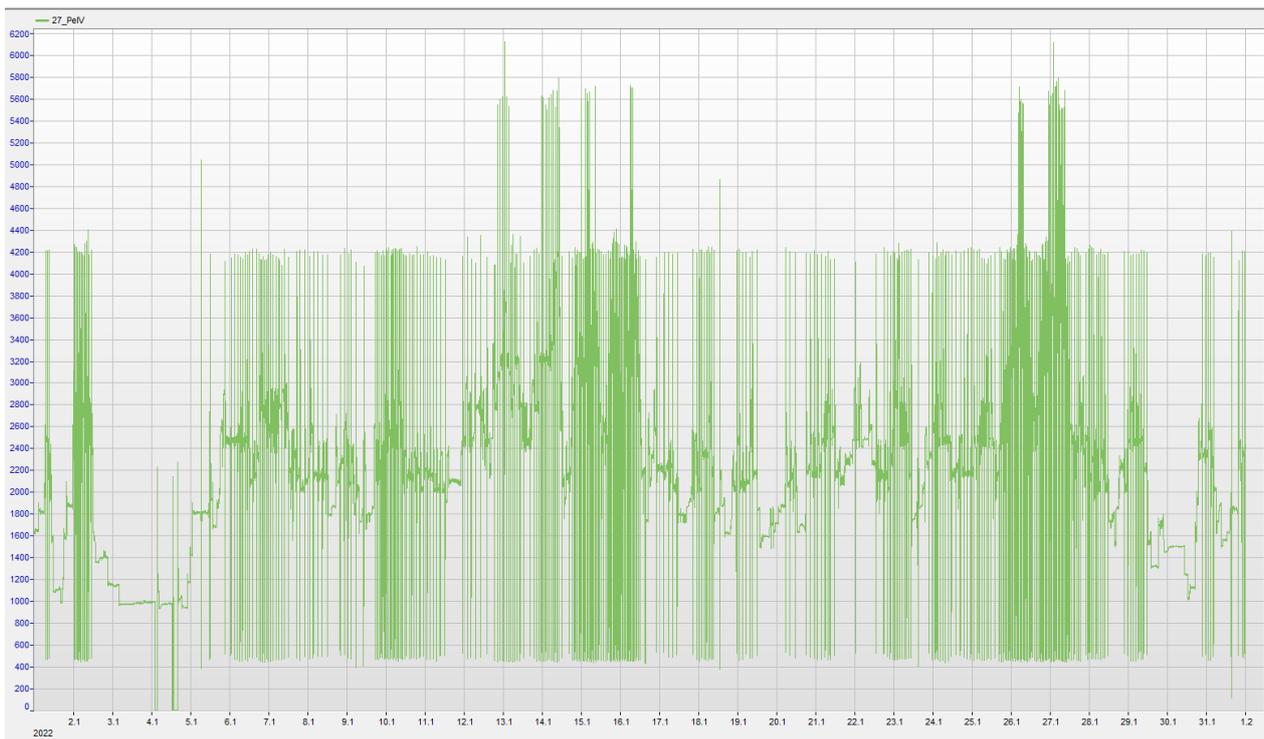


Abbildung 39: Zeitliche Verlauf der elektrischen Verdichterleistung (27\_PelV) in 10 Sekunden Auflösung. Dargestellt ist der gesamte Januar 2022 des Objektes 23. Anhand des Leistungsverlaufes ist die hohe Laufzeit und der überwiegende Leistungsbereich von 500 W (bei Abtauung) bis 4'200 W ersichtlich.

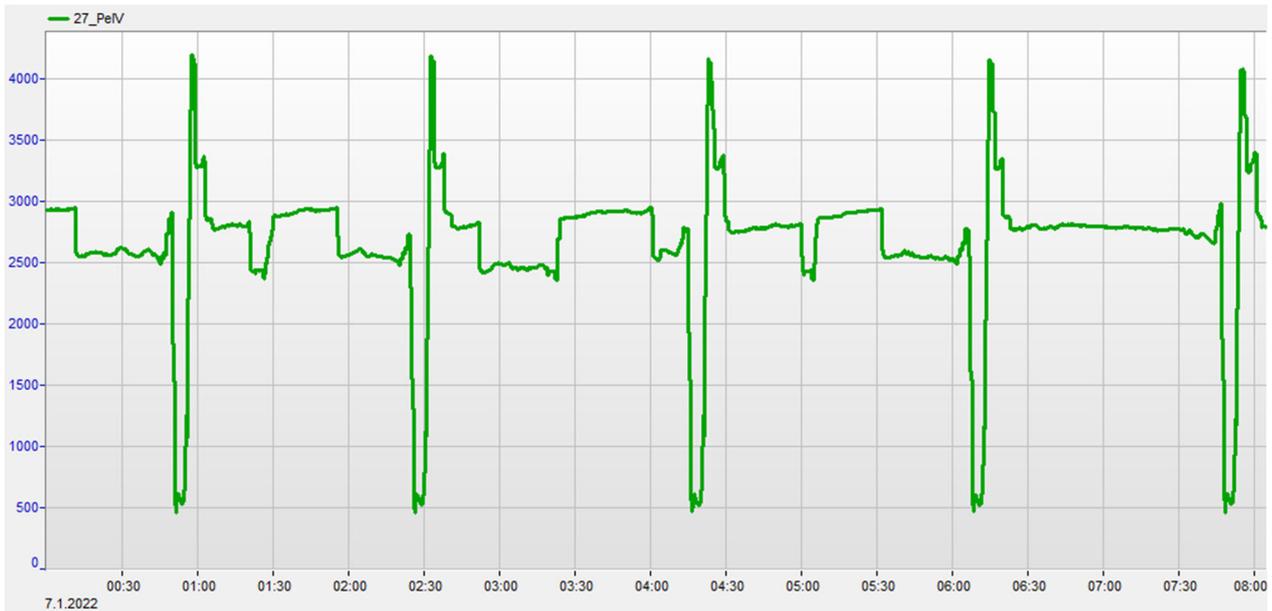


Abbildung 40: Wird die elektrische Verdichterleistung «27\_PelV» von Objekt 23 hochaufgelöst dargestellt, werden die Abtauungen gut sichtbar. In dieser Zeit reduziert sich die Verdichterleistung auf ca. 500 W.

Abbildung 41 stellt die Leistungsaufnahme der ebenfalls drehzahlregelten Luft/Wasser-Wärmepumpe von Objekt 24 im Januar 2022 dar. Der häufige Wechsel zwischen roten und weissen Feldern lässt auf viele Ein/Aus-Zyklen und entsprechend kurzen Verdichter-Laufzeiten schliessen. Die Wärmepumpe weist im Januar 2021 auch 408 Starts bei einer Gesamtlaufzeit von 452.3 Stunden auf. Dies entspricht einem Laufzeitanteil von 60.7 % und durchschnittlich 13.2 Wärmepumpenstarts pro Tag. Die mittlere Verdichter-Laufzeit liegt bei 1.1 Stunden pro Start. Die dunkle Einfärbung des Zeitbereiches 13 Uhr bis 14 Uhr zeigt die Aufladung, welche eine höhere Verdichterleistung aufweist und überwiegend um diese Zeit erfolgt.

Abbildung 42 zeigt wieder den exakten zeitlichen Verlauf der elektrischen Verdichterleistung in der gespeicherten 10-Sekunden Auflösung, hier im Zeitbereich vom 3. Januar bis zum 6. Januar. Hier sind relativ kurzen Laufzeiten der Wärmepumpe sowie die Aufladungen, welche höhere Verdichterleistung aufweisen, ebenfalls gut erkennbar.

F024 - PelV\_27 | Min/Max/AVG = 27 / 2151 / 873 W

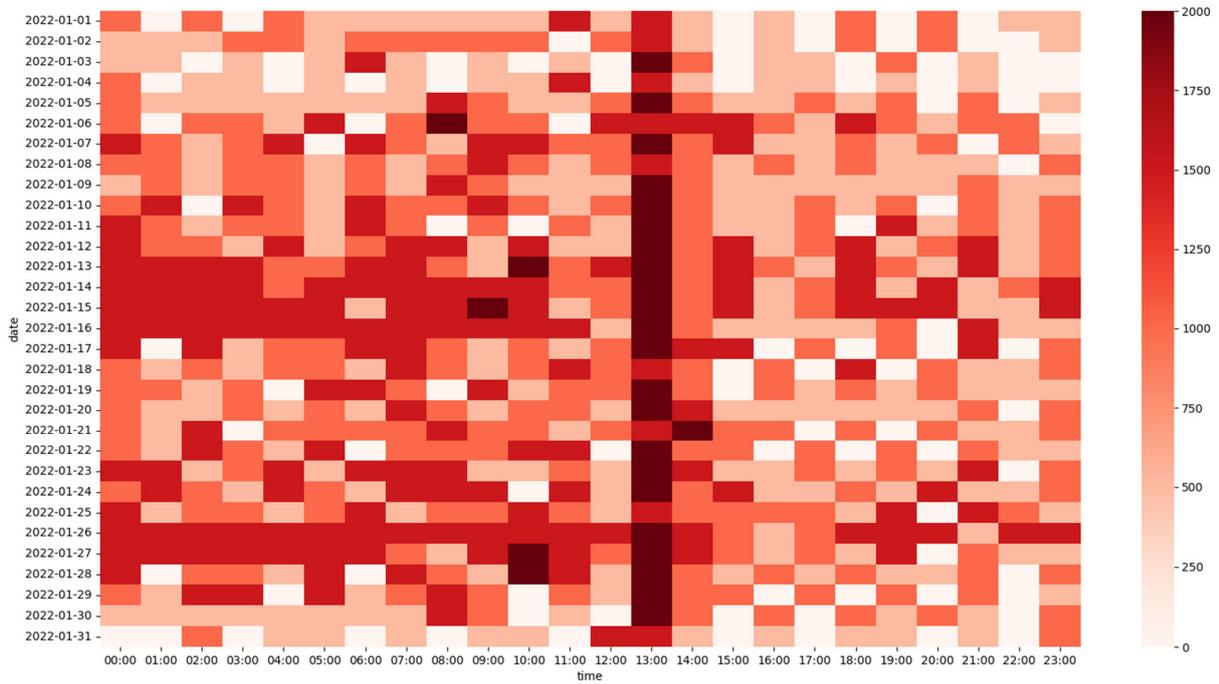


Abbildung 41: Vom Verdichter der Anlage 24 aufgenommene Leistung zum Januar 2022.

