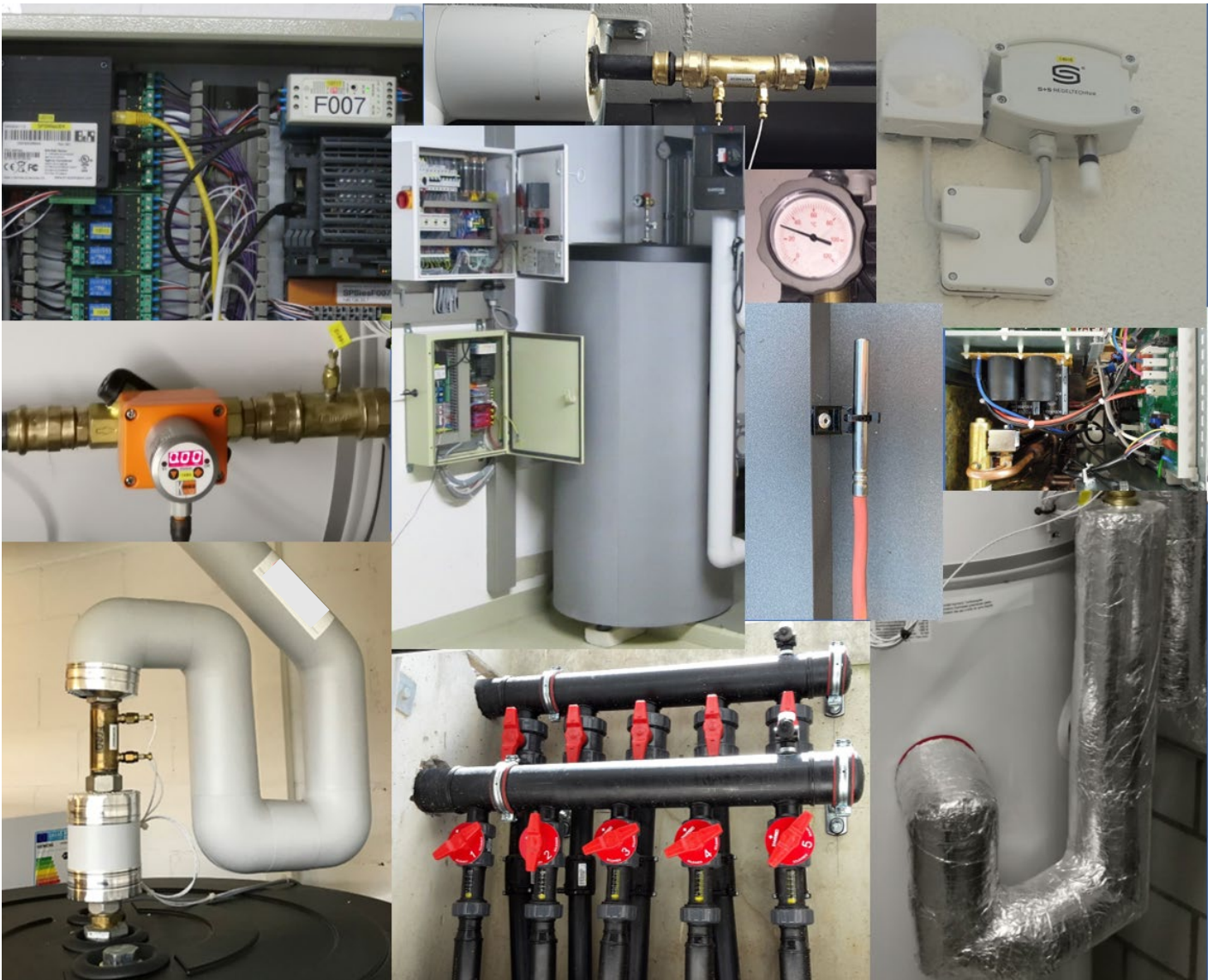


Jahresbericht, 19. Oktober 2021

# Bericht «Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2020/21»



**Autoren**

|                    |  |
|--------------------|--|
| Manuel Prinzing,   | Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule |
| Matthias Berthold, | 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 .....                                   | 15        |
| <b>2.</b> | <b>Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen .....</b>      | <b>19</b> |
| 2.1       | Vergleich der Effizienzkennziffern (JAZ und WNG).....                | 19        |
| 2.2       | Einfluss des Temperaturniveaus .....                                 | 21        |
| 2.3       | Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung ..... | 23        |
| 2.4       | Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage .....                 | 26        |
| 2.5       | Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb.....                | 30        |
| 2.6       | Temperaturverlauf der Erdwärmesonden .....                           | 31        |
| 2.7       | Vorkommnisse, Optimierungen und diverses .....                       | 32        |
| <b>3.</b> | <b>Spezialauswertungen im Detail .....</b>                           | <b>34</b> |
| 3.1       | Warmwasser – Regelstrategien.....                                    | 34        |
| 3.2       | Trinkwarmwasser-Wärmepumpen .....                                    | 37        |
| 3.3       | Kälteperioden .....  | 38        |
| 3.4       | Silent Mode .....  | 41        |
| <b>4.</b> | <b>Schlussfolgerung und Ausblick .....</b>                           | <b>43</b> |
| <b>5.</b> | <b>Anhang.....</b>   | <b>45</b> |
| 5.1       | Methodik und Messequipment.....                                      | 45        |

## Zusammenfassung

Für diesen Jahresbericht sind die Messdaten von 23 Wärmepumpenanlagen über insgesamt 66 Heizperioden verfügbar. Elf Anlagen beziehen die Umweltenergie aus Erdwärmesonden, 12 Anlagen aus der Umgebungsluft. Bei vier Objekten erfolgt die Aufladung des Trinkwarmwassers mit einer separaten Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler). Es konnten zwei zusätzliche Anlagen in die Messkampagne aufgenommen werden. Auswertungen hierzu sind jedoch erst mit Abschluss der nächsten Betrachtungsperiode möglich.

Alle Wärmepumpenanlagen werden zunächst während mindestens einer Heizperiode auf Ihre Effizienz überprüft. Danach finden Betriebsoptimierungen bei der Anlagensteuerung statt, um den Einfluss von Betriebsoptimierungen auf die Anlageneffizienz zu ermitteln.

Die in die Feldmessungen aufgenommenen Wärmepumpen stehen in Gebäude an verschiedenen klimatischen Standorten. Die Gebäude unterscheiden sich sowohl bezüglich Gebäudehülle, Wärmeabgabesystem sowie Bewohneranzahl und deren Nutzerverhalten.

Erstmalig ist in der markanten Kälteperiode Mitte Februar 2021 bei zwei Anlagen der elektrische Heizstab kurzzeitig im Heizbetrieb zum Einsatz gekommen. Das Nachheizen wäre jedoch zur Wärmebereitstellung für den Wohnkomfort nicht notwendig gewesen. Zudem trat nun mit Anlage 16 der erste grössere Defekt in Form eines schleichenden Verdichterschadens über den Jahreswechsel zwischen Mitte Dezember 2020 und Januar 2021 auf. Zum Überbrücken der Reparaturdauer wurde die benötigte Wärmemenge per Heizstab ohne Komforteinschränkungen bereitgestellt.

Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen ist in der letzten Heizsaison (HS 2020/21) ein durchschnittlicher Wärmenutzungsgrad (WNG) für Heizen und Aufladung des Trinkwarmwassers von 3.0 (WNG-Bereich von 2.2 bei Objekt 24 bis 3.9 bei Objekt 15) gemessen worden.

Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden überbieten diese Werte mit durchschnittlich 4.5 (WNG Bereich von 3.1 bei Objekt 6 bis 5.2 bei Objekt 18 und Objekt 21).

Bei der Aufladung des Trinkwarmwassers bieten leistungsgeregelte Wärmepumpen ein einfaches Optimierungspotential durch die Anpassung der Ladeleistung.

Die vieldiskutierte Thematik des Silent Mode bei Luft/Wasser-Wärmepumpen kann bei den Feldmessungen anhand der Messdaten nicht eindeutig bestätigt werden. Bei einigen Gebäuden ist eine klassische Nachtabenkung eingestellt.

## Résumé

Ce rapport annuel traite des données de mesure de 23 installations de pompe à chaleur, sur un total de 66 périodes de chauffe. Sur les 23 installations, 11 installations comprennent des pompes à chaleur sol/eau, et 12 installations comprennent des pompes à chaleur air/eau. Dans 4 installations sur 23, l'eau chaude sanitaire (ECS) est produite avec une pompe à chaleur séparée (chauffe-eau à pompe à chaleur). Enfin, deux installations supplémentaires ont pu être récemment intégrées à la campagne de mesure. L'analyse des données relatives à ces deux nouvelles installations ne pourra cependant se faire qu'à la fin de la prochaine période d'observation. L'efficacité de l'ensemble des installations est évaluée durant une saison de chauffe complète au minimum. Ensuite de quoi, des optimisations sont réalisées au niveau de la régulation, et une nouvelle évaluation est faite pour attester de l'efficacité sur les installations de ces optimisations. Les installations qui font partie du programme de mesures in situ sont toutes situées dans des régions climatiques différentes. Quant aux bâtiments, ils diffèrent au niveau de l'enveloppe du bâtiment, du système de distribution de la chaleur, ainsi que du nombre et du comportement des habitants.

Lors de la période particulièrement froide du milieu du mois de février 2021, l'épingle électrique s'est enclenchée pour la première fois en mode chauffage, durant une courte période, sur deux installations. En réalité, ce complément de chauffage n'aurait pas été nécessaire pour assurer le confort des habitants. Il a été engendré par un problème de régulation. De plus, concernant l'installation n°16, l'épingle électrique a également comblé un déficit de chauffage durant une réparation, sans perte de confort pour les habitants. En effet, un premier problème un peu plus conséquent est apparu sur cette installation, entre mi-décembre 2020 et mi-janvier 2021, au niveau du compresseur.

Au cours de la dernière saison de chauffe (2020/21), on a pu mesurer un taux moyen d'utilisation de la chaleur (« Wärmenutzungsgrad » ou WNG en allemand) de 3.0, pour le chauffage et l'ECS, sur les installations comprenant des pompes à chaleur air/eau. Le taux moyen d'utilisation de la chaleur varie de 2.2 pour l'installation n°24, à 3.9 pour l'installation n°15. Les valeurs pour les installations avec pompe à chaleur sol/eau (et sondes géothermiques) sont plus élevées, avec une moyenne à 4.5 et des taux variant de 3.1 pour l'installation n°6, à 5.2 pour les installations n°18 et n°21.

Lors de la préparation d'ECS, les pompes à chaleur avec régulation de puissance présentent un potentiel d'optimisation facile à exploiter, grâce à l'adaptation du taux de charge de l'ECS.

Enfin, alors que la problématique du bruit engendré par les pompes à chaleur air/eau fait souvent débat, les mesures in situ n'ont pas permis de mettre en évidence une utilisation des pompes à chaleur en mode « silent mode ». Seul un abaissement nocturne classique a pu être observé dans quelques bâtiments.

# 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, WP-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
- Abtaunungen
- Taktverhalten
- Detaillierte Aufschlüsselung nach unterschiedlichen Nutzungsgraden
- Messung an den unterschiedlichen Systemgrenzen, örtlich wie auch zeitlich (z.B. Heiz-Auflade- oder Kühlbetrieb, Abtaunungen, etc.)
- Aussagen über das Gebäude und das Nutzerverhalten
- Einfluss der Nebenaggregate auf die Effizienz (Umwälzpumpe, 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 die Wärmepumpen vor der Installation am Wärmepumpen-Testzentrum WPZ in Buchs SG ausgemessen und das Messequipment der Feldmessung entsprechend kalibriert wird.

Somit kann die Performance der Wärmepumpen im Feld mit der Performance im Labor verglichen und bei allfälligen Unterschieden die Ursachen ermittelt werden (WP-Herstellung, Regler-Einstellungen, Installationen, etc.).

## 1.1 Objektbeschreibungen

Im vergangenen Betrachtungszeitraum sind zusätzlich eine Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage in einem neugebauten Einfamilienhaus sowie eine grosse Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage in zwei zusammenhängenden Mehrfamilienhäusern als Ersatz für eine Ölheizung aufgenommen worden. Aufgrund von Bauverzögerungen liegen hierzu noch keine Messdaten einer vollständigen Betrachtungsperiode vor.

Somit sind seit dem letzten Feldbericht keine neuen Anlagen in dieser Auswertung enthalten. Per Ende August 2021 befinden sich insgesamt 23 Anlagen in der Feldmessung. 12 Luft/Wasser-Wärmepumpen, davon acht drehzahlgeregelte Modelle, sowie elf Sole/Wasser-Wärmepumpen mit sieben drehzahlgeregelten Modellen. Bei vier Objekten wird das Trinkwarmwasser mittels separatem Wärmepumpenboiler erwärmt. Der Kühlbetrieb ist bei fünf Objekten aktiviert. Die Anlagen 2, 10, 13 und 21 kühlen passiv mittels Erdwärmesonde, nur die Luft/Wasser-Wärmepumpe 15 kühlt aktiv mit Verdichter.

Aktuell ist das Objekt 22 mit zehn gemeldeten Personen das einzige 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.

Die 23 vermessenen Anlagen werden in diesem Bericht dargestellt. Hierzu stellt Tabelle 1 eine Kurzübersicht der Anlagen dar.

Somit können nun je nach Anlage maximal fünf Heizperioden (2016/17, 2017/18, 2018/19, 2019/20 und 2020/21) ausgewertet werden. 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 mit einem Stern gekennzeichnet. (Ein Vergleich mit anderen Perioden oder Anlagen ist durch den verkürzten Winterbetrieb nur bedingt möglich). Objekte mit weniger als 300 Messtage pro «Heizsaison» werden nicht dargestellt. Eine Ausnahme bildet hier Anlage 14 für die vergangene Periode 2020/21. Hier ist es zu einem längeren Ausfall der Datenübertragung gekommen, sodass nur 293 Messtage in der Datenbank erfasst werden konnten. Ab dem 8. April stehen für ca. zwei Monate keine Daten zur Verfügung. Da dies die Heizperiode nur am Rande tangiert, werden die Daten für die Sole/Wasser-Wärmepumpe mit separater Trinkwarmwasser-Wärmepumpe dennoch dargestellt. Grund für den Verbindungsunterbruch sind Umstellungen des Mobilfunkanbieters im Bereich der 2G und 3G Übertragungsstandards. Bei Objekt 2 ist im Winter 2021 der Volumenstromsensor für die Senke ausgefallen, welcher pandemiebedingt erst verzögert ausgetauscht werden konnte. Somit konnte die thermische Heizleistung nicht korrekt ermittelt werden, weshalb alle Grössen, welche diesen Messwert benötigen, nicht dargestellt werden. Die restlichen Messdaten (inklusive der thermischen Aufladeleistung) wurden korrekt erfasst und sind für die Messperiode 2020/21 dargestellt.

Bei Objekt 18 sind Umbauarbeiten an der Heizungsanlage durchgeführt worden. Mit einer zusätzlichen längeren unbewohnten Zeitdauer kann diese Anlage in dieser Heizperiode nur bedingt ausgewertet 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> <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> |

| Objektnummer | Beginn der Messung                   | Luft / Wasser WP | Sole / Wasser WP | Neubau | Sanierung | Drehzahl-Regelung | Kühlung aktiviert | Anmerkungen:  |
|--------------|--------------------------------------|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|---|
| 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<br>(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> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.20</li> <li>• SCOP<sub>55</sub> = 4.20</li> </ul>              |



| Objektnummer | Beginn der Messung | Luft / Wasser WP | Sole / Wasser WP | Neubau | Sanierung | Drehzahl-Regelung | Kühlung aktiviert | Anmerkungen:  |
|--------------|--------------------|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|---|
| 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<br/>=&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>   |
| 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 Glykol-mischung vor.</li> <li>• SCOP<sub>35</sub> = 5.6</li> </ul>   |

| Objektnummer | Beginn der Messung | Luft / Wasser WP | Sole / Wasser WP | Neubau | Sanierung | Drehzahl-Regelung | Kühlung aktiviert | Anmerkungen:   |
|--------------|--------------------|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|--|
| 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 ausschliesslichen 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>• Wärmepumpenboiler mit Aussenluft(!) (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden). Austausch 03.2019. Neues Modell hat 700 W Heizstab. Unterscheidung Heizstab vs. Verdichterbetrieb nicht mehr automatisch möglich</li> <li>• Aufgrund der zwei Wärmepumpen können die gemeinsamen Kennwerte JAZ+, COP+ nicht ermittelt werden<br/>=&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> |
| 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>   |

| Objektnummer | Beginn der Messung                     | Luft / Wasser WP | Sole / Wasser WP | Neubau | Sanierung | Drehzahl-Regelung | Kühlung aktiviert | Anmerkungen:  |
|--------------|--|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|---|
| 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<br>bewohnt ab<br>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>   |
| 18           | 15.03.2019                             |                  | x                |        | 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 und Nichtbewohnung 2020/21</li> </ul>                                  |

| Objektnummer | Beginn der Messung | Luft / Wasser WP | Sole / Wasser WP | Neubau | Sanierung | Drehzahl-Regelung | Kühlung aktiviert | Anmerkungen:  |
|--------------|--------------------|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|---|
| 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                 |                   | <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>  |
| 23           | 27.07.2019         | 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>  |

Die Höhe des Gebäudestandortes, die Energiebezugsfläche (EBF), die Anzahl der gemeldeten Personen sowie Informationen zum Wärmeverteilsystem (Radiator, 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     | Schaffhausen                     | 173                   | 478          | 4        | RH            |

In Abbildung 1 ist die geografische Verteilung der Wärmepumpenanlagen dargestellt.