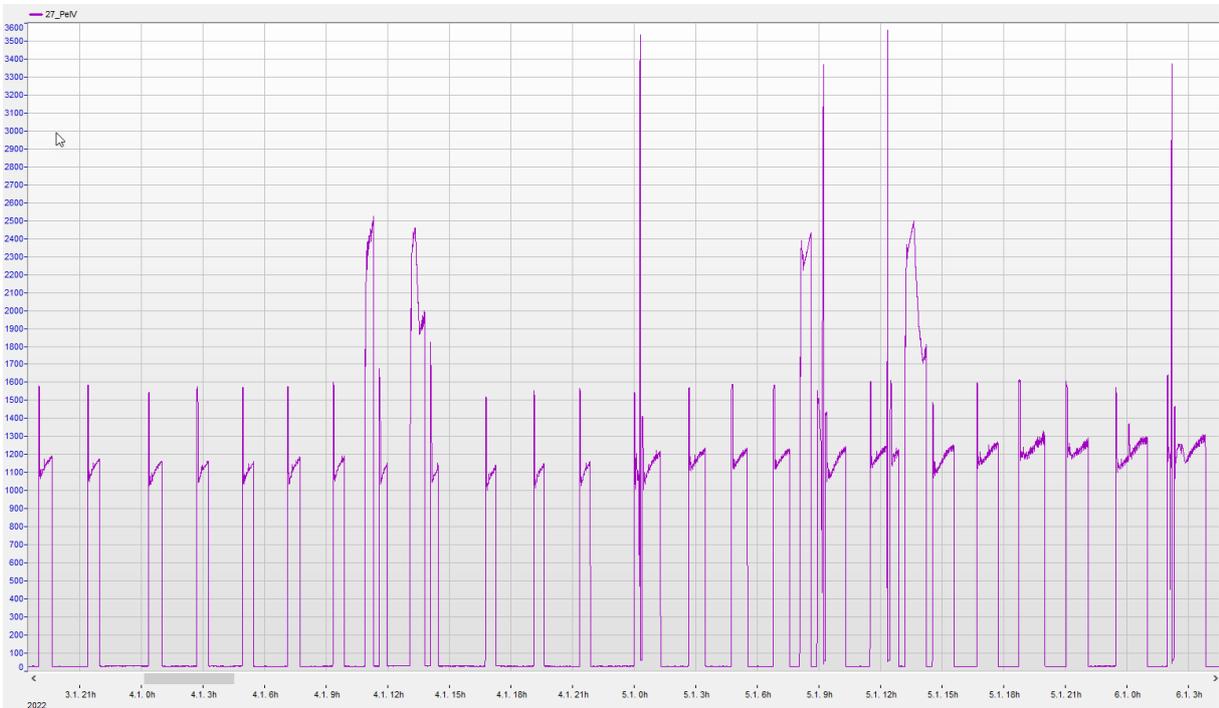


Abbildung 42: Zeitliche Verlauf der elektrischen Verdichterleistung (27\_PeV) in 10 Sekunden Auflösung. Dargestellt ist der Zeitbereich vom 3. Januar bis zum 6. Januar des Objektes 24. Beim WP-Start treten kurzfristig Leistungsspitzen auf. Ein Regelbereich ist kaum zu erkennen.

### 3.3 Inverter-Wärmepumpen

#### 3.3.1 Vergleich von On/Off- und Inverter-Wärmepumpen

In diesem Kapitel werden drehzahlgeregelte Inverter-Wärmepumpen analysiert und On/Off-Wärmepumpen gegenübergestellt. Besondere Themengebiete sind dabei der Standby-Verbrauch und die Dimensionierung bzw. Taktung.

Inverter-Wärmepumpen können die Verdichter Drehzahl in einem weiten Bereich regeln und damit die Wärmeleistung dem Bedarf der Gebäudeheizung oder der TWW-Aufbereitung anpassen. Vor allem durch die geringeren Temperaturabstände in den Wärmetauschern laufen Inverter-Wärmepumpe im Teillastbetrieb effizienter, als taktende On/Off-Wärmepumpe mit vergleichbarer Vollastleistung, trotz zusätzlicher Inverter-Verluste.

Bei Inverter-Wärmepumpen liegen die Kältemitteltemperaturen in Teillast näher bei der Quellen- und der Senken Temperatur, was das Druckverhältnis und somit die Leistungsaufnahme des Kompressors senkt. Durch den kontinuierlichen Betrieb, bzw. die längeren Laufzeiten, können sich als weitere Vorteile mehr Komfort aufgrund einer Wärmeabgabe bei gleichmässigerer Temperatur, sowie eine erhöhte Verdichter-Lebensdauer aufgrund reduzierter Ein-/Ausschaltvorgänge ergeben. Im Idealfall laufen Inverter-Wärmepumpen über grosse Zeitbereiche kontinuierlich durch. Ein Takten tritt idealerweise erst bei wärmeren Aussentemperaturen auf, da Kompressoren eine Minimaldrehzahl aufweisen. Damit verbunden ist auch eine thermische Mindestleistung, welche abgegeben werden muss. In der Praxis werden Inverter-Wärmepumpen derzeit häufig überdimensioniert, wodurch ein kontinuierlicher Betrieb erst ab relativ tiefen Aussentemperaturen möglich ist.

Abbildung 43 zeigt die Kennwerte «JAZ\_Heizen» (welche dem Carnot-Wirkungsgrad im Heizbetrieb entsprechen) der Luft/Wasser-Wärmepumpen in Abhängigkeit des Temperaturhubes zwischen Quellen- und Senktemperatur. Die Auswertung zeigt sehr schön auf, dass der Carnot-Wirkungsgrad der drehzahlregulierten Luft/Wasser-Wärmepumpen über den gesamten Temperaturhub bei rund 40 % liegt.

On/Off Wärmepumpen weisen bei grossem Temperaturhub ähnliche Carnot-Wirkungsgrade auf. Je kleiner jedoch der Temperaturhub wird, umso geringer wird der Wirkungsgrad. Bei kleinen Temperaturhüben sinkt die Carnot-Effizienz auch unter 30 %. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass On/Off Wärmepumpen bei kleinem Temperaturhub deutlich häufiger takten als drehzahlregulierte Luft/Wasser-Wärmepumpe. Ein weiterer Grund ist die deutlich geringere Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern bei drehzahlregulierten Wärmepumpen im Teillastbereich. Die höhere Effizienz drehzahlregulierter Wärmepumpen gegenüber On/Off-Wärmepumpen ist vor allem bei kleinen Temperaturhüben (z.B. bei Fussbodenheizungen) im Teillastbetrieb in Abbildung 43 gut zu erkennen.

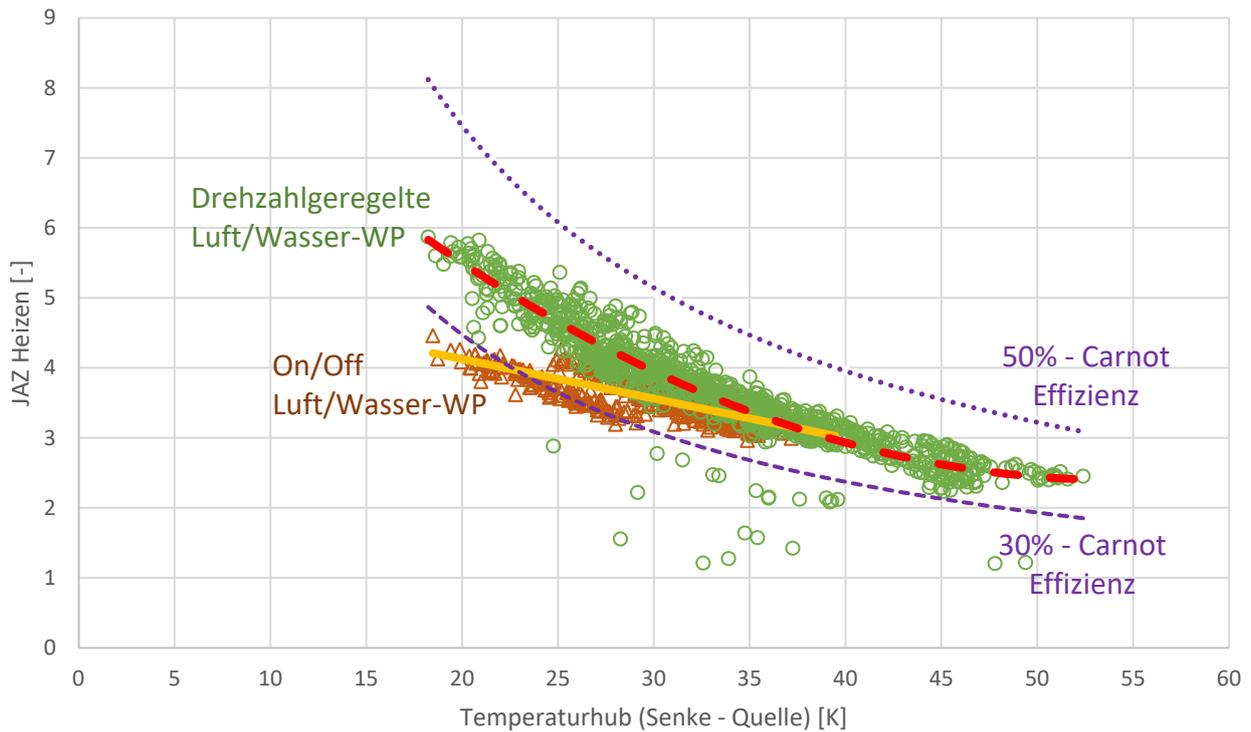


Abbildung 43: Vergleich drehzahlgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpen mit On/Off Luft/Wasser-Wärmepumpen

Die Messdaten der Heizsaison 2021/22 zeigen aber auch, dass das Potential der Inverter-Wärmepumpen nicht immer voll ausgeschöpft wird. Nicht alle Inverter-Wärmepumpen weisen eine deutlich längere Laufzeit pro Start auf, wie Abbildung 44 zeigt. Im Durchschnitt haben Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Invertern aber eine rund 4-mal höhere Laufzeit pro Start als On/Off-Geräte (2 Stunden pro Start vs. 0.5 Stunden pro Start). Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die mittlere Laufzeit von Inverter-Wärmepumpen sogar 9-mal höher als bei On/Off Geräten (6.5 Stunden pro Start vs. 0.7 Stunden pro Start).