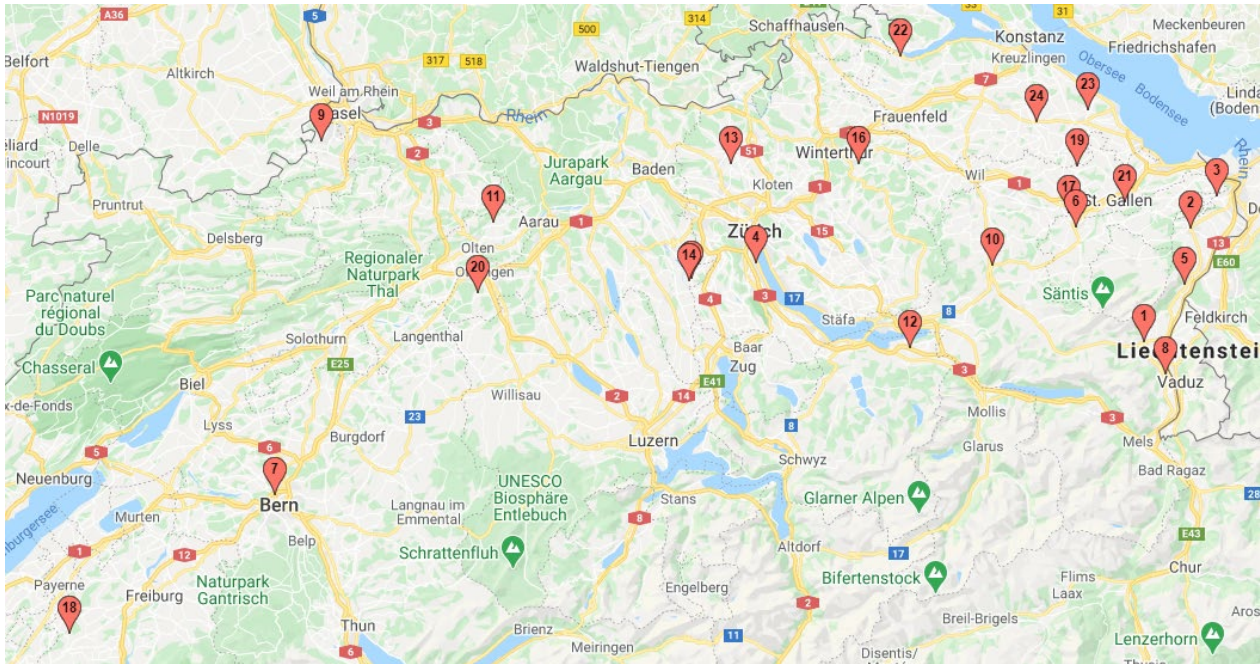


Abbildung 1: Standorte der Wärmepumpenanlagen (erstellt mit <http://batchgeo.com>)

## 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  $SNG_{TWW}$  beschrieben. Für die Messdatenauswertung werden folgende Formeln und Messgrößen verwendet:

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

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

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

Der Systemnutzungsgrad der Trinkwassernutzung ( $SNG_{TWW}$ ) beschreibt die Effizienz der gesamten Warmwasseraufbereitung, ausgehend vom tatsächlich genutzten Trinkwarmwasser ab Speicheraustritt. Der  $SNG_{TWW}$  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  $SNG_{TWW}$  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 Strombedarf genannt, ist unter  $E_{\text{Tot}}$  aufgeführt.

Die Kenngrössen Heiz- und Gesamtwärmebedarf beziehen die benötigte Heiz- bzw. Gesamtenergie auf die Energiebezugsfläche (EBF). Damit werden unterschiedliche Gebäudegrösse 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<sub>20\_12</sub> 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<sub>20\_16</sub> verwendet wird.

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

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

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.

Die Systemgrenze ist nicht nur örtlich, spezifisch zu den Anlagenkomponenten gezogen, sondern auch zeitlich. Hier werden die Betriebsziele «Heizen», «Warmwasser-Aufladung» und «Kühlen» unterschieden. Die elektrischen Standby-Stromverbräuche (Standby = Verdichterstillstand und kein Kühlbetrieb) werden entsprechend der Position des Umschaltventiles dem Heizbetrieb zugeordnet. Dementsprechend sind diese Standby-Verluste in den spezifischen Kennwerten für die Warmwasseraufladung (JAZ+<sub>Aufladung</sub>, WNG<sub>Aufladung</sub> und SNG<sub>TWW</sub>) nicht enthalten. Der Anteil der elektr. Standby-Verluste beträgt im energetischen Mittel ca. 3 % des gesamten elektrischen Jahresenergiebedarfs.



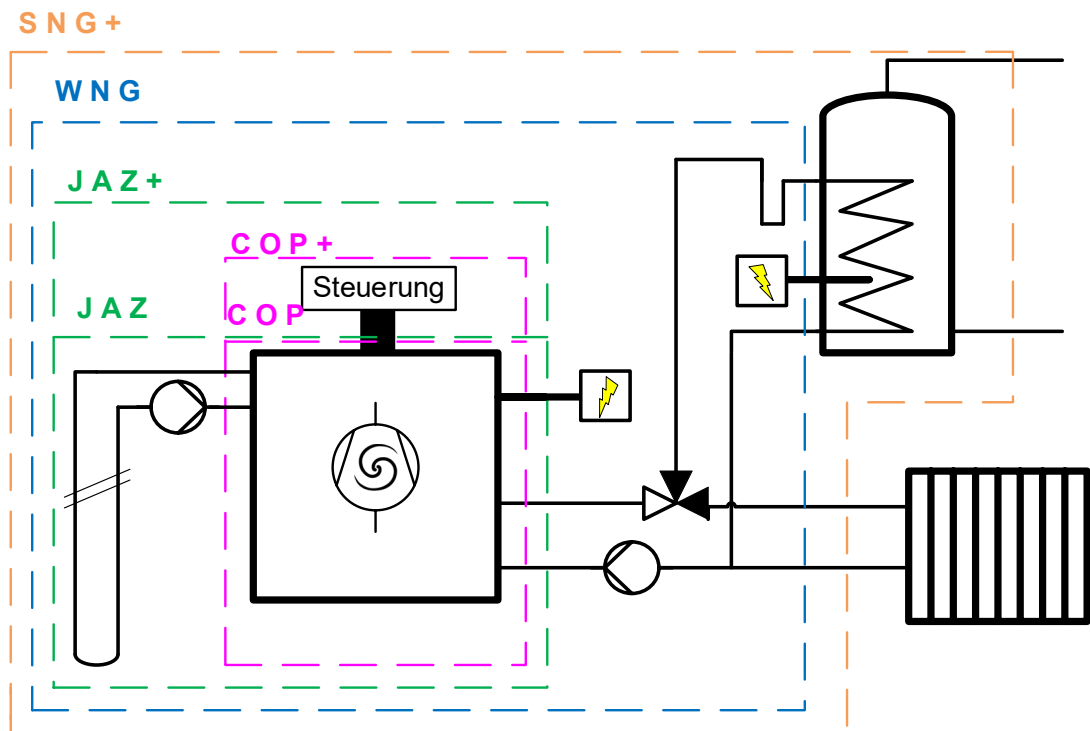


Abbildung 2: Vereinfacht dargestellte Systemgrenzen einer Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Direktheizkreis und Trinkwassererwärmung mittels Speicher.

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

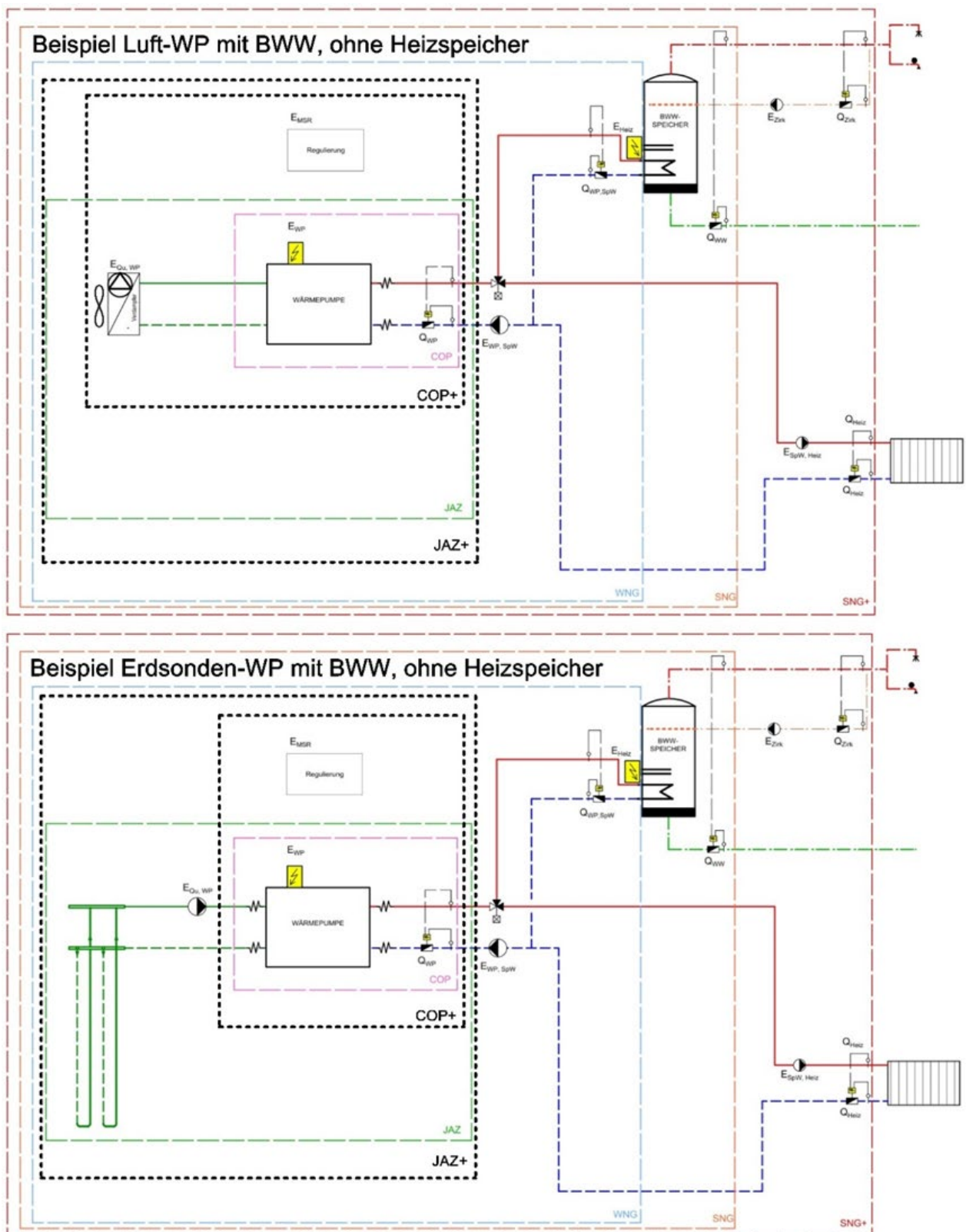


Abbildung 3: Systemgrenzen gemäss BFE für Luft- und Erdsonden-WP mit Trinkwasserspeicher, aber ohne Heizspeicher. Der Kennwert JAZ+ beinhaltet im Gegensatz zum COP+ den Energiebedarf der Quellen-Umwälzpumpe bei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

## 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. Senktemperatur 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 jedoch 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+ wird bei dem Wärmenutzungsgrad der elektrische Energiebedarf der Senkenumwälzpumpe, sowie die externen elektrischen Heizstäbe mitberücksichtigt. Dementsprechend spiegelt diese Kennziffer die Effizienz der Wärmeerzeugung aus Nutzersicht wider. Der Kennwert JAZ+ verdeutlicht hingegen die Effizienz der Wärmepumpe als einzelne Komponente.

Unterschiede ergeben sich durch den Einsatz des elektrischen Heizstabes im Trinkwarmwasserspeicher (z.B. aufgrund der «Legionellschaltungen») und der Umwälzpumpe, welche beim Wärmenutzungsgrad berücksichtigt werden. Der Einfluss der unterschiedlichen Quellen- und Senktemperaturen in den jeweiligen Heizperioden wird im folgenden Kapitel betrachtet. 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+ für diese Objekte bezieht sich deshalb nur auf den Heizbetrieb.

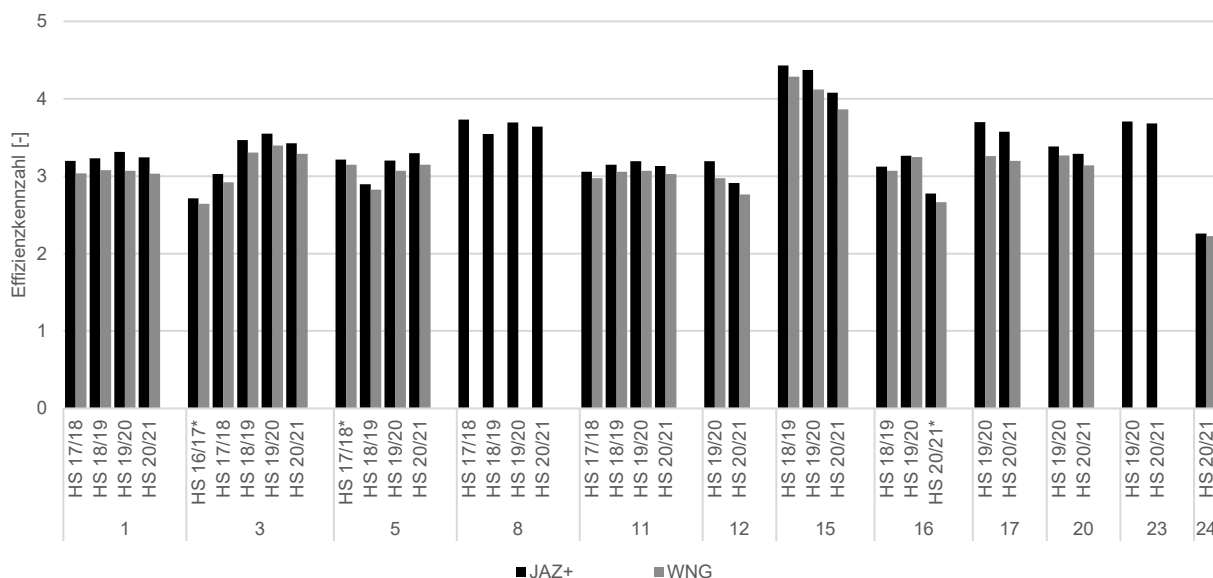


Abbildung 4: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Luft/Wasser-Wärmepumpensystemen

Den tiefsten WNG über eine gesamte Messperiode weist Anlage 24 mit 2.23 (2020/21) auf. Mit dieser neu aufgenommenen Anlage wird somit erstmals ein Wärmenutzungsgrad bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe von deutlich unter 3 gemessen. Den höchsten Kennwert erreicht Anlage 15 mit 4.29 (2018/19) dank sehr tiefer Vorlauftemperatur und einer gezielt höheren Heizanforderung während den wärmeren Nachmittagsstunden (→ höhere Quelltemperatur bei LW-WP, Details im Bericht «WP-Feldmessungen Jahresbericht 2018», Kapitel 4.3).

Mit einer Historie von bis zu fünf Messperioden können nun auch Veränderungen bei einzelnen Anlagen festgestellt werden. Die Gründe dafür sind nicht immer eindeutig bestimmbar. Ursächlich können klimatische Effekte durch unterschiedlich kalte Heizperioden oder unterschiedlich starke Solarstrahlung, eine veränderte Belegungssituation oder auch veränderte Einstellungen an der Heizungsanlage sein.

Grundsätzlich war der vergangene Winter deutlich kälter als die Heizperiode 2019/20 mit einem aussergewöhnlich milden Winter. Bis auf Anlage 5, bei welcher Veränderungen der Heizkurve vorgenommen worden sind, haben sich daher die Effizienzwerte leicht verschlechtert. Anlage 17 weist mit 11 % den grössten Unterschied zwischen WNG und JAZ+ auf. Dies ist durch eine ausgeprägte Legionellschaltung in der Trinkwarmwasseraufladung mittels Heizstab begründet. Die Effizienzsteigerung bei Objekt 3 von der Heizperiode 17/18 auf 19/20 ist durch die deutliche Anpassung der Heizkurve im Rahmen der durchgeführten Optimierungen begründet. Diese war durch eine Überhöhung des Pufferspeichers unnötig um ca. 10 K zu hoch (Bericht «WP-Feldmessungen Jahresbericht 2018», Kapitel 4.1).

In Abbildung 5 werden die gleichen Effizienzkennzahlen für die Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen dargestellt. Interessant sind die deutlichen Unterschiede zwischen JAZ+ und WNG, exemplarisch der Vergleich der letzten beiden Betrachtungsperioden bei Anlage 22. War der WNG in der ersten Messperiode noch um 25 % gegenüber der JAZ+ vermindert, sind es nun nur noch knapp 3 %. Diese Veränderung ist durch eine Anpassung der Legionellschaltung begründet (siehe Vorjahresbericht). Sinken die Effizienzwerte bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen durch die sehr kalten Aussentemperaturen, erreichen Sole/Wasser-Wärmepumpen einen höheren WNG (für Heizen und Aufladung), da sich das Wärmeverhältnis zugunsten des Heizbetriebes verschiebt. Der WNG\_Heizen bleibt bei den meisten Anlagen gemäss Abbildung 9 fast unverändert.

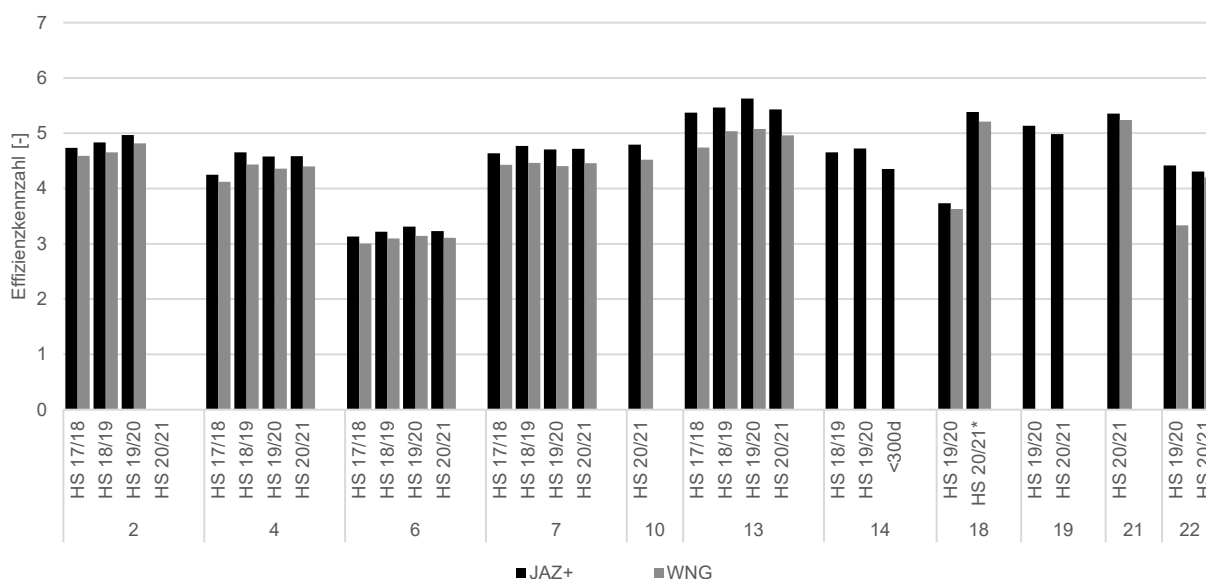


Abbildung 5: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Sole/Wasser-Wärmepumpensysteme

Mit der Auswertung der Sole/Wasser-Wärmepumpen wird die grosse Varianz der Jahresarbeitszahl (für Heizen und Aufladung) von 3.13 (Anlage 6, Heizperiode 2017/18) bis 5.63 (Anlage 13, Periode 2019/20) sichtbar, je nach Technologie der Wärmepumpe, der Quellentemperatur und des benötigten Temperaturniveau des Objektes. Bemerkenswert ist die hohe JAZ+ von über fünf bei den Anlagen 10, 13, 18, 19 und 21. Gründe hierfür liegen im Temperaturniveau der Wärmequelle und -senke, Details sind in Abbildung 9 dargestellt. Den tiefsten WNG über alle Heizperioden mit 3.0 weist Anlage 6 (bestehende Erdwärmesonde, solarthermische Heizungsunterstützung) auf, den höchsten WNG von 5.24 erreicht Anlage 21.