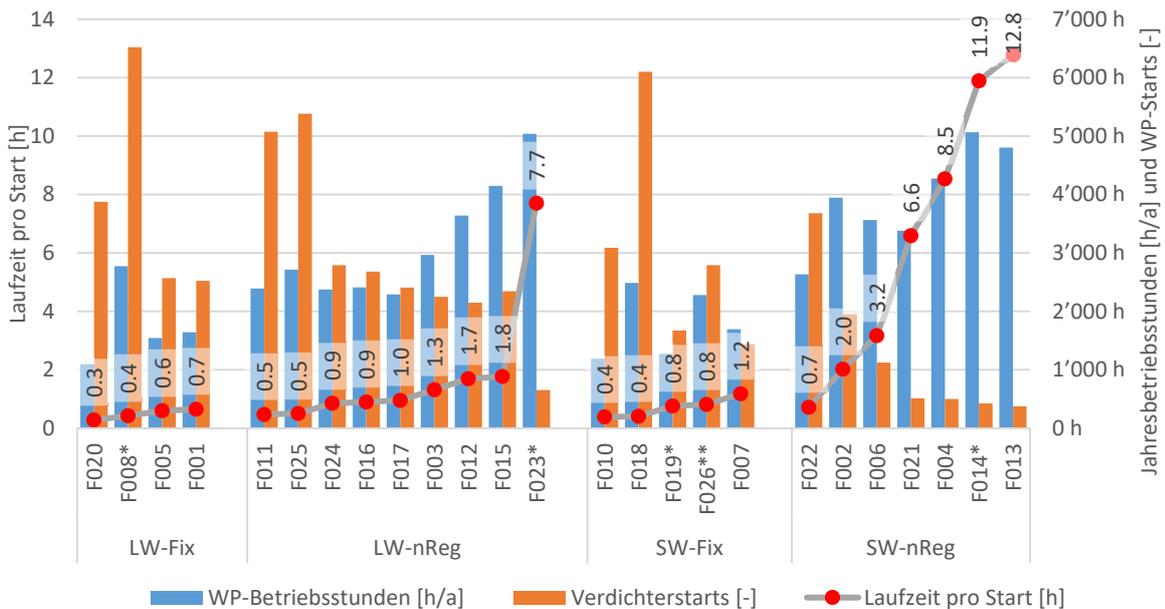


Abbildung 44: Wärmepumpenbetrieb, gruppiert nach Luft/Wasser (LW), Sole/Wasser (SW), Fixdrehzahl (Fix) und drehzahlgeregelte Inverter-Wärmepumpen (nReg).

\* Objekte mit separater Trinkwasser-Wärmepumpe

\*\*Zwei Wärmepumpen mit insgesamt vier parallelen Kompressoren.

Die jährlichen Verdichter-Laufzeiten unterscheiden sich teilweise erheblich. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen drehzahlgeregelte Inverter-Maschinen im Schnitt die 1.7-fachen Betriebsstunden gegenüber

On/Off-Geräten auf. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist der Unterschied noch grösser. Hier weisen die Inverter-Maschinen im Schnitt sogar die 2.2-fachen Betriebsstunden auf.

Bei Luft/Wasser- wie auch Sole/Wasser-Wärmepumpen gibt es je eine Inverter-Anlage, die in der Heizsaison 2021/22 mehr als 5'000 Betriebsstunden gelaufen ist. Die mittlere Laufzeit der entsprechenden LW-WP lag bei 7.7 Stunden pro Start, die der SW-WP bei 11.9 Stunden pro Start.

Auch bei optimaler Auslegung werden Inverter-Wärmepumpe von Sole/Wasser-Anlagen eine höhere durchschnittliche Laufzeit erreichen. Der «Leistungs-Regelbereich» hängt wesentlich von der Quellentemperatur ab, welche bei Luft/Wasser-Anlagen deutlich mehr variiert als bei Erdsonden-Anlagen.

Da z.B. die Anlage 23 über 5000 Betriebsstunden im Jahr aufweist, wird diese noch etwas genauer untersucht. In der folgenden Abbildung sind die monatlichen Betriebsstunden der Anlage 23 aufgezeigt. Diese Grafik zeigt schön auf, dass die Wärmepumpe nur bei den kälteren Monaten im Betrieb ist. Da die Wintermonate zwischen 720 und 744 Stunden aufweisen (ausser Februar 672 h), läuft die Wärmepumpe zwischen November und Februar praktisch durch. Die Anlage 23 ist ein schönes Beispiel, wie die Leistungsregelung optimal genutzt werden kann.

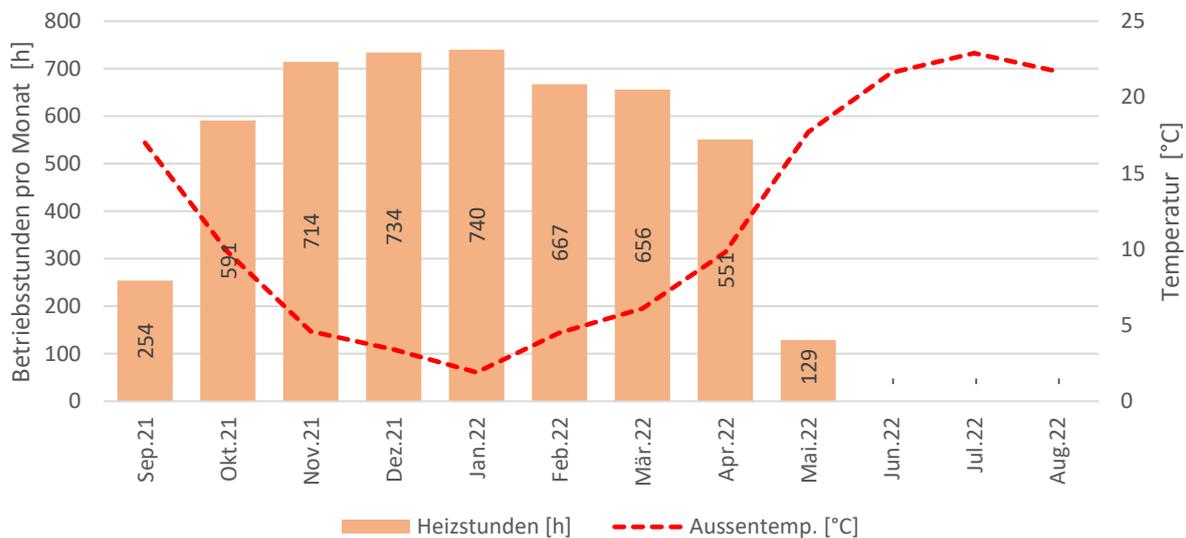


Abbildung 45: monatliche Betriebsstunden der Luft/Wasser-WP-Anlage F023.

Auf Basis der Messdaten können folgende allgemeinen Empfehlungen ausgesprochen werden:

- **Auslegung:** Inverter-Wärmepumpe sollten besonders gut an den Wärmebedarf des Gebäudes angepasste werden. Eine Überdimensionierung führt dazu, dass der Regelbereich aufgrund der WP-Minimalleistung eingeschränkt wird. Ein kontinuierlicher Betrieb ist dann erst ab relativ tiefen Aussentemperaturen möglich, damit die WP-Minimalleistung unvermindert an das Gebäude abgegeben werden kann. Ist der Heizwärmebedarf geringer, muss die Wärmepumpe ebenfalls in einen Taktbetrieb übergehen. Entsprechend sind die Vorteile gegenüber einer taktenden On/Off Maschine in diesen Zeitbereichen nicht mehr gegeben.
- **Inbetriebnahme:** Eine gute und solide Inbetriebnahme ist bei Inverter-Wärmepumpen besonders wichtig. Software-Parameter, wie z.B. Heizkurve, Heizgrenze, Legionellschaltung, etc. müssen bestimmt und korrekt eingestellt werden.
- **Hersteller:** Auch hier gibt es Potential, um die Effizienz der Inverter-Wärmepumpen zu steigern. Einige Inverter weisen hohe Standby-Verluste auf. In Kombination mit langen Stillstandszeiten führt dies zu hohen Verlusten. Bei der Warmwasseraufbereitung sollte auf tiefen Kompressordrehzahlen geachtet werden, da diese zu geringeren Temperaturabständen im Warmwasserregister führen und somit den COP erhöhen. In vielen Fällen wird die Aufladung mit einer konstant hohen Drehzahl durchgeführt. Hier dürfte vor allem eine kurze Aufladedauer und weniger die Effizienz im Vordergrund stehen.

### 3.3.2 Standby-Verluste bei Inverter Wärmepumpen im Vergleich zu On/Off-Wärmepumpen

Modulierende Wärmepumpen können mithilfe eines Inverters die Drehzahl des Verdichters variieren. Dadurch können sie die Wärmepumpenleistung in gewissen Leistungsgrenzen dynamisch an die benötigte Wärmeleistung anpassen. Dies unterscheidet sie von On/Off-Wärmepumpen, deren Verdichter Drehzahl konstant ist.

Ob die zusätzliche Elektronik die Standby-Verluste systembedingt erhöhen, soll hier untersucht werden. Generell versteht man unter Standby-Verluste jene Energiemenge, welche während des Wärmepumpenstillstandes anfällt. Hauptverursacher sind häufig die Steuerung, eine Ölumpfheizung und bei Inverter-Maschinen der Wechselrichter.

Diese Standby-Verluste fallen je nach Anlage sehr unterschiedlich hoch aus. Abbildung 46 zeigt die mittleren Standby-Leistungen sowie die resultierende Jahres-Standby-Verlustenergie. Gruppirt wurde entsprechend On/Off- oder drehzahlgeregelte Inverter-maschine. Sortiert wurde entsprechen fallender Standby-Leistung. Die höchsten Standby-Verluste weisen Inverter-Wärmepumpen auf. Einige Inverter-Wärmepumpen weisen aber auch vergleichsweise tiefe Standby-Verlusten auf. Dies weist darauf hin, dass hohe Standby-Verluste bei Invertermaschinen nicht systembedingt sind.

Die durchschnittliche Standby-Leistung bei den gemessenen On/Off-Maschinen liegt bei 12 W, der Mittelwert über die Inverter-Anlagen liegt bei 27 W und ist somit 2.3-mal höher. Die fünf Anlagen mit den höchsten Standby-Verlusten (alle mit drehzahlgeregeltem Verdichter) weisen durchschnittlich sogar 49 W auf.

Die elektrische Standby-Verlustenergie liegt je nach Objekt zwischen 0.5 % und 10 % des gesamten elektrischen Jahresbedarfs. Im Schnitt über alle Anlagen machen die Standby-Verluste gut 2 % des gesamten jährlichen elektrischen Energiebedarfs aus. Speziell bei einigen Inverter-Anlagen dürfte noch ein relativ hohes Verbesserungspotential bestehen, was ein Vergleich mit den "besten" Anlagen zeigt.

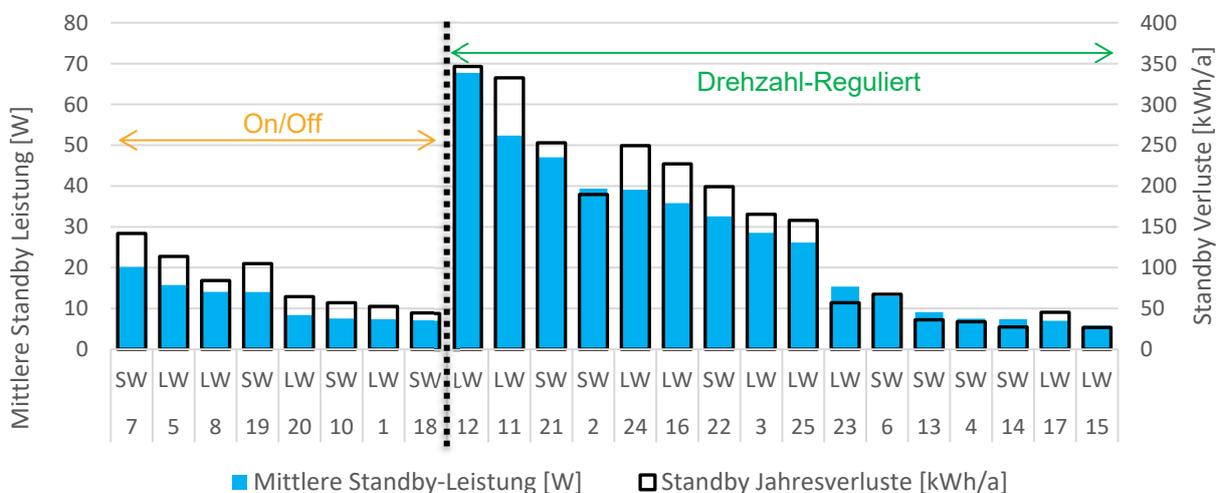


Abbildung 46: Vergleich der Standby-Verlusten aller WPs aus der Feldmessung. Gruppirt in On/Off- und Inverter-Wärmepumpen, sortiert nach jeweils fallender Standby-Leistung.

Qualitativ zeigt die Standby-Verlustenergie ein ähnliches Bild wie die Standby-Verlustleistungen. Die Verlustenergie hängt jedoch auch stark von der jeweiligen WP-Laufzeit, bzw. direkt von deren Pendant der Stillstandszeit ab. Die WP-Laufzeit hängt wiederum wesentlich von der WP-Auslegung (Dimensionierung der Heizleistung), vom tatsächlichen Nutzerverhalten (z.B. gewählter Raumtemperatur oder TWW-Bedarf) sowie der Hydraulik-Einbindung ab. Dies zeigt sich schön im Vergleich der Objekte 2 und 24, deren durchschnittliche Standby-Leistung nahezu ident ist. Die jährlichen Standby-Verluste von Objekt 24 sind aber um 29 % höher als die von Objekt 2. Geringere Standby-Leistungen müssen somit nicht zwingend mit geringeren Standby-Verlusten einhergehen.

### 3.4 TWW-Aufbereitung mit eigenen TW-Wärmepumpen

Derzeit sind vier Anlagen mit separaten Trinkwarmwasser-Wärmepumpen im Feld enthalten (Objekt 8, 14<sup>6</sup>, 19 und 23). Diese werden bezüglich Energie-Effizienz mit Luft/Wasser-Anlagen verglichen, welche für einen Heiz- und Aufladebetrieb ausgelegt sind. Vorteilhaft bei Trinkwarmwasser-Wärmepumpen ist der Entfall der Rohrleitungen zwischen TWW-Speicher und Wärmepumpe und den damit verbundenen Verlusten. Auch wird mit einer geringeren Leistung und somit geringerem Temperaturabstand in den Wärmetauschern geladen.

#### 3.4.1 Effizienz-Vergleich von Trinkwarmwasser-Wärmepumpen mit Luft/Wasser-Wärmepumpen

Die im Feld enthaltenen Trinkwarmwasser-Wärmepumpen (TWWP) der Objekte 8, 14\*, 19 und 23 verwenden Luft als Quellenmedium. Die thermische Aufladeenergie könnte bei TWWP nur mit einem Eingriff in den Kältekreis des Messobjekts ermittelt werden, was im Rahmen der Feldmessungen nicht gemacht wurde. Ohne die Auflade-Energie können der COP\_Aufladung und der Wärmenutzungsgrad (WNG\_Aufladung) nicht ermittelt werden. Somit kann hier nur der Systemnutzungsgrad für Trinkwarmwasser (SNG<sub>TWW</sub>) für einen Vergleich herangezogen werden. Der SNG<sub>TWW</sub> kann aber nur als Indikator dienen, da er auch vom Nutzerverhalten (TWW-Verbrauch) und nicht nur von der Effizienz der Wärmepumpe abhängt. Die Effizienz der Wärmepumpe wird stark durch die Kondensations- und Verdampfungstemperatur des Kältemittels beeinflusst, die ihrerseits von der Eintrittstemperatur der Quellenluft und der Temperatur des Trinkwarmwassers im Speicher abhängig sind.

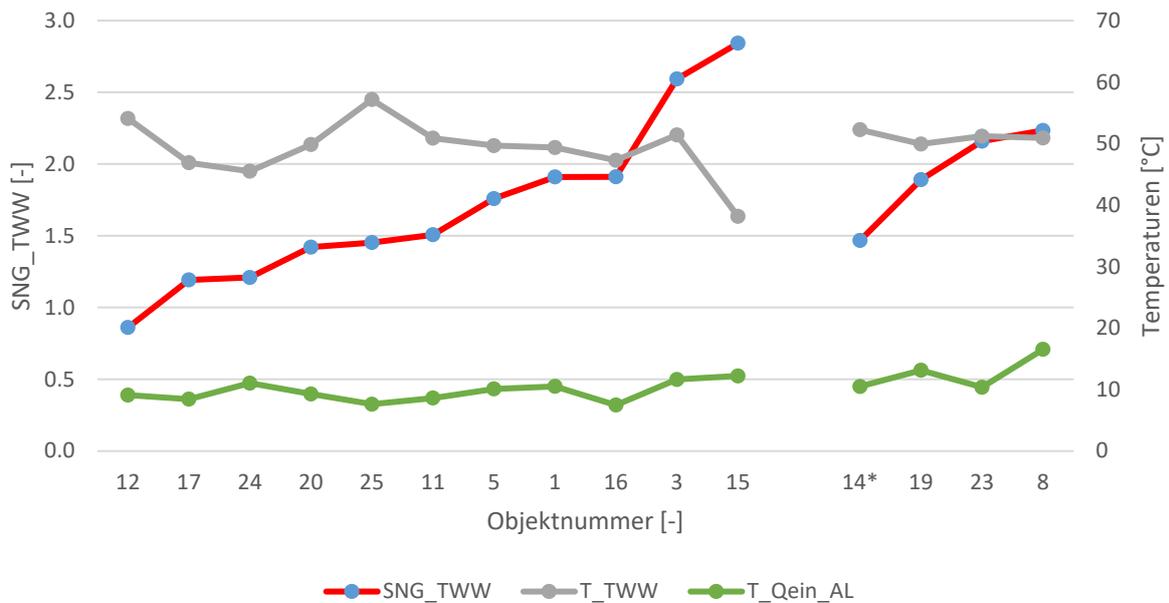


Abbildung 47 zeigt den Systemnutzungsgrad «SNG\_TWW», die Quellentemperatur «T\_Qein\_AL» sowie die Zapftemperatur «T\_TWW» der Luft/Wasser-Wärmepumpen. Links wurden die Kennwerte der kombinierten Luft/Wasser-Wärmepumpen dargestellt, rechts die vier Trinkwasser-Wärmepumpen (TWWP). Sortiert wurde nach aufsteigendem SNG\_TWW. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, unterscheiden sich die SNG\_TWW der einzelnen Anlagen stark voneinander. Den höchsten SNG\_TWW von 2.84 erreichte Anlage 15, welche ein Frischwassermodul verwendet, welches mit verhältnismässig tiefen Auflade Temperaturen auskommt. Anlage 24 weist die drittniedrigste Effizienz aus und verfügt als einzige Luft/Wasser-WP Anlage über ein Zirkulationssystem. Die beiden Anlagen 12 und 17 weisen noch einen kleineren SNG\_TWW, aber einen hohen Heizstabanteil von 60% und 42 % auf. Anlage 12 führt eine tägliche, Anlage 17 eine wöchentliche Legionellenschaltung ohne Wärmepumpenvorwärmung durch.