## 2.2 Einfluss des Temperaturniveaus

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Temperaturniveaus der Wärmepumpen gegenübergestellt. Herangezogen werden dabei nur jene Zeitbereiche, in welchen die Wärmepumpen in Betrieb waren. Entsprechend dem Betriebsmodus der Wärmepumpe («Heizbetrieb» oder «Aufladebetrieb») erfolgt die entsprechende Zuordnung.

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 und in Abbildung 7 die der Sole/Wasser-Wärmepumpen, unterschieden nach Betriebsmodus Heizen und Aufladung, dargestellt.

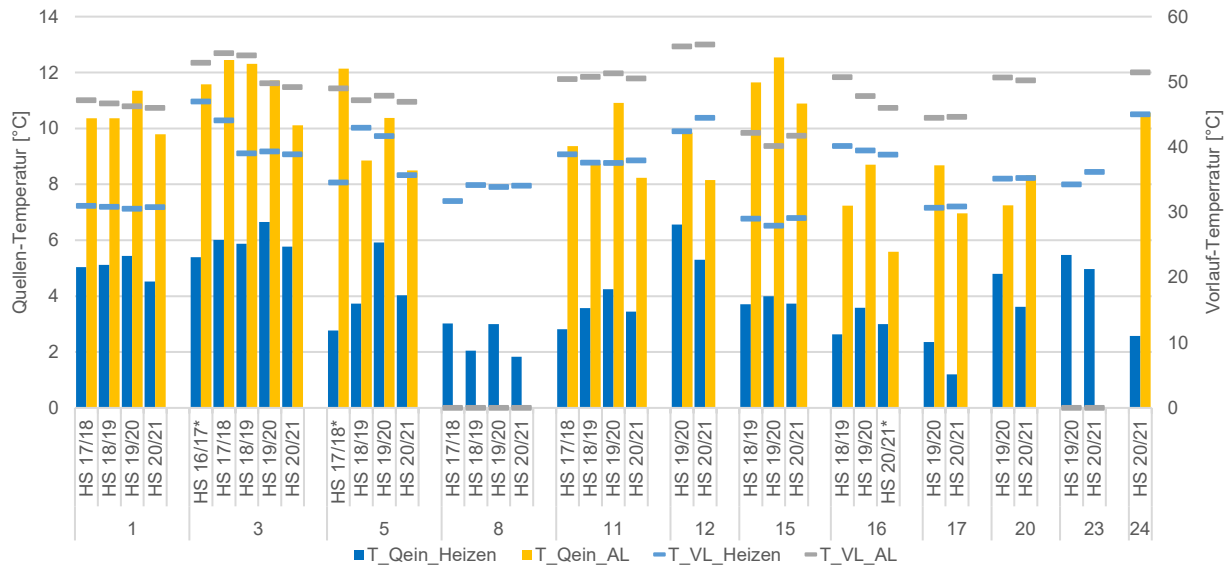


Abbildung 6: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Luftansaugung) und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsmodi «Heizen» und «Aufladung» für Luft/Wasser Wärmepumpen. Das Objekt 8 und 23 verfügt über eine zusätzliche Trinkwarmwasser-Wärmepumpe,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

Gut erkennbar ist der wieder etwas kältere Winter in der vergangenen Heizperiode bei sämtlichen Anlagen. Nach der Logik der aussentemperaturgeführten Vorlauftemperaturen sind die gemessenen Heiztemperaturen daher wieder etwas höher, Ausnahme bildet Anlage 3, 16 und insbesondere 5. Bei letzterer sind grössere Anpassung der Heizkurve durch Optimierungsversuche und anschliessend durch die Bewohner selber vorgenommen worden. Durch den zusätzlich kälteren Sommer sind auch die Lufttemperaturen während der Aufladung (T\_Qein\_AL) deutlich tiefer. Bei Anlage 20 konnten durch die Einstellung eines Zeitprogrammes der Aufladung auf den frühen Abend die Quellentemperaturen erhöht werden.

Objekt 15 weist die tiefsten Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb als auch in der Aufladung auf. Dies führt zu den besten Effizienzzahlen. Bei diesem Objekt wird das Trinkwasser mittels Frischwasserstation erwärmt.

Abbildung 7 zeigt die Auswertungen für Sole/Wasser-Wärmepumpen. Bei Objekt 6 muss diese den grössten Temperaturhub überwinden. Hier liegen niedrige Quellentemperaturen der bestehenden Erdwärmesonde mit sehr hohen Vorlauftemperaturen in der Senke für die Radiatoren vor. Bei Objekt 6 ist zudem eine Solarthermie-Anlage eingebunden. Dieser Wärmebeitrag wird nicht gemessen, weshalb die Energie- und

Kennwerte nicht den gesamten Bedarf wiedergeben und die Wärmepumpe die Nacherwärmung auf höherem Temperaturniveau leisten muss. Die Objekte 6 und 14 weisen die tiefsten Quellentemperaturen auf. Hier handelt es sich um bereits bestehende Erdwärmesonden. Diese waren mit der ersten Wärmepumpe schon knapp bemessen, die höhere Effizienz der neuen Wärmepumpen beansprucht die Sonde mit einem höheren Wärmeentzug zusätzlich. Je effizienter eine neue Wärmepumpe arbeitet, desto weniger elektrische Energie wird aus dem Stromnetz bezogen. Zum Bereitstellen derselben Heizwärme wird dann jedoch dem Erdreich mehr Wärme entzogen.

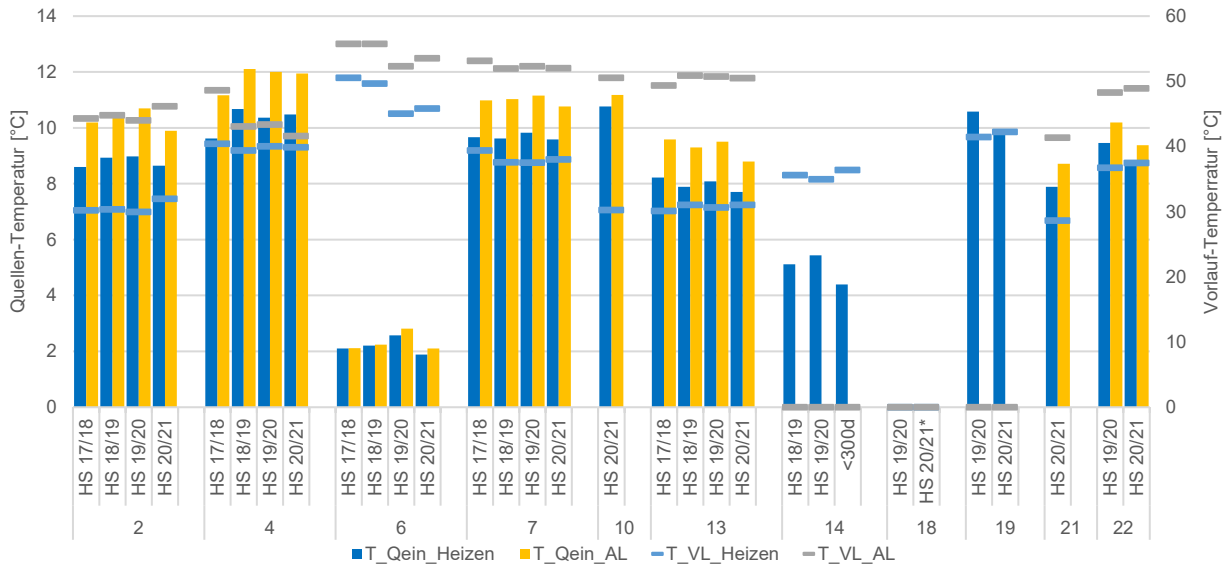


Abbildung 7: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Erdsondenvorlauf) und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsmodi «Heizen» und «Aufladung» für Sole/Wasser Wärmepumpen. Die Objekte 14 und 19 verfügen über eine zusätzliche Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.

Auch wenn die abfallenden Quellentemperaturen der Erdwärmesonden im Heizbetrieb (T\_Quin\_Heizen) in der letzten Betrachtungsperiode eine mögliche Auskühlung des Erdreichs suggerieren könnten, ist der deutlich höhere Wärmebezug durch die kältere Heizperiode zu berücksichtigen. Eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Quellentemperaturen zwischen Luft/- und Sole/Wasser-Wärmepumpen ist in Kapitel 2.5 beschrieben.

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

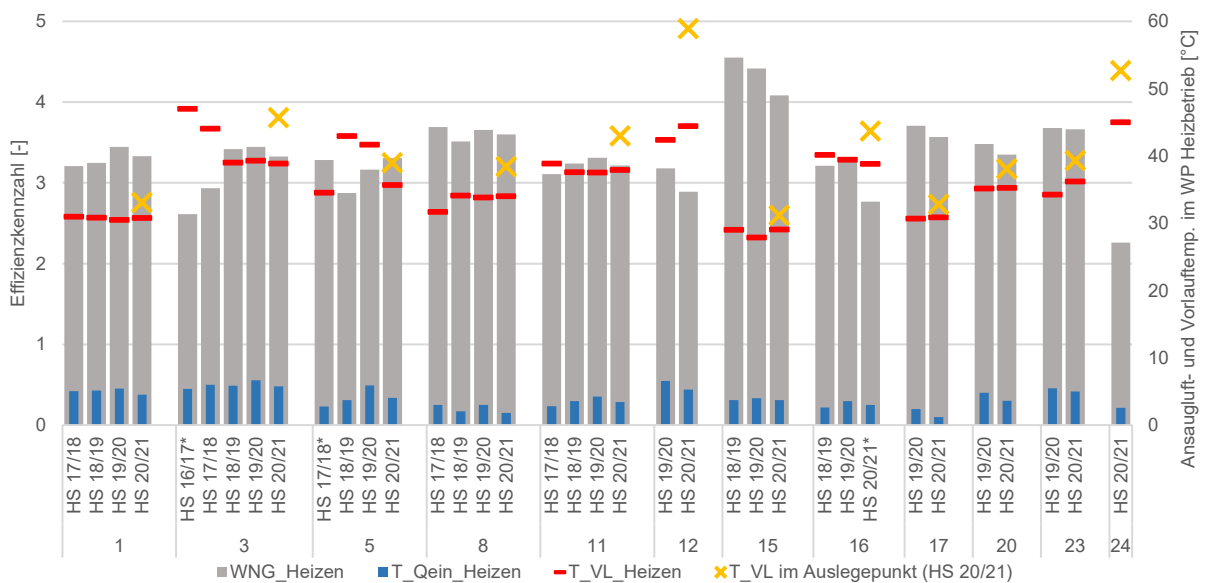


Abbildung 8: Wärmenutzungsgrad der Luft/Wasser-Wärmepumpen und die Temperaturen der Ansaugluft (blau) sowie des mittleren Senkenvorlaufs (rot) während des Heizbetriebs. Zusätzlich ist die Vorlauf-Temperatur im Auslegepunkt (gelbes Kreuz) dargestellt.

Dargestellt sind Jahresmitteltemperaturwerte (zeitgewichtet) ausschliesslich im Heizbetrieb. Eine grosse Distanz zwischen der blauen Säule (Quelleneintrittstemperatur) und dem roten Balken für die gemessene mittlere Vorlauftemperatur im Heizbetrieb veranschaulicht einen grossen Temperaturhub, welchen die Wärmepumpe bewerkstelligen muss. Grundsätzlich gilt, je geringer der Temperaturhub, desto effizienter (höherer WNG) arbeitet die Wärmepumpe. Zusätzlich sind in den Abbildungen die Vorlauftemperaturen im Auslegepunkt der Anlage mit einem gelben Kreuz eingetragen<sup>2</sup>. Bei Anlagen mit einer Fussbodenheizung liegt aufgrund der flacheren Heizkurve der Auslegepunkt nahe an der mittleren Vorlauftemperatur.

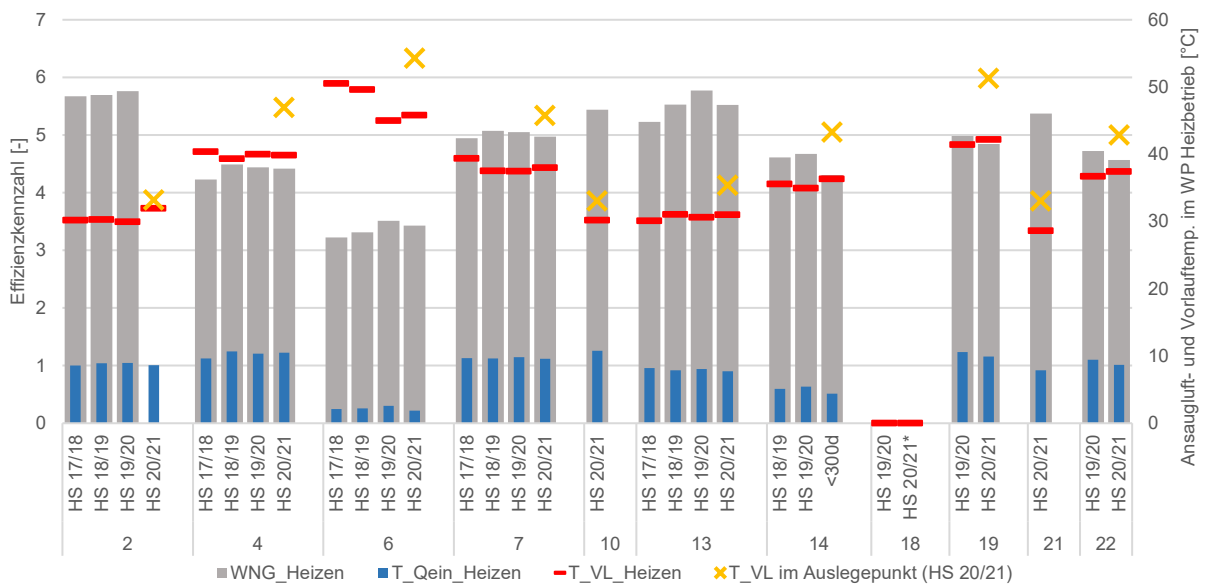


Abbildung 9: Wärmenutzungsgrad der Sole/Wasser Wärmepumpen und die Temperaturen der Erdwärmesonde (blau) sowie des Senkenvorlaufs (rot) während des Heizbetriebs. Zusätzlich ist die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt (gelbes Kreuz) dargestellt.

Über alle Heizperioden betrachtet erreichen neu errichtete Erdwärmesonden ein mittleres Temperaturniveau von meistens über 8 °C im Heizbetrieb. Die gemittelte Temperatur aller neuen Anlagen über sämtliche Perioden beträgt 9.4 °C im Heizen, bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen ist die Quelltemperatur der Ausenluft im Mittel von 4.3 °C im Heizbetrieb deutlich kälter.

Sichtbare Veränderungen an der Heizkurve sind durch deutliche Unterschiede der Vorlauftemperaturen zwischen den einzelnen Betrachtungsperioden unabhängig des Einflusses der Aussentemperatur erkennbar. Insbesondere bei den Anlagen 3, 5, 6 sowie 12 ist dies der Fall. Bei den Anlagen 6 und 12 sind die Änderungen durch die Bewohner getätigt worden.

### 2.3 Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung

In Abbildung 10 werden die drei Effizienzkennwerte ( $JAZ_{+AL}$ ,  $WNG_{AL}$  und  $SN_{G_{TWW}}$ ) der gemessenen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen dargestellt.

Die Jahresarbeitszahl  $JAZ_{+Aufladung}$  und der Wärmenutzungsgrad  $WNG_{Aufladung}$  beziehen sich auf die Effizienz der Aufladung. Demgegenüber steht der Systemnutzungsgrad  $SN_{G_{Aufladung}}$ , der die Trinkwarmwassernutzung in der Effizienzkennzahl mitberücksichtigt. Im  $SN_{G_{Aufladung}}$  sind somit die Wärmeverluste des Trinkwarmwasserspeicher, der Zirkulationsleitung und der heizungsseitigen Hydraulik (siehe Kapitel 2.7) erkennbar.

Die Jahresarbeitszahlen für die Trinkwassererwärmung mit Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen liegen zwischen 2.2 und 3.6 im Mittel über eine vollständig gemessene Heizperiode. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Systemgrenzen fällt auf, dass die Wärmenutzungsgrade  $WNG_{Aufladung}$  (Mittelwert aller Anlagen und Perioden von 2.58) im Schnitt 10 % niedriger liegen, als die Jahresarbeitszahlen  $JAZ_{+Aufladung}$  (2.88). Die

<sup>2</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.

maximale Abweichung von fast 40 % tritt bei Objekt 12 auf. Dieser Unterschied entsteht, da in der JAZ<sub>Aufladung</sub> der energetische Anteil des externen Heizstabes und der Senkenumwälzpumpe nicht berücksichtigt wird. Bei Objekt 12 wird eine tägliche Legionellenschaltung per Heizstab durchgeführt.

Die Effizienz des Nutzerverhaltens SNG<sub>TWW</sub> variiert bei den Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen zwischen 0.6 und 2.7. Hohe Systemnutzungsgrade SNG<sub>TWW</sub> von über 2 weisen die Objekte 1, 3, 5, 8, 15 und 23 auf. Der tiefste SNG<sub>TWW</sub> wird bei Objekt 12 aufgrund des genannten hohen Heizstabanteils in Verbindung mit einem geringen Trinkwarmwasserbezug gemessen.

Bei den Trinkwarmwasser-Wärmepumpen 8, 14, 19 und 23 kann die thermische Aufladeenergie nicht ohne grösseren Umbau und Eingriff in den Kältekreis des Messobjekts ermittelt werden. Daher wird diese nicht gemessen und der Wärmenutzungsgrad sowie der Trinkwarmwasserbedarf kann nicht ermittelt und dargestellt werden.

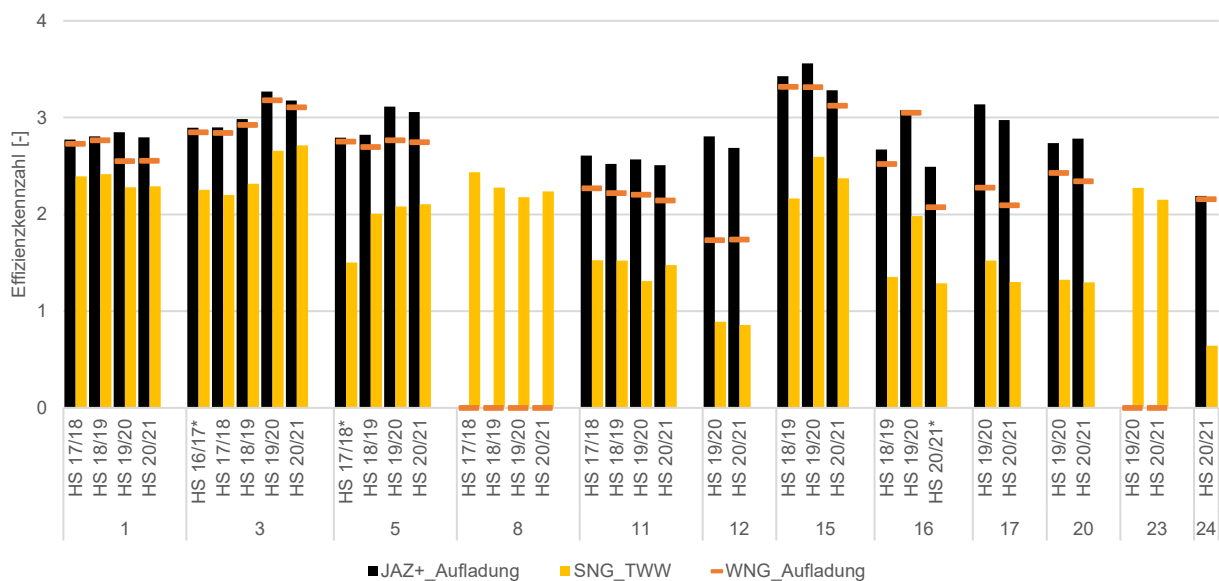


Abbildung 10: Jahresarbeitszahl JAZ<sub>Aufladung</sub>, Wärmenutzungsgrad WNG<sub>Aufladung</sub> und Systemnutzungsgrad SNG der Trinkwassererwärmung der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen.