<sup>6</sup> Objekt 14: Einzige TWWP, welche mit Aussenluft betrieben wird. Diese TWWP wurde im März 2019 ausgetauscht. Die vorherige TWWP konnte nicht abtauen, weshalb es im Winter zu sehr vielen Verdichter Starts und Heizstab-Einsätzen kam. Sie musste dann aufgrund eines Defektes ausgetauscht werden. Die neue TWWP kann abtauen. Nun benötigen aber sowohl der Verdichter als auch der Heizstab eine Leistung von ca. 700 W liegt, weshalb eine korrekte Unterscheidung zwischen Verdichter- und Heizstabbetrieb nicht mehr robust möglich ist. Aktuell sieht es so aus, als ob jeweils am Montag eine Legionellenschaltung aktiviert ist: Zuerst mit dem TWWP-Verdichter, dann mit dem HS-TWWP (Zeitpunkt dürfte Temperaturgesteuert sein, da sie zu unterschiedlichen Uhrzeiten erfolgen). Um den Darstellungsfehler von 0% Heizstab-Anteil zu reduzieren, wurden Einzelanalysen durchgeführt. Anhand dieser wird der Heizstab-Anteil auf ca. 10% geschätzt und nun entsprechend dargestellt. Um auf diesen Umstand hinzuweisen, wird nun die Anlage 14 in allen TWWP-Grafiken mit einem Stern \* gekennzeichnet (14\*).

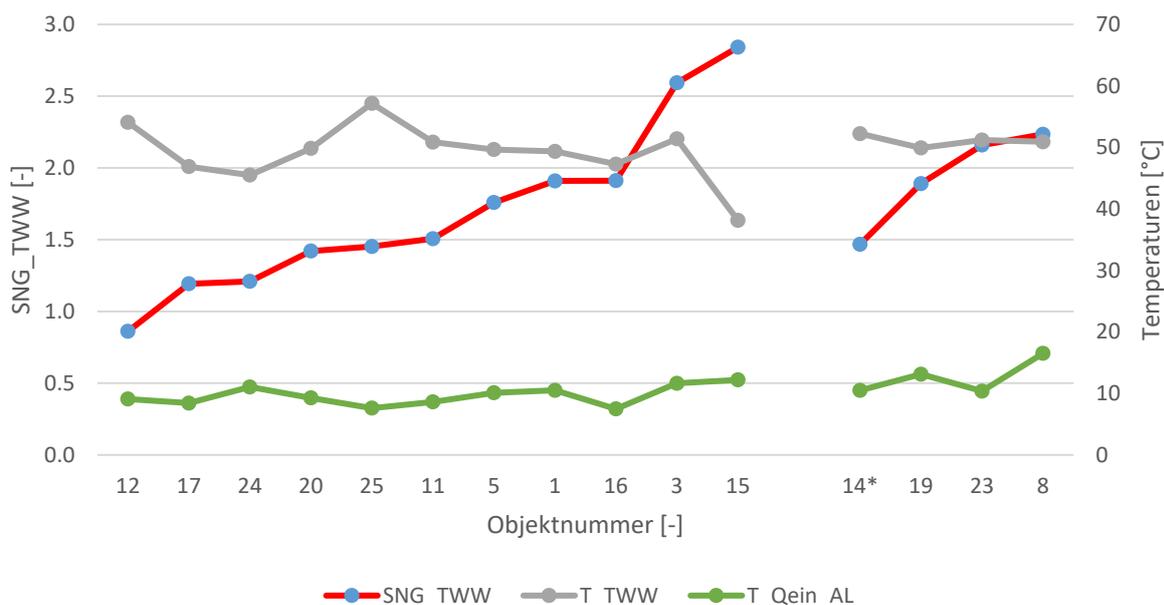


Abbildung 47: Vergleich der SNG\_TWW für Trinkwarmwasser von Luft/Wasser-Wärmepumpen und Trinkwasser-Wärmepumpen. TWWP 14 verwendet Aussenluft als Quelle, Unterscheidung zwischen Verdichter- und Heizstabbetrieb nicht mehr automatisiert möglich. Auf Basis von Einzelanalysen wird der Heizstabanteil auf ca. 10% geschätzt und mit diesem Schätz-Wert angegeben. Als Schätzwert-Markierung wird Anlage 14 deshalb mit einem \* gekennzeichnet (Details bei den Objektbeschreibungen und Fussnote 6).

Bei den vier Trinkwarmwasser-WP nutzen die Objekte 8, 19 und 23 die Luft aus dem Keller als Quelle. Anlage 14 verwendet die zeitweise deutlich kältere Aussenluft als Quelle und weist auch den kleinsten SNG\_TWW der Trinkwarmwasser-Wärmepumpen auf. Abbildung 47 deutet darauf hin, dass eine aussen-aufgestellte TWWP gegenüber innenaufgestellten Systemen mit Kellerluft als Quelle, effizienzmässig im Nachteil ist. Zwar liegt die durchschnittliche Quellentemperatur auf einem ähnlichem Temperaturniveau, aber die deutlich tieferen Aussentemperaturen im Winter führen dazu, dass dieses System entweder häufiger abtauen musste - oder der interne Heizstab mehr in Betrieb war (was z.B. bei fehlender Abtaufunktion der Fall wäre). Entsprechend dem Temperaturverlauf der Quellen Ein- und Ausluft, sowie der TWWP-Leistung kann die neue TWWP von Objekt 14 abtauen und führt eine wöchentliche Legionellenschaltung durch. Der Heizstab kommt dabei erst nach einer Vorerwärmung mithilfe des TWWP-Verdichters. Nach dem Austausch der TWWP 14 kann leider nicht mehr automatisiert zwischen Heizstab- und Verdichterbetrieb unterschieden werden, wie bei der Objektbeschreibung sowie Fussnote 6 beschrieben.

Trinkwarmwasser-WP, welche die Kellertemperatur als Quelle nutzen, weisen im Vergleich zu kombinierten Luft/Wasser-Wärmepumpen (welche immer die Aussenluft als Quelle nutzen) eine etwas höhere Effizienz aus. Generell reduzieren Abtaungen, welche bei Aussenluftanlagen auftreten, sowie Heizstabeinsätze die Effizienz.

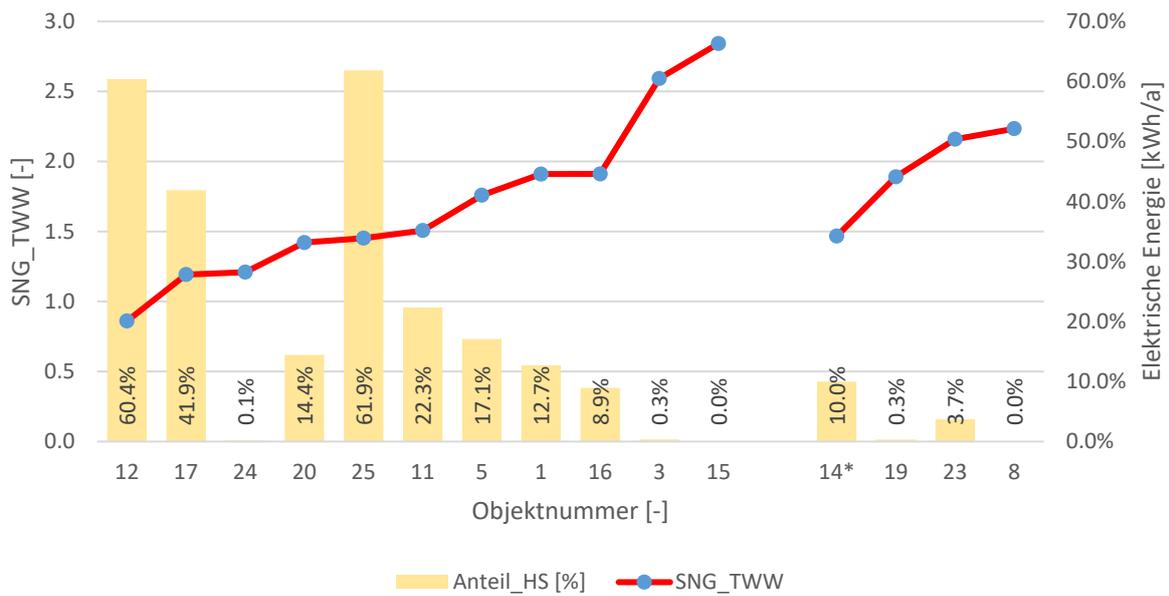


Abbildung 48: Heizstabanteil der Luft/Wasser-Wärmepumpen und Trinkwarmwasser-Wärmepumpen. TWWP 14 verwendet Aussenluft als Quelle, Unterscheidung zwischen Verdichter- und Heizstabbetrieb nicht mehr automatisiert möglich. Auf Basis von Einzelanalysen wird der Heizstabanteil auf ca. 10% geschätzt und mit diesem Schätz-Wert angegeben. Als Schätzwert-Markierung wird Anlage 14 deshalb mit einem \* gekennzeichnet (Details bei den Objektbeschreibungen und Fussnote 6).

Bei Objekt 12 und Objekt 25 fällt der hohe Heizstabanteil von über 60 % auf, welcher in Abbildung 48 ersichtlich ist. Objekt 12 führt ein tägliches Legionellenprogramm durch, was auch zu einer relativ hohen mittleren Zapftemperatur von 54 °C führt. Bei Objekt 25 wird versucht, den PV-Eigenverbrauchsanteil mithilfe des Heizstabes zu maximieren. Durch diese zusätzlich elektrische Aufladung weist Objekt 25 die höchste mittlere Zapftemperatur von durchschnittlich 57 °C aus. Bei den gemessenen Trinkwarmwasser-Wärmepumpen ist der interne Heizstab deutlich weniger in Betrieb.

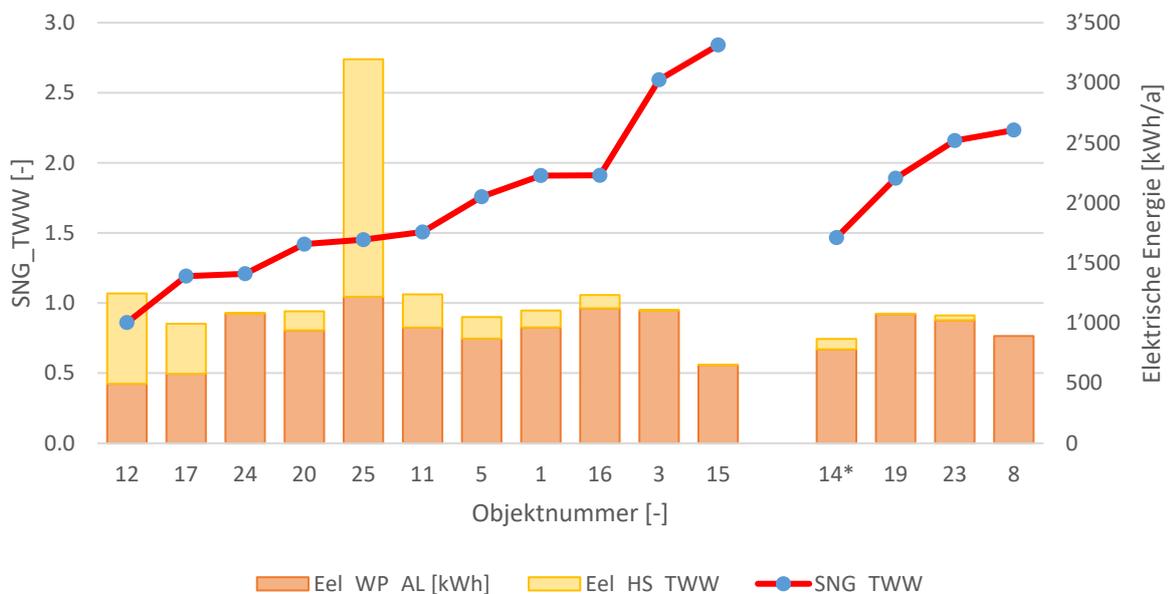


Abbildung 49: Vergleich vom SNG\_TWW und der elektrischen Energieaufnahme (Wärmepumpe und Heizstab). TWWP 14 verwendet Aussenluft als Quelle, Unterscheidung zwischen Verdichter- und Heizstabbetrieb nicht mehr automatisiert möglich. Auf Basis von Einzelanalysen wird der Heizstabanteil auf ca. 10% geschätzt und mit diesem Schätz-Wert angegeben. Als Schätzwert-Markierung wird Anlage 14 deshalb mit einem \* gekennzeichnet (Details bei den Objektbeschreibungen und Fussnote 6).

Auf den ersten Blick ist es erstaunlich, dass der elektrische Energiebedarf bei allen Anlagen auf einem ähnlichen Niveau liegen (zwischen 750 und 1'100 kWh/Jahr), obwohl die Effizienz stark voneinander abweichen. Einzig die Anlagen 25, mit der PV-Nutzung für den Eigenbedarf, und 15 (Frischwassermodule) weichen stark davon ab.

Wie bereits in einem Vorbericht gezeigt, hängt der Systemnutzungsgrad SNG\_TWW von der gezapften TWW-Entnahmeenergie und des elektrischen Energiebedarfs für die thermische Aufladung ab. Dieser Kennwerte fällt somit umso höher aus, je effizienter die Aufladung ist, aber auch je höhere der Warmwasserbezug ist. In Abbildung 50 werden die Systemnutzungsgrade aller Anlagen deshalb in Abhängigkeit der durchschnittlichen Warmwassertagesmenge dargestellt.

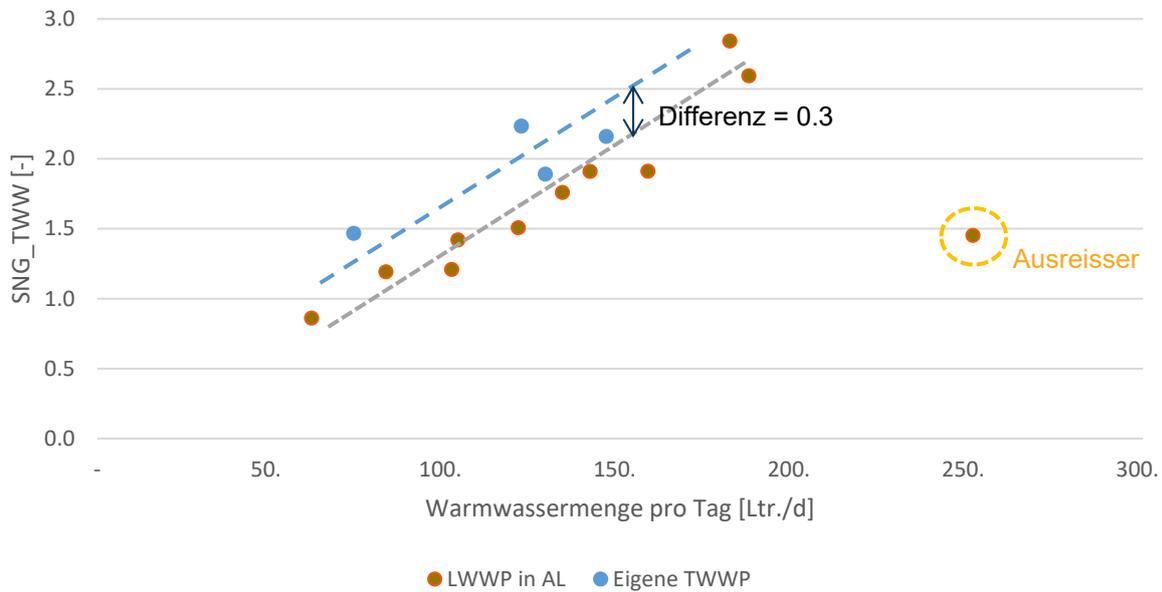


Abbildung 50: SNG\_TWW in Abhängigkeit der täglichen TWW-Zapfmenge.

Die blauen Punkte beziehen sich auf die Trinkwarmwasser-Wärmepumpen, die orangen Punkte auf die Warmwasserzubereitung durch eine kombinierte Luft/Wasser-Wärmepumpe. Hier wird ersichtlich, dass bei gleicher Warmwassernutzung die Trinkwarmwasser-Wärmepumpen im Schnitt um etwa 0.3 Punkte effizienter sind. Der Ausreisser (Objekt 25 mit PV-Eigenverbrauchsoptimierung) wurde dabei nicht berücksichtigt.

### 3.4.2 Voraussetzung für den Einsatz einer Trinkwasser-Wärmepumpe

Die Installation einer Trinkwarmwasser-Wärmepumpe, die die Kellertemperatur als Quellen nutzt, braucht einen geeigneten Aufstellungsraum. Die Anforderungen sind ein Mindestvolumen und eine thermische Isolierung zwischen Aufstellungsort und beheizten Räumen. Ist dies gegeben, sprechen viele Punkte für eine separate Trinkwarmwasseraufbereitung. Ein Grund ist, dass sich die beiden Systeme (Heizungswärmepumpe und Trinkwarmwasser-WP) auf jeweils ihre Aufgabe «konzentrieren» können. Dadurch können sie auf dies optimiert werden und das Umschalten des 3-Wege-Ventils der Heizungswärmepumpe entfällt. Das Umschalten des Ventils kann zu Beginn der Aufladung die Schichtung beeinträchtigen, da die Aufladung mit tieferen Temperaturen (Vorlauftemperatur Heizen) startet, als im Speicher enthalten ist. Es gibt noch weitere Gründe, welche für einen Einsatz von eigenen Trinkwarmwasser-WP sprechen können:

- Ersatz von Elektro- oder fossil betriebener Boiler (als Quick-Win)
- Vermeidung von Wärmeverlusten aufgrund (langer) Rohrleitungen zwischen WP und Speicher
- Entfeuchtung und Kühlung des Kellers

Weniger geeignet erscheinen Trinkwarmwasser-Wärmepumpen, welche Aussenluft als Quelle nutzen. Hier sind vor allem kalte Wintertage problematisch. Da in vielen Geräten keine Abtaufunktion integriert ist, läuft dann vermehrt der interne Elektroheizstab. Eine umfassende Beurteilung von Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit Aussenluft als Quelle ist jedoch auf Grund der geringen Anzahl untersuchter Produkte nicht möglich.

## 4. Schlussfolgerung und Ausblick

Die WP-Feldmessungen ermöglichen eine Qualitätsbeurteilung von Wärmepumpensystemen unter Labor- und realen Bedingungen. Somit ist auch ein Effizienzvergleich zwischen der Wärmepumpe unter Laborbedingungen mit der Effizienz unter Realbedingungen möglich. Die Systemgrenzen wurden dabei so gewählt, dass auch die Effizienz des gesamten Wärme-Verteilsystems ermittelt werden kann.

Die Messungen erfolgen mithilfe einer SPS und einem Abtastintervall von 100ms. Die Mittelwerte der Messdaten werden in einer 10s-Auflösung gespeichert.

Die Auswertungen zeigten, dass ein Grossteil der Anlagen eine hohe Effizienz aufweisen und robust laufen. Grobe Mängel wurden nur sehr selten entdeckt. Das grösste Optimierungspotential wurde auf Seiten der Regel- und Steuerungstechnik identifiziert. Beispiele hierfür wären:

- Heiz-Vorlauftemperaturen optimieren (Heizkennlinie optimieren)
- Heizen an Sommertagen vermeiden (zum Teil auch an Tagen mit  $T_{AVG} > 25 \text{ °C}$ )
- Heizen und Kühlen am gleichen Tag, etc. verhindern
- TWW-Aufbereitung: WP-Vorerwärmung bei Legionellenschaltungen
- TWW-Aufbereitung: Auflade-Zeitpunkt bei LWWP bei möglichst hoher Umgebungstemperatur

Ein Wärmepumpen-Einsatz im Altbau erwies sich auch als gut möglich und effizient.

Bei Solewärmepumpen kann eine saisonale Abkühlung der Soletemperatur während der Heizperiode gemessen werden, die Sole regeneriert aber bei den meisten Anlagen über den Sommer wieder. Ein langfristiges Abkühlen konnte somit nicht generell festgestellt werden.