Die Effizienz der Trinkwassererwärmung bei den Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen zeigt Abbildung 11. Hier liegen die Jahresarbeitszahl JAZ<sub>Aufladung</sub> zwischen 1.6 und 4.8. Die Wärmenutzungsgrade WNG sind im Schnitt 13 % tiefer als die JAZ<sub>Aufladung</sub> und variieren zwischen 1.4 und 4.7. Auffallend ist, dass der Unterschied dieser beiden Kenngrössen bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen deutlich grösser ausfällt als bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen. Die Effizienzkennzahlen bei Anlage 6 mit einer zusätzlichen Solaranlage sind nur bedingt aussagekräftig, da der Wärmeintrag nicht gemessen und die benötigten Temperaturniveaus durch die Solarthermie-Anlage für die Wärmepumpe erhöht werden.



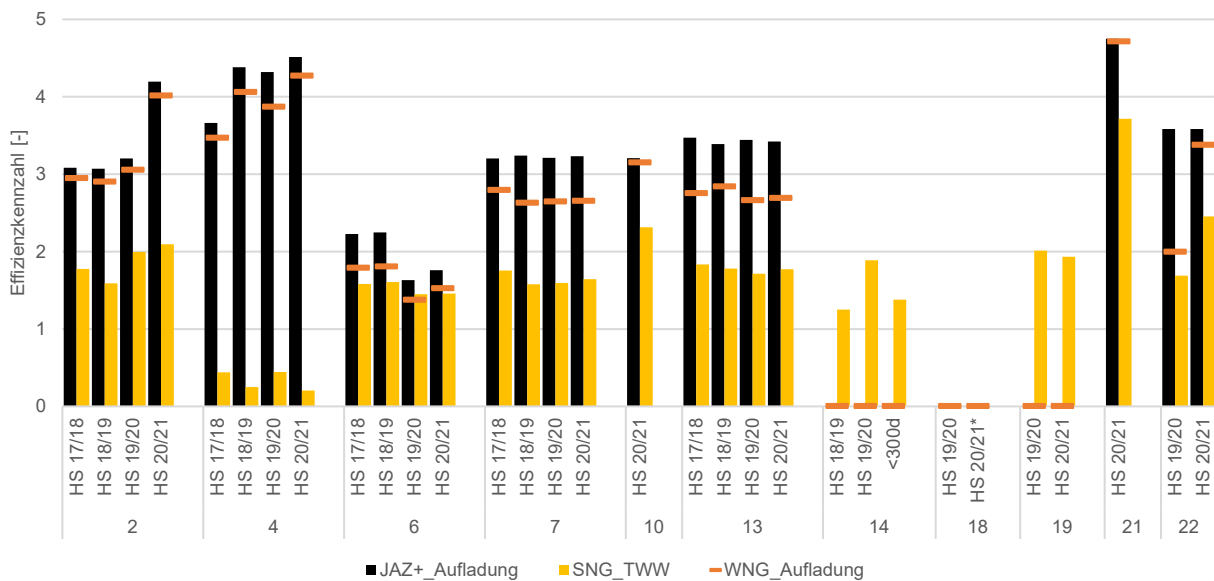


Abbildung 11: Jahresarbeitszahl JAZ+Aufladung, Wärmenutzungsgrad WNG\_Aufladung und Systemnutzungsgrad SNG der Trinkwassererwärmung der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen. Die grossen Unterschiede zwischen JAZ+ und WNG identifizieren ein energieintensives Legionellenschaltung.

Bemerkenswert ist der Unterschied zwischen Objekt 4 und 21. Beide Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden führen die Aufladung sehr effizient mit einem Wärmenutzungsgrad von über vier durch, der Systemnutzungsgrad inklusive der Wärmeverluste ist jedoch bei Objekt 4 am ineffizientesten (SNG<sub>TWW</sub> von 0.2). Dieser tiefe SNG<sub>TWW</sub> beruht auf einem sehr geringen Warmwasserbedarf von 28 l/d im Jahr 2018, 13 l/d in 2019 und unter 10 l/d in 2020 und 2021. Zusätzlich weist dieses Objekt noch eine vorhandene Schwerkraftzirkulation der Trinkwasserhydraulik auf, welche im Hinblick der Hygiene (und Energieeffizienz) zu hinterfragen ist.

Bei Objekt 22 ist die deutliche Einsparung an elektrischer Energie einer Anpassung der Legionellenschaltung zu verdanken. In der Periode 2019/20 war täglich eine zeitgesteuerte Erwärmung mittels Heizstab durchgeführt worden, welche den gesamten Speicherinhalt auf über 55 °C erwärmt hat.

Betonen möchten wir aber, dass ein sparsamer Warmwasserverbrauch trotz geringerer Effizienz die grösste Energieeinsparung bewirkt. Dies ist ebenfalls in Abbildung 12 mit der Darstellung der Aufladeenergie zur tatsächlich gezapften Wärmemenge erkennbar.

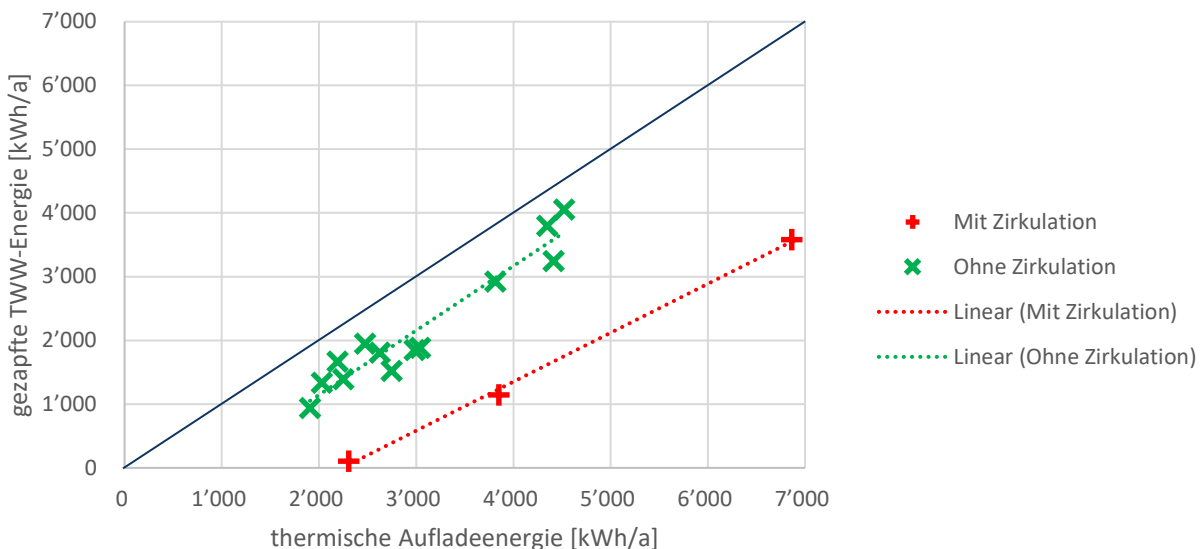


Abbildung 12: Vergleich der thermischen Aufladeenergie zur tatsächlich gezapften Wärmemenge im Trinkwarmwasser. In grün sind Anlagen ohne Zirkulation und in rot die drei Anlagen mit Zirkulation abgebildet. Es handelt sich hierbei um Messdaten, welche keine Planungsgrundlage darstellen

Die Darstellung der bereitgestellten Wärmemenge durch die Wärmepumpe und ggf. den elektrischen Heizstab zur Erwärmung des Trinkwassers zur tatsächlich genutzten bzw. gezapften Wärmemenge im Trinkwarmwasser zeigt deutlich die Wärmeverluste auf. Diese entstehen zum einen während der Aufladung in der Rohrhydraulik zwischen Wärmepumpe und Speicher sowie durch den Speicher mit seiner Oberfläche selbst. Eine zusätzliche Zirkulation erhöht die Wärmeverluste bedeutend. Die schwarze Linie zeigt den Idealfall ohne jegliche Wärmeverluste.

Entsprechend der bisherigen Analyse haben folgende Faktoren einen grossen Einfluss auf die Höhe des Systemnutzungsgrades  $SNG_{TWW}$ :

- Vorhandene Zirkulationsleitung
- Trinkwarmwassernutzung: Die genutzte Menge hat grossen Einfluss auf den  $SNG_{TWW}$ . Die Wärmedämmung des Speichers sowie eine zusätzliche Zirkulation haben massgeblichen Einfluss auf die benötigte Energiemenge zur Erwärmung des Trinkwassers. Hingegen hat die Effizienz der reinen Trinkwassererwärmung ( $WNG_{Aufladung}$ ) nur einen untergeordneten Einfluss auf den Systemnutzungsgrad.
- Legionellenthematik: Hier hängt es vor allem davon ab, wie die erhöhte Trinkwarmwassertemperatur erreicht wird. Bei vielen Anlagen wird aktuell nur mit einer Zeituhr der elektrische Heizstab aktiviert, ohne einer möglichen Vorerwärmung mithilfe einer wesentlich effizienteren Wärmepumpe. Mit der überarbeiteten SIA 385/1 wird jedoch eine grösstmögliche Vorerwärmung mittels Verdichter der Wärmepumpe gefordert. Dies sollte bei der Erstellung neuer Anlagen berücksichtigt werden. Es erfordert eine Abstimmung zwischen Installation, Inbetriebnahme und Service. Ist jedoch gut umsetzbar, erhöht die System-Wirkungsgrade und mindert den absoluten Energiebedarf.

## 2.4 Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage

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

|  |   |
|--|---|
| $QH_{HWB} = Q_{Heizen} / EBF$              | spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]                              |
| $GWB = (Q_{Heizen} + Q_{Aufladung}) / EBF$ | Gesamtwärmebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]   |
| $HGT_{20\_16}$                             | Heizgradtage [°C] mit Heizgrenze 16 °C und Raumtemperatur von 20 °C (Sanierung) |
| $HGT_{20\_12}$                             | 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 Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen variiert während der letzten Heizperiode zwischen 34 und 213 kWh/m<sup>2</sup> bei einer Betrachtung von ausschliesslich vollständig gemessenen Jahresperioden. Dieser Wert ist natürlich stark von der Bausubstanz abhängig. Der Trinkwarmwasserbedarf, abhängig je nach Nutzerverhalten, der Bewohnung sowie der Wärmeverluste der Hydraulik, weist eine Bandbreite von 3 bis 10 kWh/m<sup>2</sup> auf.

Abbildung 13 sagt nichts über die Effizienz der Heizungsanlage aus, sondern beschreibt den Energiebedarf des Gebäudes. Allgemein fällt der Unterschied zwischen Neubau und Altbau signifikant aus. Bei den Neubauten (bezieht sich nur auf dieses Feldmessprogramm) mit Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen ist der Bezug von Energie rund 3-mal kleiner als bei den Sanierungsobjekten. Daraus darf auf jeden Fall geschlossen werden, dass vor allem Wärmepumpenanlagen in Sanierungsobjekten möglichst effizient umgesetzt werden sollten, damit viel Strom eingespart werden kann. Durch den grösseren Heizwärmebedarf bei Altbauten führen Wärmepumpen jedoch auch zu einem höheren CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionspotenzial im Vergleich zu fossilen Feuerungen.

Mit Objekt 12 ist in der vorletzten Heizperiode das Gebäude mit dem höchsten spezifischen Gesamtwärmebedarf von ca. 213 kWh/m<sup>2</sup> in die Feldmesskampagne aufgenommen worden. In Kombination mit einem Fussboden- und Radiatorsystem kann diese hohe Heizwärme nur durch hohe Vorlauftemperaturen (im Jahresverlauf gemessener Mittelwert 42.4 °C in 2019/20 und 44.5 °C in 2020/21 mit einer leicht höheren Heizkurve) abgegeben werden. Dennoch kann ein bemerkenswerter Wärmenutzungsgrad im Heizbetrieb von 3.18 in 2019/20 sowie 2.89 in 2020/21 erreicht werden.

Abbildung 13 zeigt auch eindrücklich, wie sich das Verhältnis des Gesamtwärmebedarfs für Warmwasser (TWWB) und Wärme für Heizen (HWB) von lediglich 7 % bei Anlage 12 auf 32 % bei dem Neubauobjekt von Anlage 1 erhöht. Mit dieser Auswertung ist selbst bei einem Neubau in Minergie-Bauweise der Heizwärmebedarf mit einem Anteil von zwei Drittel noch markant hoch. Beeindruckend ist auch der tiefe Heizwärmebedarf von Objekt 24, handelt es sich doch hierbei um ein umfangreich saniertes Objekt aus dem Jahr 1975.

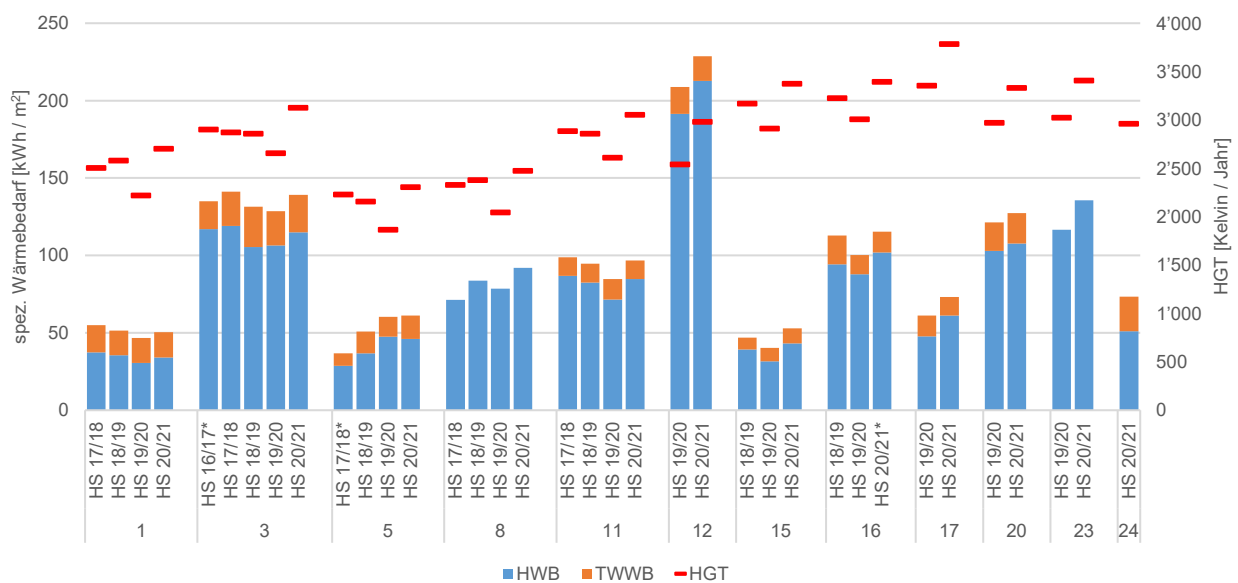


Abbildung 13: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfs (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Von Interesse ist natürlich auch, wie viel elektrische Energie das Gebäude für Heizen und die Aufladung benötigt. In Abbildung 14 ist daher der spezifische elektrische Energiebezug für die Heizungs- und Trinkwarmwassererzeugung dargestellt.

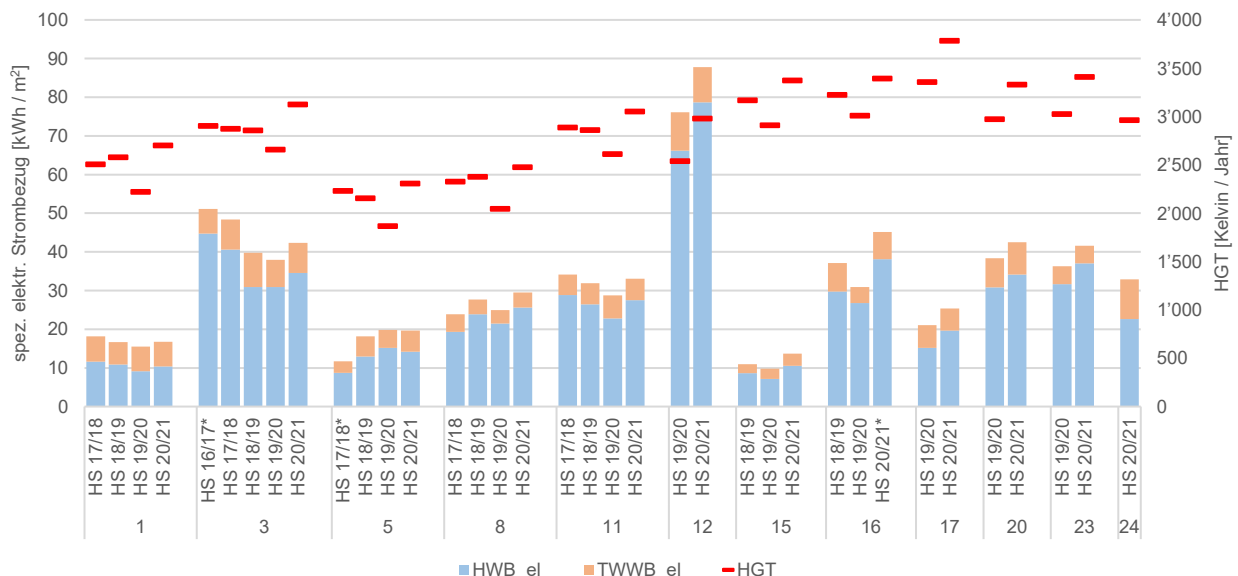


Abbildung 14: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m<sup>2</sup>, sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Speziell ist zum Beispiel der Vergleich von Objekt 5 und 24: Der spezifische Gesamtwärmebedarf ist ähnlich (61 vs. 73 kWh/m<sup>2</sup>), der elektrische Strombezug der Wärmepumpenanlage ist jedoch aufgrund der wesentlich geringeren Effizienz von Anlage 24 mit 33 kWh<sub>el</sub>/m<sup>2</sup> um 70% höher als bei Objekt 5 mit 20 kWh<sub>el</sub>/m<sup>2</sup>. Dieser Unterschied ist jedoch nur teilweise durch die 10 K höhere Vorlauftemperatur, die kältere Aussenlufttemperatur und die vorhandene Zirkulationsleitung begründbar.

Ab Abbildung 15 werden die Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen untersucht. Hier liegen die Heizwärmebedarfswerte zwischen 40 und 106 kWh/m<sup>2</sup> während der letzten, vollständig gemessenen Heizperiode. Der Trinkwarmwasserbedarf liegt im Bereich von 9 bis 23 kWh/m<sup>2</sup>. Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen wird nur ein Neubau gemessen, bei allen anderen Objekten handelt es sich um Bestandsgebäude. Auch hier zeigt sich, dass der Bedarf an Heizungswärme im Neubau um mindestens Faktor 2 geringer ist als bei den meisten Bestandsgebäuden.

Das neu aufgenommene Objekt 21 erreicht mit einem Heizwärmebedarf von 40.3 kWh/m<sup>2</sup> fast den Grenzwert von Minergie (38 kWh/m<sup>2</sup>a).

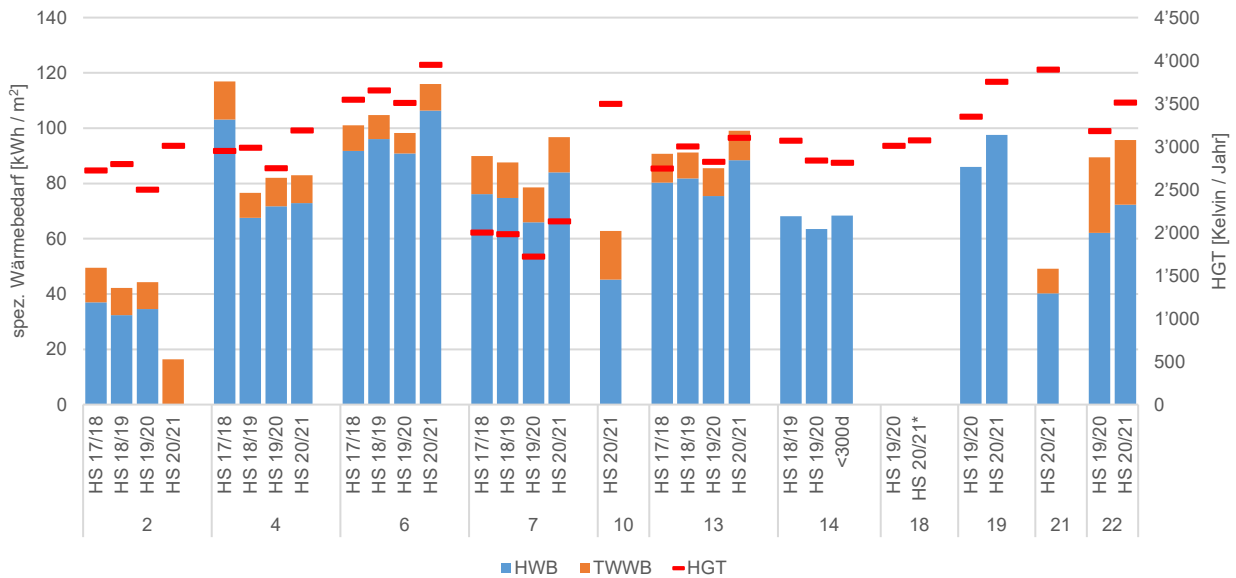


Abbildung 15: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfes (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Der Strombedarf der Gebäudeheizungsanlage ist in Abbildung 16 ersichtlich.

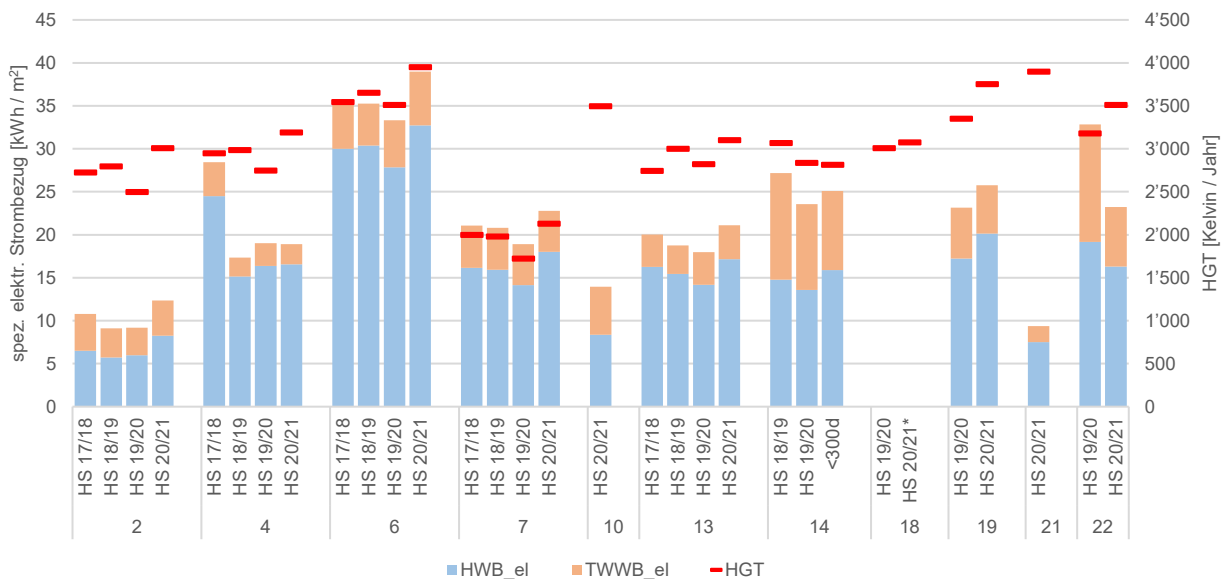


Abbildung 16: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m<sup>2</sup>, sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Auffallend ist der hohe elektrische Energiebedarf der Trinkwassererwärmung bei Objekt 14 und 22. Bei Objekt 14 wird eine Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler) mit Aussenluft betrieben. Der erste Wärmepumpenboiler ist nach einem Verdichterschaden im Frühjahr 2019 durch ein anderes Modell ausgetauscht worden. Jedoch führt auch dieses Gerät bei frostigen Aussentemperaturen die Aufladung rein elektrisch durch. Im Gegensatz zu herkömmlichen Luft/Wasser-Wärmepumpen haben Wärmepumpenboiler nur einen begrenzten Einsatzbereich bei sehr kalten Ansauglufttemperaturen.

Der in Kapitel 2.1 aufgezeigt Unterschied im Wärmenutzungsgrad zwischen Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen wird in den folgenden zwei Abbildungen mit der Betrachtung der Energiemengen nochmals verdeutlicht. Zur Bereitstellung der thermischen Heizenergie benötigen Sole/Wasser-Wärmepumpen aufgrund ihrer höheren Effizienz deutlich weniger elektrische Energie. Insbesondere bei bestehenden Gebäuden mit einem hohen Heizwärmebedarf ist dieser Effizienzunterschied beachtlich. Bei einem Gebäude mit einem Heizwärmebedarf von 20 MWh benötigt eine Luft/Wasser-Wärmepumpe im Mittel 2'000 kWh mehr elektrische Energie (schwarzer Doppelpfeil). Objekt 6 weist aufgrund der tiefen Temperaturen der Erdwärmesonde in Verbindung mit hohen Vorlauftemperaturen einen geringeren WNG auf als durchschnittliche Sole/Wasser-Wärmepumpen. Die neu errichtete Anlage in Objekt 22 stellt mit weniger elektrischen Energie über 8'000 kWh mehr Wärme bereit.

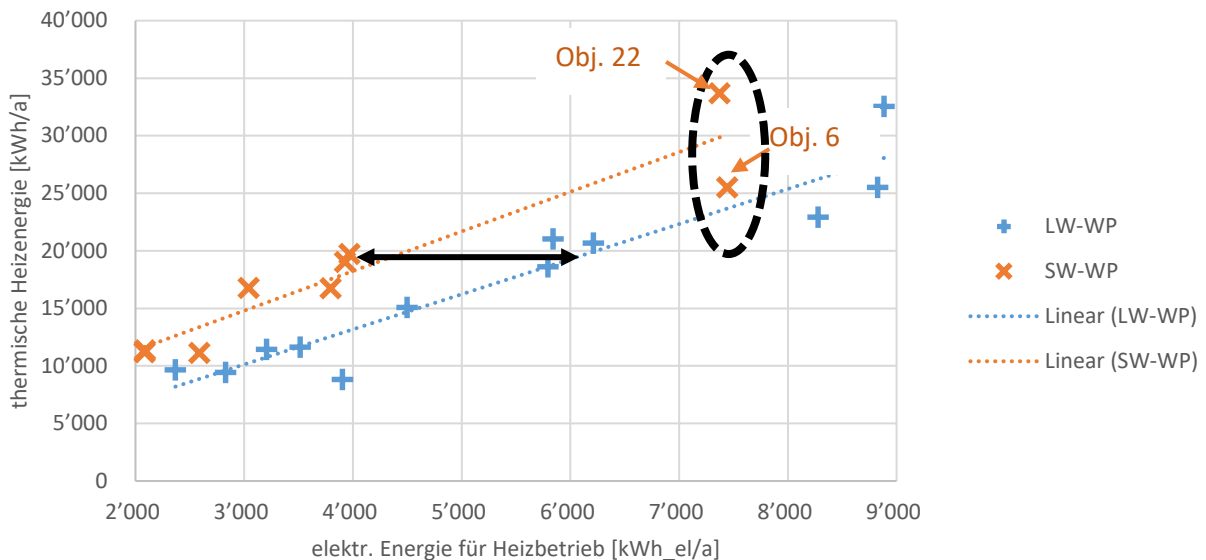


Abbildung 17: Elektrischer Energiebezug und Bereitstellung der thermischen Heizenergie für Luft/Wasser (LW-WP) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (SW-WP)

Abbildung 18 zeigt den Effizienzunterschied im Wärmenutzungsgrad (nur Heizbetrieb) in Abhängigkeit des spezifischen Heizwärmebedarf des Gebäudes. Zur Bereitstellung eines hohen Heizwärmebedarfs benötigt es hohe Vorlauftemperaturen in Radiatoren-Systemen, welche die Effizienz der Wärmepumpenanlage vermindern. Dennoch kann diese Aussage nicht pauschalisiert werden. Bei Gebäuden mit einem sehr geringen Wärmebedarf sind erhebliche Unterschiede im WNG erkennbar. Objekt 24 als Sanierung verfügt noch über Radiatoren, Objekt 15 erreicht ebenfalls mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe dank sehr tiefen Vorlauftemperaturen eine fast doppelt so hohe Effizienz. Ohne das Objekt 6 wäre die orange gemittelte Gerade der Sole/Wasser-Wärmepumpen wesentlich flacher und damit deutlich über der blauen Gerade der Luft/Wasser-Wärmepumpen.

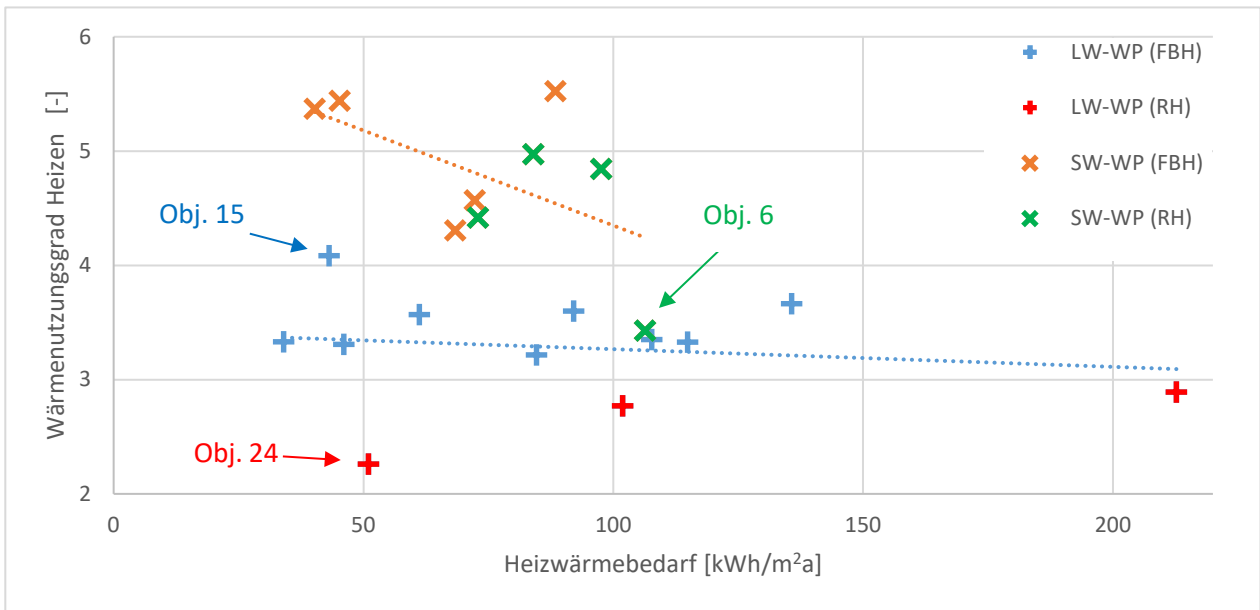


Abbildung 18: Wärmenutzungsgrad Heizen (WNG) in Abhängigkeit des spezifischen Heizwärmebedarfs (HWB). Farblich unterschieden sind die Wärmeabgabesysteme für Fussbodenheizung (FBH) und Radiatoren (RH)

### 2.5 Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb

Abbildung 19 zeigt den Vergleich des durchschnittlichen Temperaturniveaus der Energiequellen Aussenluft (LW) und Erdwärmesonde (SW) in den Betriebsmodi Heizen (gelb) und Heizen mit Aufladung (grün). Bei letzterem werden somit die Quellentemperaturen beim Verdichterbetrieb der gesamten Messperiode berücksichtigt. Daher ergibt sich bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen aufgrund der jahreszeitlich höheren Temperaturschwankungen ein grösserer Unterschied (Heizen nur im Winter im Gegensatz zur ganzjährigen Aufladung). Dennoch muss beachtet werden, dass der weitaus grösste Energiebedarf im Winter benötigt wird. Details zu den einzelnen Objekten sind in der Auswertung im vorherigen Jahresbericht zu finden. Im Vergleich zur Vorjahresperiode war die Witterung deutlich kälter, die durchschnittliche Quellentemperatur bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen ist mit 3.7 °C um ein Kelvin kühler. Die Temperaturunterschiede bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen resultieren aufgrund der unterschiedlichen geografischen Höhenlagen zwischen 393 bis 834 m ü.M..

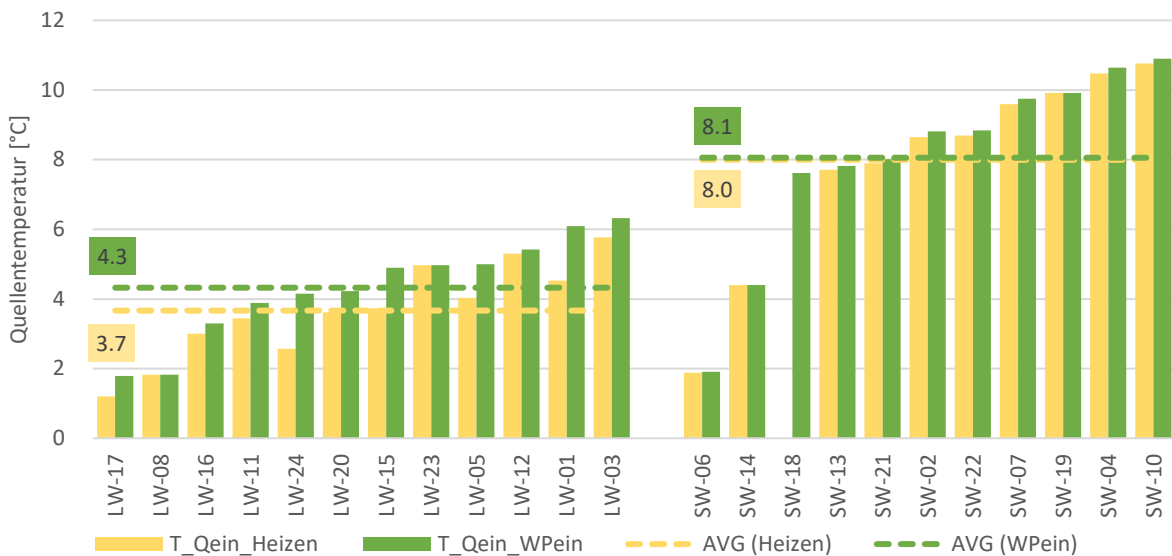


Abbildung 19: Quellentemperaturen im Heizbetrieb und gesamt, getrennt nach Luft/Wasser- (LW) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (SW), aufsteigend sortiert

Die Temperatur der Erdwärmesonden nahm im Vergleich zur Vorjahresperiode im Mittel nur um 0.3 K ab. Sehr eindrücklich bleibt das deutliche unterschiedliche Temperaturniveau zwischen bestehenden (SW-06 und SW-14) und neu errichteten Erdwärmesonden. Die dazumal eher sparsam ausgelegten Sonden werden nun durch den Austausch einer neuen effizienteren Wärmepumpe zusätzlich belastet, da jetzt mehr Wärme aus dem Erdreich und weniger elektrische Energie bezogen wird.

Analog zum vorherigen Bericht werden mit der folgenden Abbildung 20 die Aussentemperaturen der Luft/Wasser-Wärmepumpen im Detail betrachtet. Mit Hilfe der zwei Temperatursensoren, ein Aussentemperaturfühler an der Hausfassade in der Nähe des Heizungsfühlers und ein Quellentempersensor direkt am Verdampfeintritt kann ein möglicher Luftkurzschluss der Wärmepumpe sowie sog. «Kaltluftseen» ausfindig gemacht werden. Um mögliche Fehler aufgrund der Sonneneinstrahlung und Erwärmung der Fassade zu vermeiden, wird in dieser Auswertung nur der Heizbetrieb während der Nacht (22 bis 7 Uhr) berücksichtigt. Dennoch kann eine erwärmte Fassade oder eine Wärmebrücke ins Gebäude die Temperaturmessung des Aussenfühlers beeinflussen. (Bei Anlage 1 könnte der tagsüber aufgewärmte geteerte Vorplatz für eine höhere Luftansaugtemperatur der innenaufgestellten Wärmepumpe sorgen).