Obwohl die Heizsaison 2021/22 etwas milder als die vorherige Heizsaison ist, blieb die Effizienz bzw. Wärmenutzungsgrade (WNG) der Wärmepumpenanlagen praktisch unverändert. Nur bei Objekt 24 konnten einige Effizienzkennzahl markant gesteigert werden. Die Verbesserungen beruhen auf umfangreiche Optimierungen, welche zwischen den beiden Heizsaisons stattgefunden haben. Optimierungen fanden bei der Ansteuerung der Senkenpumpe, der Verdichterdrehzahl, der Heizkennlinie sowie bei der Warmwasseraufladung statt. In Kapitel 2.7 werden die Optimierungsmassnahmen ausführlicher beschrieben

Die Effizienz der Trinkwarmwasseraufbereitung aller Anlagen liegt auf ähnlichem Niveau wie im Vorjahr. Bei drei Objekten konnte eine deutliche Effizienzsteigerung gemessen werden:

- Anlage 15 erhielt einen neuen Schichtspeicher. Der WNG\_Aufladung stieg von 3.12 auf 3.65.
- Bei Anlage 16 wurde Ende November 2021 die wöchentliche Legionellenschaltung deaktiviert. Der WNG\_Aufladung stieg von 2.1 auf 2.8.
- Bei Anlage 24 wurde für eine effizienter TWW-Aufladung die Aufladeleistung reduziert, der SNG\_TWW stieg von 2.2 auf 3.0.

Bei den Anlagen der Objekte 10, 15, 21 und 24 findet die Aufladung gezielt zu Mittag bzw. am frühen Nachmittag statt. Damit können höhere Aussentemperaturen genutzt und/oder der PV-Eigenverbrauch optimiert werden.

Bei den meisten Objekten sank in dieser Heizsaison mit den Heizgradtagen auch der spezifischer Heizwärmebedarf. Nur die Objekte 4 und 25 wiesen einen höheren spezifischen Heizwärmebedarf auf, obwohl auch hier die Heizgradtage sanken.

Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen lag in dieser Heizsaison die mittlere Quelltemperatur im Heizbetrieb bei  $3.8 \text{ °C}$ , im Aufladebetrieb bei  $4.5 \text{ °C}$ . Die Jahresmittelwerte der Quelltemperaturen im Heizbetrieb schwanken zwischen  $1.6 \text{ °C}$  bei Objekt 17 und  $5.6 \text{ °C}$  bei Objekt 3. Für die Trinkwarmwasseraufladung lagen die mittleren Temperaturen im Bereich von  $7.5 \text{ °C}$  bei Objekt 16 und  $12.9 \text{ °C}$  bei Objekt 15.

Demgegenüber liegen diese mittleren Temperaturen bei der Erdsonden-Wärmepumpe bei  $7.9 \text{ °C}$ . Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die Bandbreite der mittleren Quelltemperatur höher: Diese liegt zwischen  $1.8 \text{ °C}$  bei Objekt 6 und  $11.0 \text{ °C}$  bei Objekt 10. Die Sole/Wasser-Wärmepumpen-Anlagen lassen während der beiden letzten Heizsaisons keine Abkühlung der Erdsonde erkennen.

Je besser Gebäude isoliert sind, desto grösser ist der Spielraum, um das Heizen auf die warmen Tagesstunden zu verlegen. Bei Objekt 1 hätte im Januar 2022 die Effizienz theoretisch um rund 5.7 % erhöht werden können. Dies hätte hier zu einer Einsparung von 42.8 kWh für diesen Monat geführt. Welche Werte jedoch in der Praxis erreichbar wären, ist nur schwer zu ermitteln. Eine Verlagerung der Heizzeiten in die warmen Tagesstunden ist vor allem bei Objekten möglich, in welchen die Wärmepumpe tendenziell überdimensioniert ist. Diese weisen dann geringe Tagesbetriebsstunden und somit höhere Stillstands-Zeiten auf, wodurch eine zeitliche Flexibilität gegeben ist. Eine mögliche Verschiebedauer hängt auch stark vom Isolationszustand des Gebäudes ab. Je schlechter ein Gebäude isoliert ist, umso weniger kann ohne Komforteinbussen verlagert werden.

Bei der TWW-Aufladung ist das Verschiebepotential deutlich höher. Die mittlere Aufladedauer bei den LW-Wärmepumpen betrug in der letzten Heizsaison 0.9 Stunden pro Tag. Da hier der Aufladezeitpunkt kaum einen Einfluss auf den Komfort hat, ist bei der TWW-Aufbereitung eine hohe zeitliche Flexibilität und somit Effizienzpotential vorhanden.

Die Legionellenschaltung mithilfe des Elektroheizstabes erfolgt bei Objekt 11, 20, 22 und 27 erst nach einer «Vorwärmung» mithilfe der Wärmepumpe. Dies wirkt sich positiv auf die Effizienz aus. Bei Objekt 1 und 5 erfolgt die Legionellenschaltung häufig gleichzeitig mit der Wärmepumpe.

Bei den Laufzeiten der jeweiligen Wärmepumpen-Anlagen gibt es grosse Unterschiede. Theoretisch sollten die Inverter-Wärmepumpen eine wesentlich längere Laufzeit aufweisen als die On/Off-Wärmepumpen. Aktuell liegen aber die Laufzeiten vieler Inverter-Wärmepumpen auf dem Niveau der On/Off-Wärmepumpen. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen fällt diesbezüglich die Inverter-Wärmepumpe von Objekt 23 mit einer mittleren Laufzeit von 7.7 Stunden pro Start positiv auf. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen weisen mehr als die Hälfte der drehzahlregulierten WP-Anlagen durchschnittliche Laufzeiten von über 6 Stunden pro Start auf. Hier spielt die Auslegung der Wärmepumpe eine entscheidende Rolle, welche in einigen Fällen zu gross ausfallen dürfte. Dadurch kommt die Inverter-Wärmepumpe unnötig früh ins Takten.

Auffallend ist, dass die Standby-Verluste der Inverter-Wärmepumpen im Schnitt wesentlich höher sind als die der On/Off-Wärmepumpen. Dass dies nicht systembedingt ist, zeigen die WP-Anlagen der Objekte 4, 6, 13, 14, 15, 17 und 23. Hier liegen die Standby-Verluste im Bereich der On/Off-Wärmepumpen. Bei den Standby-Verlusten dürften manche Hersteller noch Optimierungspotential haben. Die jährlichen Standby-Verluste können je nach Anlage zwischen 25 kWh/a und 350 kWh/a variieren (Faktor 14!).

Trinkwarmwasser-Wärmepumpe weisen im Vergleich zu kombinierten Luft/Wasser-Wärmepumpen einen um rund 0.3 Punkte höheren Systemnutzungsgrad «SNG\_TWW» auf. Vorteilhaft ist es, wenn Trinkwarmwasser-Wärmepumpe als Quelle die Raumluft des Kellers verwenden können. Voraussetzung sind hier ein Mindest-Luftvolumen und eine ausreichende Isolierung zu beheizten Räumen (Details siehe Kapitel 3.4.2).

#### **4.1 Veröffentlichungen / Seminare / Weiterbildung**

Im vergangenen Jahr wurden mehrere Vorträge und Weiterbildungen gehalten:

- «Update Feldmessungen», Wärmepumpen-Fachkolloquium an der FH OST Buchs (08.02.2022)
- «Inverter-Wärmepumpen / Stand der Technik», am EnFK-Weiterbildungsseminar (29.04.2022)
- «CAS Wärmepumpen und Kältetechnik», Frühlingssemester an der FH OST Buchs
- «Field Performance of Domestic Heat Pumps for Heating and Hot water in Switzerland – Insights and Analysis», Purdue Conference USA (10.-14.07.202)
- «Weiterbildung Wärmepumpen für die Energiefachstellen der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein», Energiefachstellen der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein (29.08.2022)
- «Versorgungssicherheit und Energiewende – wohin geht die Reise?», Energieforum an der LIGHA (22.09.2022)
- «Lange Wartezeit auf die Wärmepumpe lohnt sich», Blog auf weiterwissen.ch (27.10.2022)
- «Moderne Wärmepumpen», EnergiePraxis-Seminare (Oktober und November 2022)

Seit 2020 werden nur mehr kleinere Mehrfamilienhäuser mit einer Heizlast von ca. 20-30 kW in die Messkampagne aufgenommen. Objekt 26 ist mit 44 Bewohnern und einer Energiebezugsfläche von 4270 m<sup>2</sup> ein sehr grosses Objekt, welches in der Heizperiode 2021/22 gemessen wurde.

Interessenten mit einem kleinen Mehrfamilienhaus, welche gerne mit ihrer noch nicht installierten Wärmepumpenanlage an der Feldmessung kostenfrei teilnehmen möchten, werden gerne gebeten, sich beim Leiter des Wärmepumpen-Testzentrums, Mick Eschmann [mick.eschmann@ost.ch](mailto:mick.eschmann@ost.ch) / [www.wpz.ch](http://www.wpz.ch), für weitere Informationen zu melden.

## 5. Anhang

### 5.1 Methodik und Messequipment

Die Messausrüstung für die 25 bisher umgesetzten Anlagen in der Feldmessung ist bis auf wenige Details identisch. Bei jeder Wärmepumpenanlage wird ein Schaltschrank verbaut, der u.a. eine SPS (Speicherprogrammierte Steuerung) und Stromwandler für die Messung der Aufnahmeleistungen eingebaut hat. Die Abbildung 51 zeigt beispielhaft den Aufbau des Schaltschranks der WP- Anlage F019\_2019\_SW.

Für die Internetanbindung der SPS ist jeweils zusätzlich ein Site-Manager-Modul verbaut. Dieses verhindert unbefugten Zugriff auf die Messeinrichtung, ermöglicht Software-Updates und sorgt für die Weiterleitung der Messdaten an den Datenbank-Server. Je nach Anlage wird die Internetverbindung über LAN-Kabel, WLAN oder Mobilfunk aufgebaut. Die gesammelten Daten eines Tages werden am Folgetag per E-Mail nach Buchs übertragen.