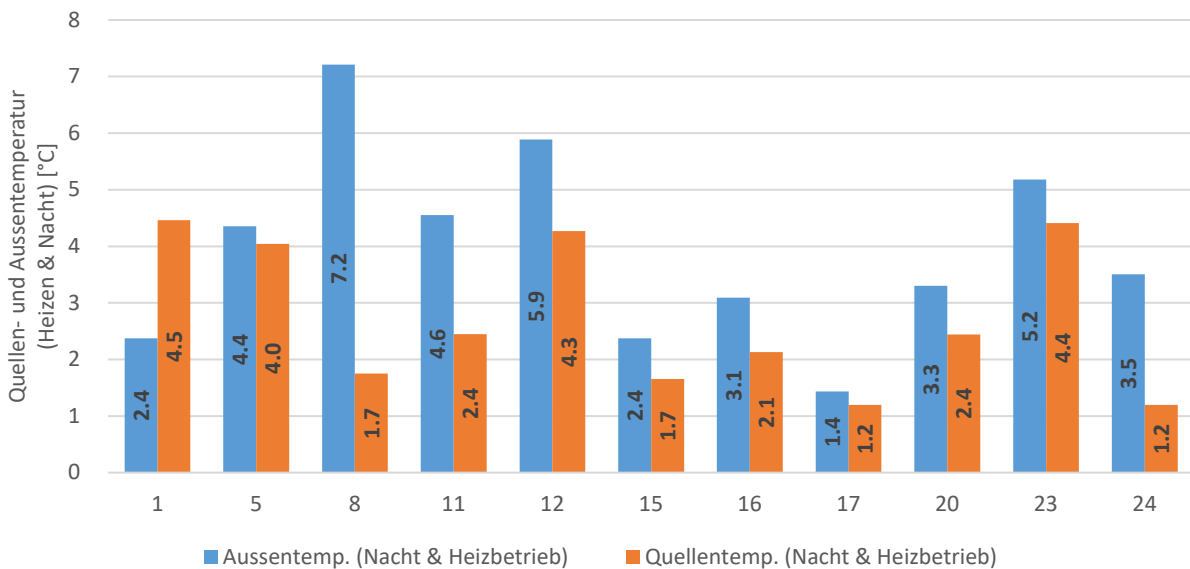


Abbildung 20: Aussentemperaturen und Quellentemperaturen während der Nacht (22 bis 7 Uhr) und im Heizbetrieb der unterschiedlichen Luft/Wärmepumpen in der Heizsaison 2020/2021.

## 2.6 Temperaturverlauf der Erdwärmesonden

Bei neu erstellten Erdwärmesonden wird häufig in der Praxis ein deutlicher Temperaturabfall nach den ersten Betriebsjahren angenommen, jeweils abhängig von der Geologie und der Auslegung der Wärmeentzugsleistung und -menge. Mit der Feldmessung können die ersten Anlagen über eine Betriebsdauer von vier Jahren analysiert werden. Mit der letzten deutlich kälteren Heizperiode kann nun in Abbildung 21 ein leichter Temperaturabfall bei Anlage 7 festgestellt werden. Dieser beruht aber viel mehr aufgrund der höheren entzogenen Wärmemenge und vermutlich nicht über ein kontinuierliches Auskühlen der Sonde. Dennoch sind in diesem Sommer die höchsten Sondentemperaturen von 13 °C nicht mehr ganz erreicht worden. Der Einfluss des Wärmebezugs ist auch im Vorjahr erkennbar: Bedingt durch den milden Winter stieg die Quellentemperatur im Jahresmittel etwas an.

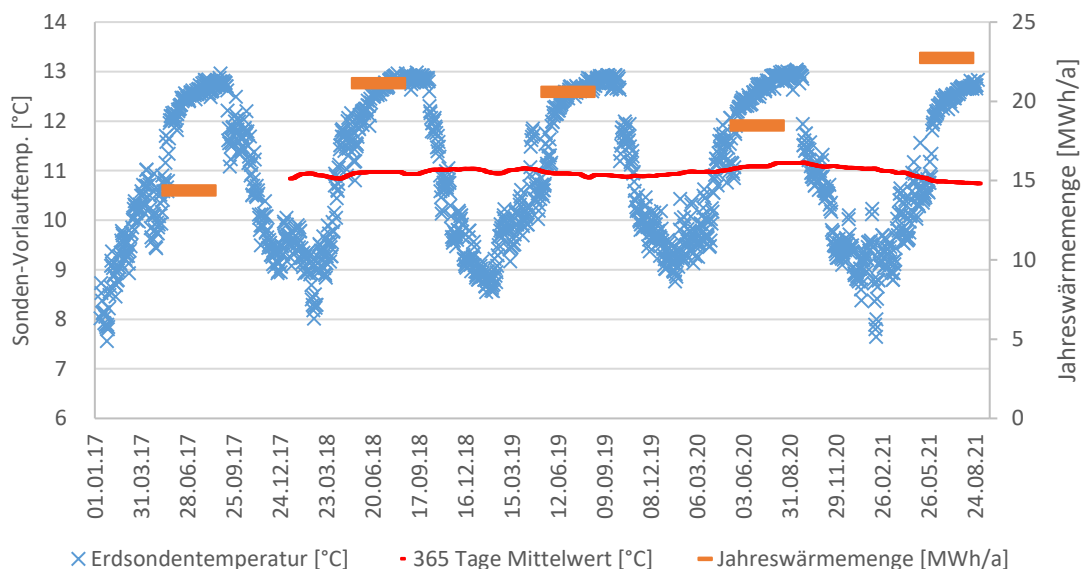


Abbildung 21: Anlage 7 ohne Kühlung bzw. Regeneration der Erdwärmesonde, On-/Off-Wärmepumpe

## 2.7 Vorkommnisse, Optimierungen und diverses

Bei Anlage 20 konnte die Aufladeanzahl durch ein Zeitprogramm auf nur noch einmal täglich reduziert werden. Aufgrund eines sehr günstigen Niederstromtarifs hat sich der Bewohner gegen eine etwas energieeffizientere Aufladung zur Mittagszeit mit den höchsten Aussentemperaturen entschieden. Bei der Detailanalyse sind erhöhte Wärmestillstandsverluste beim Speicher für das Trinkwarmwasser mit ca. 3.35 kWh pro Tag aufgefallen. Nach Typenschild des Speichers dürfte dieser nach Normmessung bei 60 °C Durchladung ohne hydraulische Anschlüsse jedoch nur 1.64 kWh verlieren. Aufgrund dieser grossen Abweichungen sind Ende Juni Messungen mit ausschliesslichem Betrieb des Heizstabes im Speicher durchgeführt worden. Hierbei sind die täglichen Wärmestillstandsverluste mit ca. 2.47 kWh deutlich geringer, aber noch immer erhöht gegenüber den Herstellerangaben. Somit fällt eine Hälfte der Wärmeverluste auf den hydraulischen Anschluss (Rohrleitung Wärmepumpe bis Speicher). 0.88 kWh Wärmeverluste treten von der Wärmepumpe zum entfernten Speicher auf. Der Grossteil der Verluste mit 2.47 kWh entstehen also am Speicher und dem Warmwasserabgang. Dies ist jedoch umso erstaunlicher, da am Abgang nachträglich ein Wärmesiphon verbaut worden ist, der diese Verluste aber nicht reduzieren konnte. Insgesamt stehen die Verluste von 3.35 kWh nur einer gezapften Wärmemenge von 4.18 kWh gegenüber, Detailwerte siehe Tabelle 4.



Abbildung 22: Trinkwarmwasser Speicher Anlage 20. Rechts nachträglicher Einbau eines Siphons. Direkt am Abgang die zweifache redundante Temperaturmessung



Die Thematik der Wärmestillstandsverluste beim Trinkwarmwasser ist ebenfalls bei Anlage 17 untersucht worden. Diese fallen mit 2.34 kWh täglich deutlich geringer aus und sind nahe an den Herstellerangaben des Speichers von 2.2 kWh. Bei ausschliesslichem Heizstabbetrieb konnten Werte von ca. 2.0 kWh gemessen werden. Somit entfallen auf die kurze Rohrhydraulik zwischen WP und Speicher nur geringe Wärmeverluste.

Bei Anlage 16, einer aussenaufgestellten leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpe (Monobloc), trat im Dezember 2020 ein schleichender Verdichterschaden mit abnehmender Heizleistung und Effizienz auf, sodass der Verdichter am 12.01.2021 in Garantie ausgetauscht worden ist. Nach Aussage des Servicetechnikers lag die Ursache an der Überhitzung des Frequenzumformers. Somit ist der Verdichter lange Zeit nur auf niedriger Drehzahl gelaufen, weshalb die Ölrückführung und Schmierung der Scrollscheibe nicht mehr ausreichend war.

Bei der Anlage 18 musste eine defekte Quellenpumpe für die Erdwärmesonde ausgetauscht werden. Aufgrund von weiteren Umbauarbeiten und teilweisem Leerstand des Gebäudes stehen zu wenige auswertbaren Messdaten für die Periode 2020/21 zur Verfügung.

## 3. Spezialauswertungen im Detail

### 3.1 Warmwasser – Regelstrategien

Aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten bei der Regelstrategie zur Aufladung des Trinkwarmwassers soll diese Thematik quantitativ und qualitativ genauer aufgearbeitet werden. Betrachtet werden die 17 Anlagen mit Wärmepumpe und Trinkwarmwasserspeicher. Die vier Trinkwarmwasser-Wärmepumpen werden separat im Folgekapitel analysiert.

Bei der Datenbetrachtung gilt es zu beachten, dass für die Analyse der Regelkonzepte nur auf die Messdaten der Anlagen zurückgegriffen werden kann und somit eine gewisse Restunsicherheit besteht. Die genauen Einstellungen am Regler der Wärmepumpe sind nicht bekannt. Eine Dokumentation dieser wäre auch nur bedingt möglich, da Änderungen von Seiten der Bewohner sowie der Servicetechniker nicht immer vollumfänglich nachgeführt werden könnten.

Mit elf Anlagen ist nach Tabelle 3 die bedarfsgesteuerte Nachladung des Trinkwarmwassers die am häufigsten eingestellte Regelstrategie. Dadurch kann es auch zu mehreren Aufladungen am Tag kommen. Die Durchführung der Aufladung zur Mittagszeit bzw. am frühen Nachmittag führen nur zwei der Luft/Wasser-Wärmepumpen gezielt aus. Bei den anderen Objekten ist dies auch nach den Durchführungen der Optimierungen nicht möglich (Einstellung am Regler, Bedarf) oder generell nicht gewünscht (stets hoher Komfort, günstigerer Strom-Nachttarif).

Anlagen mit einer Zeitsteuerung weisen generell weniger Aufladungen auf, exemplarisch nach Tabelle 4 hierzu Anlage 20 mit genau einer täglichen Aufladung. Die gezapfte Temperatur des Trinkwarmwassers kurz vor der nächsten Aufladung ist bei keiner Anlage deutlich unter der mittleren Zapftemperatur. Dies bestätigt auch die Auswertung der mittleren Zapfmenge pro Aufladung. Im Schnitt wird nur ein Viertel des Speichervolumens bis zur nächsten Aufladung gezapft. Anlage 4 ist mit einem Zapfvolumen von nur sieben Litern je Aufladung ein Ausnahmefall. Die beste Speicherausnutzung weist Anlage 3 auf. Interessant ist auch die Auswertung zur Variation der in den Speicher geladenen Wärmemenge je Aufladung, welche mit dem Variationskoeffizienten<sup>3</sup> ausgewertet wird. Dieser müsste eigentlich bei einer bedarfsorientierten Regelung ziemlich konstant sein; wird diese doch immer bei einer bestimmten Temperatur am Speicherfühler durchgeführt. Sie dürfte sich nur bei einem gleichzeitigen Wasserbezug während der Aufladung erhöhen. Bei einer zeitgesteuerten Aufladung hingegen kann die nachzuladende Wärmemenge je nach Bedarf variieren. Die Auswertungen aus den Feldmessungen liefern hierzu jedoch kein schlüssiges Ergebnis. Beachtet werden muss auch die Notwendigkeit einer Nachladung durch die kontinuierliche Auskühlung des Speichers ohne Wasserbezug. Insbesondere bei einer Ferienabsenz ohne Bezug kühlt der komplette Speicher aus und wird nicht wie im Alltag durch nachfliessendes kaltes Wasser von unten nach oben geschichtet. Eine eindeutige Auswertung liefern hingegen die mittleren Wärmeverluste pro Tag im Vergleich zum täglichen Trinkwarmwasser-Bedarf und der Speichergrösse. Diese liegen zwischen 1.28 und 3.35 kWh, Anlagen mit einer Zirkulation weisen hingegen über drei Mal höhere Werte von 6 bis 9 kWh pro Tag auf. Beispielsweise wird bei Anlage 24 nur ein Drittel der Aufladeenergie tatsächlich in Form von Trinkwarmwasser genutzt, zwei Drittel gehen als Wärmeverluste verloren.

<sup>3</sup> Zur Analyse des Streuungsmasses wird der dimensionslose Variationskoeffizient (Quotient empirische Standardabweichung und arithmetischem Mittel) aus den monatlichen Mittelwerten verwendet.

Tabelle 3: Regelstrategien, Messwerte und Besonderheiten bei der Aufladung des Trinkwarmwassers

| Objekte | Eigenschaften | Aufladung: Temperaturgesteuert (T) oder übergeordnete Zeitsteuerung (ZS) | Legionellenschaltung: nein - wöchentlich (w) - täglich (t) | Legionellenschaltung: nach Verdichter, mit Verdichter oder rein zeitgesteuert | PV «optimiert»: mit Wärmepumpe (WP) oder Heizstabsersatz (HS) | LW-WP: Aufladung Mittagszeit (wegen höherer Quellentemp.) | Maximal Aufladetemperatur der Wärmepumpe | Maximal gezapfte TWW-Temperatur | Mittlere TWW-Temperatur während Zapfung | Mimimale TWW-Temperatur vor nächster Aufladung (AVG der handabgelesenen Mimimas) | Zirkulation (Schwerkraft, Pumpe periodisch, Pumpe dauerhaft) | Ferienabsenz – Sparprogramm? | bei n-reg Laderegelung: nach Vorlauftemp., Fix-Speed (kW), geregelt |
|---------|---------------|--|--|---|---|---|--|---------------------------------|---|--|--|------------------------------|---|
| 12      | LW, Sa, d     | ZS   | t  | z   |   | nein  | 65                                       | 57                              | 51.9                                    |  |  | nein                         | 9   |
| 3       | LW, Sa, d     | T  | nein   | nein  |   | nein  | 63.1                                     | 56.5                            | 51.8                                    | 49.8   |  |                              | 10  |
| 20      | LW, Sa, fix   | ZS   | w  | n   |   | nein  | 59.6                                     | 52.9                            | 49                                      | 46.9   |  |                              |   |
| 24      | LW, Sa, d     | ZS   | w  | n   | nein  | ja  | 58.7                                     | 54.1                            | 47.2                                    | 46.6   | ja   |                              | 8   |
| 11      | LW, Sa, d     | T  | w  | n   |   | nein  | 58.3                                     | 51.1                            | 48.8                                    | 50.1   |  | nein                         | g   |
| 5       | LW, NB, fix   | T  | w  | m   | HS <sup>1)</sup>  | nein  | 57.5                                     | 50.7                            | 48.2                                    | 47.9   |  | nein                         |   |
| 1       | LW, NB, fix   | T  | w  | z   |   | nein  | 56.6                                     | 50.1                            | 48.8                                    | 48.3   |  |                              |   |
| 16      | LW, Sa, d     | T  | w  | z   |   | nein  | 56                                       | 50.2                            | 46.4                                    | 45.2   |  | nein                         | 8.5 <sup>3)</sup>   |
| 17      | LW, Sa, d     | T  | w  | z   |   | nein  | 55.7                                     | 48.8                            | 44.4                                    | 43.3   |  |                              | g 7.5 <sup>4)</sup>   |
| 15      | LW, Sa, d     | T  | nein   | nein  | WP  | ja  | 47.9                                     | 44.5                            | 37.5                                    | 38.0   |  |                              | g   |
| 7       | SW, Sa, fix   | T  | w  | z   |   |   | 60.1                                     | 57.9                            | 54.7                                    | 52.9   |  |                              |   |
| 10      | SW, Sa, fix   |  | nein   | nein  |   |   | 58.9                                     | 53.9                            | 49.3                                    | 51.2   |  |                              |   |
| 13      | SW, Sa, d     | T  | w  | z   |   |   | 57.4                                     | 52.2                            | 47.7                                    | 51.8   |  | nein                         | 4   |
| 22      | SW, Sa, d     | T  | w  | n   |   |   | 55.1                                     | 48.8                            | 46.8                                    | 45.1   |  |                              | t   |
| 2       | SW, NB, d     | T  | nein   | nein  |   |   | 53.2                                     | 48.8                            | 46.7                                    | 43.4   | ja   |                              | 10  |
| 21      | SW, Sa, d     | ZS   | nein   |   |   |   | 50.7                                     | 45.9                            | 41.5                                    | 42.0   |  | nein                         | 4.5   |
| 4       | SW, Sa, d     | T  | nein   | nein  |   |   | 46.2                                     | 41.9                            | 40.3                                    | 37.6   | S  |                              | 5   |

LW = Luft/Wasser-Wärmepumpe, SW = Sole/Wasser-Wärmepumpe, Sa = Sanierung, NB = Neubau, d = drehzahl geregelter Verdichter, fix = On/off Verdichter. <sup>1)</sup> Heizstab Legionellenprogramm zur Mittagszeit, <sup>2)</sup> Abnehmende Ladeleistung von 4.5 auf 3.5kW, <sup>3)</sup> Abnehmende Ladeleistung von 10.5 auf 8 kW, <sup>4)</sup> Zuerst fixe Leistung mit 7.5 kW, teilweise deutliche Reduktion bis 4 kW. Betrachtungszeitraum Winterwoche 01-07.03.2021.

Tabelle 4: Kennwerte zum Bedarf und Aufladung des Trinkwarmwassers.

| Objekt | Eigenschaften | TWW-Speicher [l] | TWW-Bedarf pro Tag [l/d] | WP-Aufladungen pro Tag [AL/d] | Mittlere Zapfmenge pro Aufladung [l/AL] | Mittlere WP-Wärmemenge pro Aufladung [kWh/AL] | Variationskoeffizient der WP-Wärmemenge [-] | Mittlere elektr. WP-Energie pro Aufladung [kWh_el/AL] | Mittlere Zapfenergie pro Tag [kWh/d] | Mittlere Wärmeverluste pro Tag [kWh/d] | Verlustwärme bezogen auf AL-Energie [%] |
|--------|---------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|---|---|---|---|--------------------------------------|--|---|
| 22     | SW, Sa, d     | 925              | 527                      | 2.0                           | 268                                     | 14.9  | 12%   | 4.19  | 21.73                                | -8.16                                  | -27%                                    |
| 1      | LW, NB, fix   | 388              | 261                      | 2.3                           | 112                                     | 5.08  | 12%   | 1.84  | 11.11                                | -1.28                                  | -10%                                    |
| 2      | SW, NB, d     |                  | 259                      | 2.4                           | 107                                     | 7.78  | 51%   | 1.94  | 9.81                                 | -8.99                                  | -48%                                    |
| 3      | LW, Sa, d     | 495              | 240                      | 1.1                           | 211                                     | 10.45   | 15%   | 3.36  | 10.41                                | -1.51                                  | -13%                                    |
| 5      | LW, NB, fix   | 408              | 200                      | 1.9                           | 103                                     | 5.11  | 13%   | 1.7   | 8.02                                 | -2.44                                  | -23%                                    |
| 10     | SW, Sa, fix   | 495              | 181                      | 1.5                           | 121                                     | 8.09  | 12%   | 2.55  | 8.89                                 | -3.21                                  | -26%                                    |
| 15     | LW, Sa, d     | 300              | 156                      | 1.9                           | 82                                      | 3.15  | 27%   | 1.01  | 4.57                                 | -1.43                                  | -24%                                    |
| 21     | SW, Sa, d     | 362              | 153                      | 1.2                           | 133                                     | 5.88  | 15%   | 1.25  | 5.34                                 | -1.44                                  | -21%                                    |
| 16     | LW, Sa, d     | 476              | 134                      | 1.1                           | 121                                     | 6.94  | 24%   | 2.8   | 5.46                                 | -3.35                                  | -38%                                    |
| 11     | LW, Sa, d     | 423              | 113                      | 1.5                           | 74                                      | 4.23  | 9%  | 1.7   | 4.95                                 | -2.25                                  | -31%                                    |
| 7      | SW, Sa, fix   | 388              | 110                      | 2.6                           | 43                                      | 2.93  | 18%   | 0.93  | 5.07                                 | -3.12                                  | -38%                                    |
| 20     | LW, Sa, fix   | 388              | 98                       | 1.0                           | 97                                      | 6.66  | 7%  | 2.42  | 4.18                                 | -3.35                                  | -45%                                    |
| 17     | LW, Sa, d     | 344              | 96                       | 0.9                           | 101                                     | 5.13  | 13%   | 1.73  | 3.82                                 | -2.34                                  | -38%                                    |
| 24     | LW, Sa, d     | 372              | 89                       | 2.1                           | 43                                      | 5.07  | 8%  | 2.35  | 3.15                                 | -7.41                                  | -70%                                    |
| 13     | SW, Sa, d     | 362              | 83                       | 1.3                           | 62                                      | 3.72  | 12%   | 1.09  | 3.66                                 | -1.90                                  | -34%                                    |
| 12     | LW, Sa, d     | 344              | 55                       | 1.2                           | 46                                      | 2.97  | 12%   | 1.11  | 2.58                                 | -2.65                                  | -51%                                    |
| 4      | SW, Sa, d     | 276              | 11                       | 1.6                           | 7                                       | 3.97  | 5%  | 0.92  | 0.3                                  | -6.02                                  | -95%                                    |

LW = Luft/Wasser-Wärmepumpe, SW = Sole/Wasser-Wärmepumpe, Sa = Sanierung, NB = Neubau, d = drehzahl geregelter Verdichter, fix = On/off Verdichter. Betrachtungszeitraum HS 2020/21

Eine Besonderheit bei der Aufladung stellt die Legionellenschaltung dar. Hierzu soll auf die Änderungen der SIA 385/1:2020 hingewiesen werden, welche keine herkömmlichen Legionellenschaltungen mehr empfehlen (Anhang B.2). Die Temperatur am Speicherabgang ist je nach Hydraulik zwischen mindesten 52 und

55 °C zu gewährleisten. Bei den Feldmessungen konnten nach wie vor grosse Verunsicherungen seitens der Bewohner sowie auch bei den Servicefachkräften festgestellt werden. Bei manchen Anlagen ist die Legionellenschaltung bei jeder Wartung verändert worden. In dieser Betrachtungsperiode ist die periodische höhere Erwärmung bei elf Anlagen durchgeführt worden, davon bei zehn Anlagen wöchentlich, bei Anlage 12 täglich. Für einen möglichst geringen Heizstabeinsatz sollte eine Vorerwärmung mit dem Verdichter erfolgen. Dies wird jedoch nur bei vier Anlagen praktiziert, sechs Anlagen führen die Schaltung rein zeitgesteuert durch. Ist hierbei der Speicher zuvor deutlich abgekühlt, wird wesentlich mehr elektrische Energie durch den Heizstab bezogen als nötig. Das tägliche hohe Aufheizen per Heizstab bei Anlage 12 führt dazu, dass die Wärmepumpe nur wenig Wärme effizient bereitstellen kann. Bei sechs Anlagen konnte eine Ferienabsenz sämtlicher Bewohner festgestellt werden. Bei keiner dieser Wärmepumpenanlagen ist hier die Aufladung des Trinkwarmwasserspeichers deaktiviert worden.

Bei den leistungsregelten Wärmepumpen können zusätzlich verschiedene Ladestrategien angewendet werden: Hauptsächlich sind dies die Regelung oder Fixierung der Leistung bzw. Drehzahl sowie eine Regelung auf eine Soll-Vorlauftemperatur der Wärmepumpe. Bei einer Fixierung der Drehzahl, z.B. konstant 40 % oder 3600 1/min resultiert bei Luft/Wasser-Wärmepumpen im Sommer eine deutlich höhere Ladeleistung aufgrund der höheren Quelltemperatur. Bei einer geregelten Ladeleistung, z.B. 6 kW wird die Drehzahl des Verdichters angepasst, im Sommer ist daher die elektrische Aufnahmeleistung tiefer. Aus Effizienzgründen ist die Ladestrategie mit einer begrenzten Ladeleistung zu bevorzugen. Da die Wärmeübertragungsfläche im Speicher (Registerheizfläche) unverändert bleibt, erhöht sich die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe bei einer höheren Aufladeleistung. Bei der Temperaturregelung wird die Leistung der Wärmepumpe nach einer bestimmten Ladetemperatur über der Speicher-Solltemperatur gefahren. Dadurch ist die Leistung zu Beginn deutlich höher als zum Ende des Ladevorganges.

Da die exakte Ladestrategie der unterschiedlichen Wärmepumpenmodelle nicht bekannt ist, werden die verschiedenen Möglichkeiten anhand der Messdaten aufwändig durch Analyse der einzelnen Aufladevorgänge sowie quantitativ durch den Sommer / Winter Vergleich bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen bestimmt.

Anlage 11 zeigt in Tabelle 5 eindeutig eine Regelung nach konstanter thermische Aufladeleistung von ca. 10.5 kW. Dadurch ist die elektrische Verdichterleistung im Sommer um ca. 20 % reduziert. Anlage 16 hingegen weist eine andere Regelstrategie auf, sodass die thermische Leistung im Sommer um fast 50 % höher ist. Um diese höhere Ladeleistung auf das Trinkwarmwasser abgeben zu können ist die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe mit entsprechender Effizienzeinbusse um fast 8 Kelvin höher als im Winter.

Tabelle 5: Vergleich Aufladung Trinkwarmwasser bei leistungsregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen zwischen Winter und Sommer

| Anlage | Sommer/Winter |          | Temp. Unterschied Sommer-Winter [K] | Januar 2021 |          |         |               | Juni 2021 |          |         |               |
|--------|---------------|----------|-------------------------------------|-------------|----------|---------|---------------|-----------|----------|---------|---------------|
|        | P_elek.       | P_therm. |                                     | P_elek.     | P_therm. | T_VL_AL | T_VL_AL (max) | P_elek.   | P_therm. | T_VL_AL | T_VL_AL (max) |
|        | [%]           | [%]      |                                     | [W]         | [W]      | [°C]    | [°C]          | [W]       | [W]      | [°C]    | [°C]          |
| 3      | 51%           | 79%      | 2.08                                | 4607        | 11790    | 50.07   | 60.04         | 2333      | 9272     | 49.40   | 62.12         |
| 11     | 79%           | 102%     | 0.84                                | 4754        | 10322    | 49.43   | 57.57         | 3744      | 10561    | 51.26   | 58.41         |
| 12     | 67%           | 83%      | 0.41                                | 3893        | 9453     | 56.20   | 63.09         | 2615      | 7805     | 56.00   | 63.50         |
| 15     | 54%           | 111%     | 0.56                                | 1337        | 3103     | 42.41   | 47.80         | 717       | 3451     | 42.10   | 48.36         |
| 16     | 148%          | 146%     | 2.04                                | 3544        | 10398    | 45.07   | 55.71         | 5238      | 15186    | 52.90   | 57.75         |
| 17     | 127%          | 119%     | 0.13                                | 2694        | 7100     | 43.80   | 55.50         | 3416      | 8484     | 45.33   | 55.63         |
| 24     | 71%           | 113%     | 0.43                                | 3304        | 6837     | 51.97   | 57.97         | 2354      | 7747     | 52.11   | 58.40         |

Den gewichtigen Einfluss der Ladeleistung auf die Effizienz konnte bei einer Optimierung der Anlage 24 Ende August 2021 messtechnisch erfasst werden. Die thermische Leistung ist von ca. 7.5 auf 6 kW reduziert worden. Dadurch erhöhte sich der gemessene COP bei vergleichbaren Quelltemperaturen (18-19 °C) von 3.2 auf 3.6. Diese Effizienzsteigerung von ca. 12 % ist zum einen durch die höhere Effizienz der Wär-

mepumpe gemäss Herstellerdatenblatt (7 %) begründet, zum anderen durch eine um 2 K tiefere Vorlauf-temperatur der Wärmepumpe (5 %). Im Winter kann zudem die Anzahl der Abtauungen durch eine höhere Verdampfungstemperatur verringert und damit die Effizienz zusätzlich gesteigert werden.

Dieses einfache Beispiel zeigt das Potential der Effizienzoptimierung bei leistungsgeregelten Wärmepumpen durch die Einstellung der passenden Regelstrategie, ohne merkliche Komforteinschränkung für die Bewohner (eine etwas längere Ladedauer sollte auf den Komfort keinen Einfluss haben). Voraussetzung hierzu ist, dass der Regler diese Möglichkeit zur Verfügung stellt. Leistungsgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen bei milden Aussentemperaturen zwischen der maximalen Leistung und der effizientesten Drehzahl einen COP Unterschied von ca. 40 %<sup>4</sup> auf.

### 3.2 Trinkwarmwasser-Wärmepumpen

In diesem Unterkapitel werden die Trinkwarmwasser-Wärmepumpen (Wärmepumpenboiler), wie in Abbildung 23 dargestellt, betrachtet. Ein detaillierter Vergleich ist aufgrund der Unterschiede in der Aufstellung und des Benutzerverhaltens nur begrenzt möglich.

Die Anlagen 8, 19 und 23 sind im Gebäude platziert und beziehen die benötigte Wärme aus dem Keller bzw. Heizraum. Im Gegensatz dazu arbeitet Anlage 14 mit direkter Aussenluft, was die deutlich geringere Effizienz gegenüber den anderen Geräten erklärt. Dieser Effizienzunterschied ist in dieser Heizsaison aufgrund der tieferen Aussentemperaturen deutlicher grösser als in den Vorperioden. Aufgrund eines Defektes wurde bei Anlage 14 die Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (TWWP) im Winter 2019 ersetzt. Die neue TWWP verfügt über einen 700 W Heizstab, weist aber leider auch im Verdichterbetrieb relativ exakt eine elektrische Leistung von ca. 700 W auf. Somit ist mit einer gesamthaften Leistungsmessung der TWWP keine Unterscheidung mehr zwischen Heizstab- und Verdichterbetrieb möglich. Deshalb können diese Grössen seit dem Austausch der TWWP nicht mehr dargestellt werden.

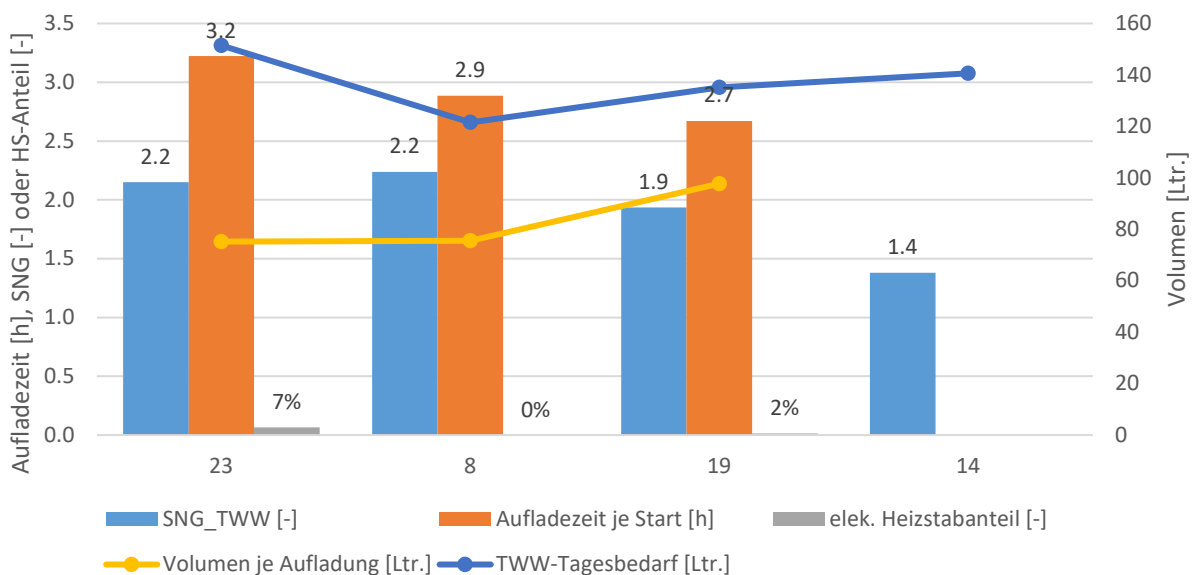


Abbildung 23: Trinkwasser-Wärmepumpen im Überblick, Heizperiode 2020/21. Heizstab bei Anlage 14 nicht separat messbar, jedoch häufig in Betrieb.

Ein Effizienz-Vergleich der Aufladung zwischen Trinkwarmwasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen ist aufgrund der grossen Varianz der Temperaturen und Zapfmengen in den Feldmessungen nicht möglich. Erschwert wird die Auswertung, da die thermische Aufladeleistung bei den Trinkwarmwasser-Wärmepumpen nicht einfach gemessen werden kann (Eingriff in Kältekreis, Garantieverlust). Deshalb bleibt nur der stark von der Zapfmenge beeinflusste SNG als einzige Kennziffer für einen Effizienzvergleich der Systeme.

<sup>4</sup> Beispiel: Herstellerangaben von CTA, Modell Aeroheat Inverta CM 18a

Ob eine separate Trinkwarmwasser-Wärmepumpe verbaut wird, ist von individuellen Gegebenheiten abhängig. Vorteile von Innenluft nutzenden Trinkwarmwasser-Wärmepumpen sind deren kompakte Bauweise ohne zusätzliche externe Hydraulik. Hierdurch sind Wärmeverluste nicht durch die Montagequalität vor Ort abhängig. Zusätzlich kann die systembedingte Entfeuchtungsfunktion dieser Geräte bei feuchten Kellern oder Waschküchen von Vorteil sein. Andererseits muss ein möglicher Wärmeklau berücksichtigt werden, sodass die entzogene Wärmemenge evtl. durch die Raumheizung nachgeliefert werden muss. Innenluft nutzende Trinkwarmwasser-Wärmepumpe müssen daher in ausreichend grossen und unbeheizten Räumen ausserhalb des Dämmperimeters aufgestellt werden. Bei Bestandsbauten hilft oft bereits eine Dämmung der Kellerdecke. Kann eine Trinkwarmwasser-Wärmepumpen nur mit Aussenluft betrieben werden, ist die mögliche Effizienz aufgrund der begrenzten minimalen Betriebstemperatur (oft nur zw. 3 und -5 °C) deutlich tiefer als mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe.

### 3.3 Kälteperioden

In diesem Kapitel soll die Betriebsweise der Wärmepumpenanlagen in den Kälteperioden der vergangenen Heizsaison betrachte werden. In Tabelle 6 ist der 14. Februar 2021 dargestellt. Dies war in weiten Teilen der Schweiz der kälteste Tag der Heizsaison mit Minimaltemperaturen im zweistelligen Minusbereich, welcher auf zwei bereits vorgängig sehr kalte Tage folgte. Somit war die Gebäudemasse bereits an die Kälte angepasst und es resultierte der höchste Heizwärmebedarf in diesem Winter.

Für die Analyse einer längeren Kälteperiode ist der Zeitraum zwischen dem 6. und 19. Januar in Tabelle 7 abgebildet. Diese 14 Tage weisen im Mittel die tiefsten Aussentemperaturen auf, enthalten aber keine so extremen Minima wie im Februar.

Sole/Wasser-Wärmepumpen müssen bei sehr tiefen Aussentemperaturen nur den höheren Heizwärmebedarf mit einer höheren Vorlauftemperatur bereitstellen. Die Quellentemperaturen der Erdwärmesonde sinken dabei nur minimal. Luft/Wasser-Wärmepumpen hingegen müssen zusätzlich mit einer deutlich tieferen Quellentemperatur arbeiten. Dadurch reduziert sich ihre maximale Heizleistung, welche sich somit konträr zum höheren Heizwärmebedarfs des Gebäudes verhält. Erstmals seit Beginn der Feldmessungen kann nun bei wenigen Anlagen eine kurze Betriebsdauer des Heizstabes detektiert werden. Bei Anlage 8 wird dieser aus präventiven Komfortgründen nach den Abtauungen am frühen Morgen zum Erreichen der Soll-Vorlauftemperatur eingeschaltet (es handelt sich hierbei aber um keine Frostschutzfunktion aufgrund einer zu kalten Vorlauftemperatur während der Abtauung). Am Nachmittag taktet die On-/Off-Wärmepumpe bereits wieder und erreichte an diesem Tag in Summe 22.8 Betriebsstunden (von möglichen 24h, keine EW-Sperre aktiv). Somit wäre ein Heizstabeinsatz energetisch, bedingt auch durch die träge Fussbodenheizung, nicht nötig gewesen. Dennoch ist diese Anlage hier sehr nahe an ihrem Bivalenzpunkt. Bei Anlage 16 ist im Januar aufgrund des Verdichterschadens (Erklärung Kapitel 2.7) nur der Heizstab in Betrieb. Am viel kälteren 14. Februar wurde der Wärmebedarf bei dieser Anlage überwiegend mit dem neuen Verdichter gedeckt (17.7 h Betriebsdauer). Es erfolgt aber ein knapp 10-minütiger Heizstabeinsatz, welcher mit einer zurückhaltenden Regelung ebenfalls nicht nötig gewesen wäre.

Bei den drei leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen 4, 13 und 14 sowie der Luft/Wasser-Wärmepumpe 23 sind eindruckliche 24 Betriebsstunden und damit ein durchgängiger Verdichterbetrieb aufgezeichnet worden. Da die gemessene Heizleistung bei allen Geräten noch nicht am Maximum liegt, modulieren diese Geräte fein den benötigten Wärmebedarf ohne zu takten. Insbesondere bei Anlage 23 ist dies ein sehr gutes, aber auch positiv überraschendes Regelverhalten. Vor der Optimierung der Steuerung hat diese Wärmepumpe noch ein sehr starkes Taktverhalten mit einer geringen Modulationsbreite aufgewiesen. Details hierzu sind im vorherigen Jahresbericht 2019/20, Kapitel 3 beschrieben.

Auf der anderen Seite sind die Anlagen 10, 19 und 20 zu nennen. Mit nur 8.0 bis 11.3 Verdichterbetriebsstunden sind die Wärmepumpen deutlich überdimensioniert.