Die SPS nimmt alle relevanten Daten auf und führt verschiedene Berechnungen durch. So werden z.B. die aktuelle Heiz- bzw. Aufladeleistung entsprechend Gl. 1 berechnet:

$$\dot{Q} = (T_{VL} - T_{RL}) \cdot c_p \cdot \rho(T_{RL}) \cdot \dot{V} \quad (\text{Gl. 1})$$

Darin sind:

$\dot{Q}$	Heizleistung (Aufladeleistung) [kW]
$T_{VL}$	Vorlauftemperatur (Austrittstemperatur für Aufladung) [°C]
$T_{RL}$	Rücklauftemperatur (Eintrittstemperatur für Aufladung) [°C]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)], bzw. 4.181 kJ/(kg·K)
$\rho(T_{RL})$	Dichte des Trägermediums beim Rücklauf [kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]

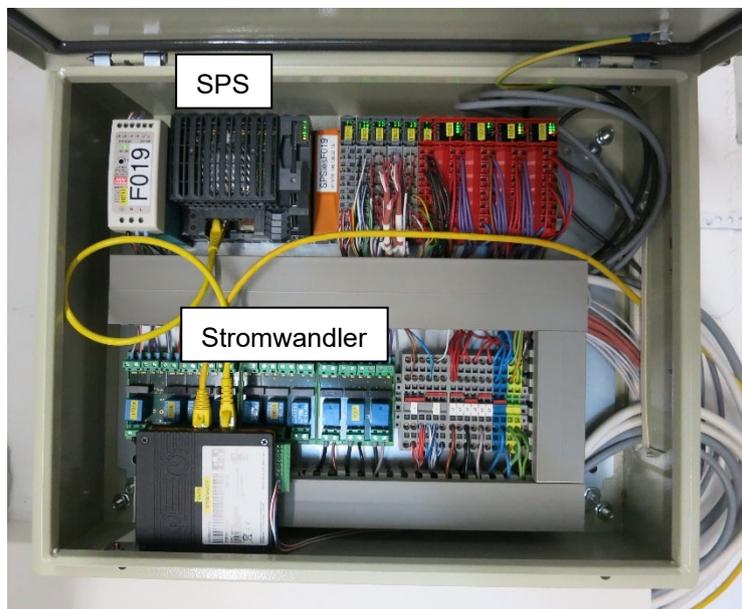


Abbildung 51: Schaltschrank der Messanlage F019\_2019\_SW

Je nach Situation wird der Volumenstromzähler im Rücklauf bzw. im Vorlauf montiert. Sofern es möglich ist, wird für das Heizen und die Aufladung derselbe Zähler verwendet. Bei einer Anlage (F002\_SW\_2016) musste für beide Hydraulikkreise je ein Zähler eingebaut werden. Die Temperaturen werden mithilfe eines PT-100 (4-Leiter-Technik) direkt gemessen. Dabei werden verschiedene Temperaturpositionen doppelt ermittelt, um die Redundanz zu gewährleisten. Ein Volumenstromzähler und die Temperaturmessung (Laboraufbau) sind in Abbildung 52 ersichtlich.

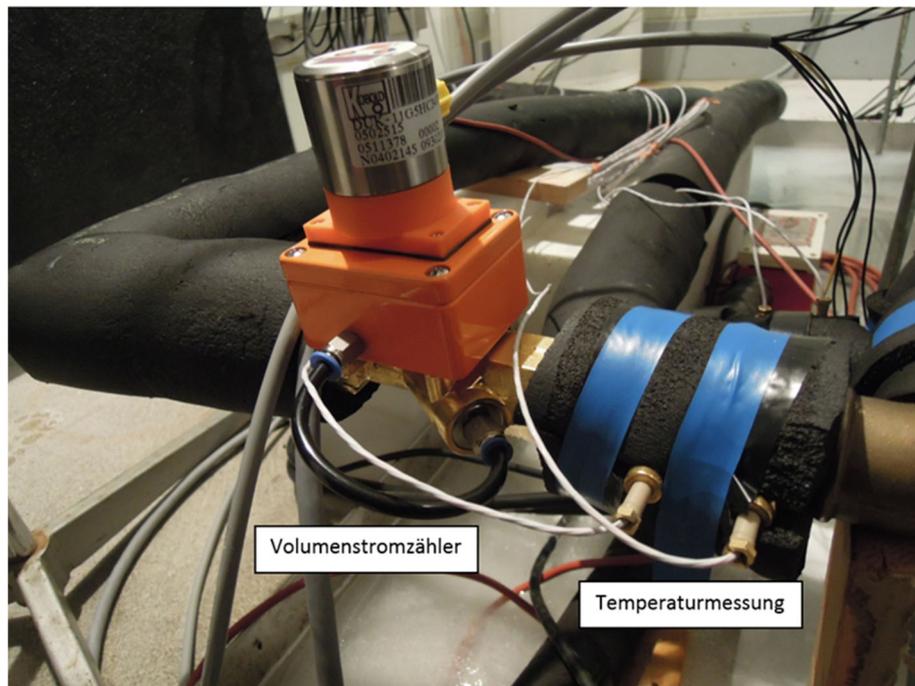


Abbildung 52: Volumenstromzähler und Temperaturmessung (Laboraufbau)

Die gesamten Daten werden auf einem Server in der Schweiz auf 5 Datenbanken gespeichert (MySQL 5.5.40). Der Aufbau ist relational, d.h. jede Information ist nur einmal in einer der fünf Datenbanken bzw. deren Tabellen enthalten. Dadurch können die Daten sehr einfach aktuell und konsistent gehalten werden. Veränderbare Stammdaten enthalten noch zusätzlich eine Kennzeichnung, ab wann Sie jeweils gültig sind (z.B. "Anzahl Personen im Haushalt = x" - „Valid Since: dd.mm.yyyy“). Aus Datenschutzgründen erfolgt die Verlinkung zu den personenbezogenen Daten über eigens generierte IDs, wodurch die personenbezogenen Daten in den anderen Datenbanken nicht im Klartext ersichtlich sind (siehe beispielhaft Abbildung 53).

objectId	objecttypeld	buildingId	ownerId	operatorId
2	1	cb8f24e9-fc9d-11e5-9e4e-e83935bf2820	cb8f24e9-fc9d-11e5-9e4e-e83935bf2820	cb8f24e9-fc9d-11e5-9e4e-e83935bf2820
3	1	72c04fe3-56e3-11e5-aa50-002564bce6f0	72c04fe3-56e3-11e5-aa50-002564bce6f0	72c04fe3-56e3-11e5-aa50-002564bce6f0
1205	1	1a9e0570-696d-46e1-9676-749fb57b399c	4b375b0f-b0cc-422f-b026-606f7226ee70	4b375b0f-b0cc-422f-b026-606f7226ee70
1206	1	4bf7ed88-14f6-4ed8-a03c-e882b6f9bdd2	e7735508-e761-4c48-acd4-48a609acb478	e7735508-e761-4c48-acd4-48a609acb478

Abbildung 53: Ausschnitt aus der Objekt-Datenbank „wpfeldme\_obj“. Personendaten erscheinen nicht im Klartext und können somit nicht direkt zugeordnet werden

Folgende 5 Datenbanken sind vorhanden:

- „wpfeldme\_persons“ enthält alle personenbezogenen Daten (Name, Anschrift, Tel., etc.)
- „wpfeldme\_obj“ enthält alle objektbezogenen Daten (Gebäude-Anschrift, Besitzer, WP-Typ, EBF, etc.)
- „wpfeldme\_users“ enthält alle userbezogenen Daten inklusive der Berechtigungen (z.B. Rolle „Admin“, „Beobachter“, etc.)
- „wpfeldme\_rohdata“ enthält alle gemessenen Sensordaten im Rohdatenformat. Hier erfolgen keine Anpassungen bzw. Adaptierungen (z.B. Umrechnungen mit den Sensorfaktoren auf die tatsächlichen Temperaturwerte laut angegebener Einheit –

diese Umrechnung erfolgt in den Calcdaten – sowie bei der Ausgabe auf der wpfeldmessung.ch Homepage)

- „wpfeldme\_calcdata“ enthält alle berechneten Werte. Berechnungsvorschriften können hier in eigenen „Features“ vom User angelegt und anschliessend mit den jeweiligen Objekten und Sensor-IDs verlinkt werden. Hierfür stehen fixe Bausteine sowie allgemeine Funktionen zur Verfügung, welche je nach zugewiesenen Sensorwerten unterschiedliche Grössen berechnen können. Hierfür muss der Programmcode nicht geändert werden(!).

In Tabelle 3 werden zwei Beispiele angeführt: Die allgemeine Funktion „mean\_B7oB6\_1“ ermittelt die Mittelwerte gemäss den verlinkten Sensor-IDs S1 und S2, in den Zeitabschnitten, in welchen Bit 7 oder Bit 6 des digitalen Signales „47\_Dig“ gleich „1“ ist.

Tabelle 3: Beispiel von Funktionsnamen und Berechnungsvorschriften in der Datenbank „wpfeldme\_calcdata“

Funktion:	Berechnungsvorschrift:
avg_B7_1_B4_0_B1_0	Mittelwert von (S1 und S2) jenes Zeitbereiches, wo <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bit 7 = 1 (= Verdichterbetrieb) UND</li> <li>• Bit 4 = 0 (= Heizbetrieb) UND</li> <li>• Bit 1 = 0 (= kein Kühlbetrieb)</li> </ul> des digitalen Signales 47_Dig = 1 sind. Diese Funktionen können nach diesem Schema beliebig aufgebaut werden (z.B: avg_B7_0_B3_1...)
JAZ+	$\text{JAZ+} = \frac{\text{sum}(37\_PtH + 39\_PtA - 51\_PeIHS\_TWW - 53\_PeIHS\_Puffer)}{(\text{sum}[25\_PeITot - 33\_PeUS - 51\_PeIHS\_TWW - 53\_PeIHS\_Puffer] \text{ wenn Bit } 1=0)} - \text{Sensoren fix hinterlegt}$

Fixe Baustein wie z.B. „JAZ+“ ermittelt die Kenngrösse entsprechend der dargestellten Rechenvorschrift. Wegen der hohen Anzahl an benötigter Sensor-Id's in unterschiedlichen Zeitbereichen sind hier die Sensor-IDs bereits fix im Programmcode hinterlegt.