Mit der Kennziffer des Heizwärmebedarfs (HWB [ $\text{kWh/m}^2$ ]) sind die eindrucklichen Unterschiede der Gebäudedämmung bei den Feldmessobjekten erkennbar. Benötigen an dem kältesten Tag gut isolierte Gebäude nur  $0.3 \text{ kWh/m}^2$ , ist der HWB im unsanierten Bestandsgebäude 12 viermal höher. Trotz einer sehr

hohen Vorlauftemperatur von 54.1 °C im Tagesmittel erreicht die leistungsmodulierende Luft/Wasser-Wärmepumpe im unsanierten Bestandsgebäude 12 noch einen WNG von 2.0 im Heizbetrieb (Jahresmittelwert 3.0) und ist damit effizienter als die Anlage in dem sehr gut sanierten Bestandsgebäude 24. Dort sind die Vorlauftemperaturen mit 52.8 °C vergleichbar hoch, jedoch ist diese Anlage 24 im Vergleich zur Anlage 12 noch nicht optimiert und die Hydraulik mit Speicher und gemischten Heizkreis dürfte einen Aufschlag zur Vorlauftemperatur erzeugen.

Die in diesem Kapitel aufgezeigt Effizienzwerte dürfen jedoch nicht verallgemeinert werden. Im Jahresdurchschnitt wird der grösste Wärmebedarf bei milden Wintertemperaturen benötigt. Details hierzu sind im letzten Jahresbericht im Kapitel 2.5 detailliert beschrieben.

Tabelle 6: Messdaten als Tagesmittelwerte am 14. Februar 2021, der kälteste Tag in der Heizperiode 2020/21.

| Objektnummer | Eigenschaften | T_Aussen [°C] | T_Heizvorlauf [°C] | HWB [Wh/m2] | Eth_Heizen [kWh] | Eel_Tot_Heizen [kWh_el] | Pth_Heizen [W] | WNG_Heizen [-] | HS Heizen [kWh] | Eth_AL [kWh] | Eel_Tot_Aufladung [kWh_el] | Pth_AL [kWh] | WNG_Aufladung [-] | HS Aufladung [kWh] | tBh_Verdichter |
|--------------|---------------|---------------|--------------------|-------------|------------------|-------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|----------------------------|--------------|-------------------|--------------------|----------------|
| 15           | LW, Sa, d     | -5.6          | 32.0               | 297         | 66               | 24                      | 3'329          | 2.8            | -               | 5.4          | 2.5                        | 3'102        | 2.1               | -                  | 16.2           |
| 17           | LW, Sa, d     | -8.7          | 32.9               | 561         | 105              | 39                      | 4'762          | 2.7            | -               | 7.0          | 7.0                        | -            | 1.0               | 7.0                | 20.2           |
| 1            | LW, NB, fix   | -4.6          | 33.8               | 297         | 82               | 31                      | 5'691          | 2.7            | -               | 16.6         | 6.3                        | 6'744        | 2.6               | -                  | 22.0           |
| 8            | LW, Sa, fix   | -0.9          | 35.8               | 617         | 141              | 53                      | 6'325          | 2.7            | 9.1             | -            | 3.6                        | -            | -                 | -                  | 22.4           |
| 20           | LW, Sa, fix   | -6.0          | 37.8               | 721         | 101              | 39                      | 9'911          | 2.6            | -               | 7.7          | 3.3                        | 10'662       | 2.3               | -                  | 17.7           |
| 23           | LW, Sa, d     | -6.0          | 40.6               | 874         | 210              | 83                      | 8'736          | 2.5            | -               | -            | 12.1                       | -            | -                 | 10.8               | 18.2           |
| 3            | LW, Sa, d     | -3.8          | 45.5               | 789         | 142              | 57                      | 9'360          | 2.5            | -               | 12.6         | 4.8                        | 12'207       | 2.6               | -                  | 21.8           |
| 5            | LW, NB, fix   | -0.2          | 38.2               | 349         | 88               | 36                      | 6'100          | 2.5            | -               | 10.8         | 7.6                        | 10'745       | 1.4               | 4.4                | 15.9           |
| 11           | LW, Sa, d     | -3.8          | 41.5               | 578         | 127              | 52                      | 6'510          | 2.4            | -               | 7.8          | 3.5                        | 10'532       | 2.2               | -                  | 10.9           |
| 16           | LW, Sa, d     | -6.3          | 44.2               | 704         | 158              | 76                      | 9'724          | 2.1            | 0.5             | 12.2         | 5.0                        | 8'473        | 2.4               | -                  | 15.4           |
| 12           | LW, Sa, d     | -5.4          | 54.1               | 1'405       | 169              | 83                      | 9'373          | 2.0            | -               | 4.2          | 3.0                        | 8'826        | 1.4               | 1.7                | 24.0           |
| 24           | LW, Sa, d     | -5.6          | 52.8               | 346         | 60               | 33                      | 4'494          | 1.8            | -               | 11.8         | 5.8                        | 6'521        | 2.0               | -                  | 15.1           |
| 21           | SW, Sa, d     | -8.6          | 32.3               | 212         | 59               | 12                      | 4'663          | 5.1            | -               | 11.0         | 2.2                        | 4'312        | 5.0               | -                  | 15.2           |
| 13           | SW, Sa, d     | -3.8          | 33.8               | 619         | 118              | 25                      | 5'373          | 4.7            | -               | 7.4          | 2.3                        | 3'465        | 3.2               | -                  | 24.0           |
| 10           | SW, Sa, fix   | -6.8          | 33.4               | 385         | 97               | 22                      | 12'906         | 4.4            | 4.6             | 6.5          | 2.5                        | 9'707        | 2.6               | -                  | 8.0            |
| 7            | SW, Sa, fix   | 0.7*)         | 43.1               | 737         | 173              | 41                      | 11'463         | 4.2            | -               | 9.2          | 3.0                        | 10'220       | 3.1               | -                  | 16.0           |
| 19           | SW, Sa, fix   | -8.7          | 47.5               | 716         | 140              | 33                      | 12'323         | 4.2            | -               | -            | 5.5                        | -            | -                 | -                  | 11.3           |
| 22           | SW, Sa, d     | -7.2          | 43.1               | 579         | 270              | 68                      | 14'022         | 4.0            | -               | 45.1         | 12.7                       | 18'397       | 3.5               | -                  | 21.6           |
| 4            | SW, Sa, d     | -4.2          | 44.9               | 645         | 148              | 38                      | 6'576          | 3.9            | -               | 8.9          | 2.0                        | 6'168        | 4.6               | -                  | 24.0           |
| 14           | SW, Sa, d     | -5.2          | 42.4               | 552         | 90               | 27                      | 3'750          | 3.3            | -               | -            | 6.1                        | -            | -                 | 0.0                | 24.0           |
| 6            | SW, Sa, d     | -7.7          | 50.4               | 603         | 145              | 47                      | 8'075          | 3.1            | -               | 15.9         | 7.0                        | 3'819        | 2.3               | 0.5                | 21.9           |
| 18           | SW, Sa, fix   | -2.4          | -                  | -           | -                | -                       | -              | -              | -               | -            | -                          | -            | -                 | -                  | 18.6           |
| 2            | SW, NB, d     | -4.8          | 33.0               | x           | x                | 31                      | x              | x              | -               | 15.1         | 5.3                        | 9'454        | 2.9               | -                  | 22.9           |

LW = Luft/Wasser-Wärmepumpe, SW = Sole/Wasser-Wärmepumpe, Sa = Sanierung, NB = Neubau, d = drehzahl geregelter Verdichter, fix = On/off Verdichter  
 \*) Aussentemperaturfühler misst zu hohe Lufttemperaturen. Vergleichswerte Meteostation Bern: -5.6 °C

Interessant ist das elektrische Zuheizen bei Anlage 10 (On-/Off- Sole/Wasser-Wärmepumpe). Da der Verdichter nur acht Betriebsstunden aufweist und somit selbst am kältesten Tag deutlich taktet, ist der Heizstabeinsatz nicht aufgrund einer dauerhaft zu geringen Heizleistung begründet. Die Erfassung sämtlicher Messgrößen im 10s Mittelwert ermöglicht bei den Feldmessungen eine Detailbetrachtung nach Abbildung 24 der genauen Vorkommnisse und offenbart hier auch wieder eine komfortorientierte Regelstrategie. Der Verdichter erreicht nach dem Starten nicht sofort den Bereich der Soll-Vorlauftemperatur. Bereits nach fünf Minuten wird die erste Heizstabeinstufe und nach weiteren 10 Minuten die zweite parallel zum Verdichterberieb hinzugeschaltet. Nach nur 40 Minuten schaltet der Verdichter bei einer gemessenen Aussentemperatur von ca. – 11 °C wieder ab.

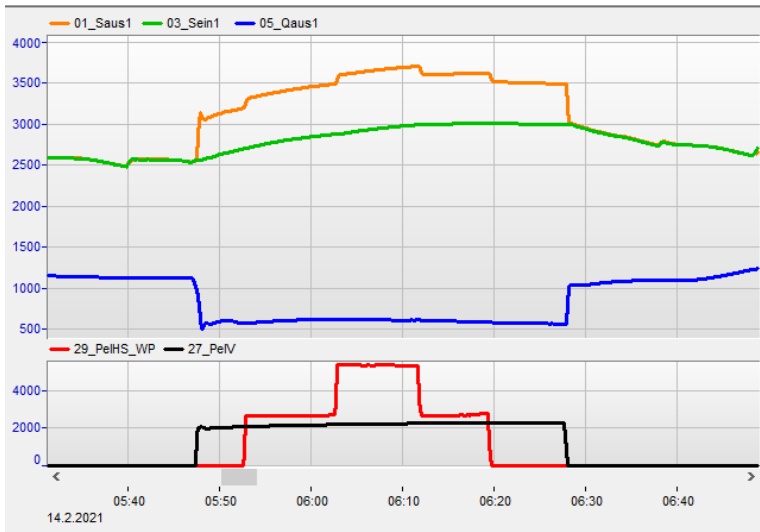


Abbildung 24: Regelverhalten der On-/Off- Sole/Wasser-Wärmepumpe von Anlage 10 im Heizbetrieb mit zweistufigem Zuschalten des Heizstabes. 01\_Saus1 = Vorlauftemp., 03\_Sein1 = Rücklauftemp., 05\_Qaus1 = Sondereintrittstemp., 29\_PelHS\_WP = Leistung Heizstab und 27\_PelV Leistung Verdichter in Watt, Darstellung mit Green Eye – Writer Standard.

Tabelle 7: Tagesmittelwert aus den Tageswerten über die 14-tägige Kälteperiode vom 6. Bis 19. Januar 2021

| Objektnummer | Eigenschaften | T_Aussen [°C] | T_HeizVorlauf [°C] | HWB [Wh/m2] | Eth_Heizen [kWh] | Eel_Tot_Heizen [kWh_el] | Pth_Heizen [W] | WNG_Heizen [-] | HS Heizen [kWh] | Eth_AL [kWh] | Eel_Tot_Aufladung [kWh_el] | Pth_AL [kWh] | WNG_Aufladung [-] | HS Aufladung [kWh] | tBh_Verdichter |
|--------------|---------------|---------------|--------------------|-------------|------------------|-------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|----------------------------|--------------|-------------------|--------------------|----------------|
| 15           | LW, Sa, d     | -0.7          | 31.1               | 117         | 59               | 18                      | 2'973          | 3.2            | -               | 7.7          | 3.5                        | 2'918        | 2.2               | -                  | 23.0           |
| 17           | LW, Sa, d     | -0.9          | 31.8               | 85          | 77               | 25                      | 4'809          | 3.1            | -               | 7.2          | 3.7                        | 5'873        | 2.0               | 1.3                | 15.9           |
| 8            | LW, Sa, fix   | 1.9           | 35.5               | -           | 126              | 41                      | 6'166          | 3.1            | 0.2             | -            | 3.3                        | -            | -                 | -                  | 20.7           |
| 1            | LW, NB, fix   | -0.2          | 31.5               | 209         | 64               | 22                      | 5'299          | 3.0            | 0.0             | 16.6         | 7.2                        | 7'008        | 2.4               | 0.6                | 11.9           |
| 20           | LW, Sa, fix   | -0.2          | 36.4               | 85          | 86               | 30                      | 11'371         | 2.9            | -               | 8.2          | 3.7                        | 11'434       | 2.3               | 0.6                | 8.3            |
| 3            | LW, Sa, d     | -0.6          | 42.8               | 107         | 124              | 44                      | 8'280          | 2.8            | -               | 15.1         | 5.8                        | 11'721       | 2.6               | 0.0                | 16.3           |
| 5            | LW, NB, fix   | 0.9           | 36.8               | 163         | 80               | 29                      | 6'815          | 2.8            | -               | 15.6         | 6.3                        | 7'773        | 2.5               | 0.5                | 13.8           |
| 11           | LW, Sa, d     | 0.8           | 39.5               | 80          | 114              | 41                      | 6'923          | 2.8            | -               | 10.1         | 5.1                        | 9'830        | 2.1               | 0.7                | 17.2           |
| 23           | LW, Sa, d     | -0.6          | 38.4               | -           | 175              | 64                      | 7'285          | 2.8            | -               | -            | 4.9                        | -            | -                 | 0.8                | 24.0           |
| 12           | LW, Sa, d     | 0.4           | 53.9               | 31          | 148              | 67                      | 9'011          | 2.2            | -               | 4.8          | 2.8                        | 9'238        | 1.7               | 1.3                | 16.7           |
| 24           | LW, Sa, d     | 0.9           | 47.3               | 148         | 56               | 26                      | 4'335          | 2.2            | -               | 9.7          | 4.6                        | 6'814        | 2.1               | -                  | 14.4           |
| 16           | LW, Sa, d     | -0.6          | 40.3               | 89          | 130              | 68                      | 8'101          | 2.1            | 4.0             | 12.6         | 9.7                        | 7'051        | 1.8               | 3.1                | 18.5           |
| 10           | SW, Sa, fix   | -0.8          | 31.3               | 141         | 82               | 15                      | 12'384         | 5.5            | -               | 13.7         | 4.5                        | 10'238       | 2.9               | -                  | 7.8            |
| 21           | SW, Sa, d     | -2.3          | 31.2               | 81          | 90               | 18                      | 4'830          | 5.1            | 0.0             | 7.5          | 1.7                        | 4'216        | 4.4               | 0.1                | 20.3           |
| 13           | SW, Sa, d     | 1.5           | 32.6               | 69          | 100              | 20                      | 4'697          | 5.1            | -               | 7.4          | 2.5                        | 3'321        | 3.1               | 0.5                | 23.2           |
| 7            | SW, Sa, fix   | 4.6*          | 40.6               | 67          | 118              | 26                      | 11'944         | 4.6            | -               | 8.3          | 3.2                        | 10'173       | 2.8               | 0.7                | 10.6           |
| 22           | SW, Sa, d     | -0.7          | 39.8               | 143         | 202              | 47                      | 15'023         | 4.4            | -               | 33.5         | 9.9                        | 17'341       | 3.4               | 0.6                | 15.2           |
| 4            | SW, Sa, d     | 1.0           | 42.9               | 62          | 127              | 31                      | 5'611          | 4.1            | -               | 8.3          | 1.8                        | 6'022        | 4.6               | -                  | 24.0           |
| 19           | SW, Sa, fix   | -1.5          | 48.2               | -           | 132              | 32                      | 12'368         | 4.1            | -               | -            | 3.1                        | -            | -                 | -                  | 10.7           |
| 14           | SW, Sa, d     | 0.3           | 39.6               | -           | 73               | 19                      | 3'034          | 3.8            | -               | -            | 8.4                        | -            | -                 | 0.0                | 24.0           |
| 6            | SW, Sa, d     | -1.2          | 50.0               | 71          | 163              | 54                      | 7'786          | 3.0            | 0.0             | 12.5         | 7.0                        | 4'332        | 2.0               | 2.7                | 23.6           |
| 18           | SW, Sa, fix   | 0.2           | -                  | -           | -                | -                       | -              | -              | -               | -            | -                          | -            | -                 | -                  | 13.8           |
| 2            | SW, NB, d     | -1.5          | 32.6               | x           | x                | 25                      | x              | x              | -               | 17.8         | 6.0                        | 9'332        | 3.0               | -                  | 22.9           |

LW = Luft/Wasser-Wärmepumpe, SW = Sole/Wasser-Wärmepumpe, Sa = Sanierung, NB = Neubau, d = drehzahl geregelter Verdichter, fix = On/off Verdichter  
 \*) Aussentemperaturfühler misst deutlich zu hohe Lufttemperaturen



### 3.4 Silent Mode

Bei den möglichen Regelstrategien für einen geräuscharmen Nachtbetrieb gilt es zwischen On-/Off- und leistungsmodulierenden Wärmepumpen zu unterscheiden. Erstere können nur durch Absenken der Ventilator Drehzahl die Geräuschemission reduzieren. Diese Reduktion wirkt sich direkt auf eine tiefere Verdampfungstemperatur mit einer resultierenden Effizienzminderung, Abfall der Heizleistung und eine schnellere Vereisung des Verdampfers in der Übergangszeit aus. Bei Inverter-Wärmepumpen kann im Silent Mode nebst dem Ventilator auch die Leistung des Verdichters beschränkt werden. Insbesondere in der Übergangszeit mit einem geringeren Heizwärmebedarf verursacht diese Regelstrategie keine Effizienz- und Komforteinbussen. Hier kann sogar bei einem schlechten Regelverhalten die Effizienz durch die Drehzahl limitierung verbessert und das Taktverhalten reduziert werden. Bei strengen Kälteperioden ist die Heizleistung in diesem limitierten Betriebsmodus jedoch möglicherweise nicht mehr ausreichend und es müsste je nach Steuerung und Dimensionierung der Wärmepumpe elektrisch nachgeheizt werden. Nebst diesen Regelstrategien kann auch eine klassische Nachtabsenkung mit einer Reduktion der Vorlauftemperatur in der Nacht eine Schallminimierung durch eine geringere Heizleistungsanforderung bewirken. Bei gut gedämmten Gebäuden könnte die Gebäude-Speichermasse zukünftig auch für die PV-Eigenstrom-Optimierung genutzt werden. Der neue Begriff «Taganhebung» steht für die Nutzung der Speichermasse bis nach Sonnenaufgang und der wieder möglichen Solarstromproduktion. Eine solche Regelstrategie würde auch zur Schallreduktion in der Übergangszeit zur Heizsaison führen.

Da aus den Feldmessungen nicht die Einstellungen im Wärmepumpen-Regler sowie die genaue Regellogik der unterschiedlichen Hersteller bekannt sind, können aus den Messwerten nur eingeschränkte Aussagen zur Verwendung von Silent Mode getroffen werden.

Das Anlageverhalten der acht leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpen ist zwischen Tag (7-19 Uhr) und Nachtbetrieb (19-7 Uhr) aufgeteilt und dargestellt. Bei keiner Anlage kann ein elektrisches Nachheizen im normalen Winterheizbetrieb (Ausnahmen siehe Kapitel 3.3) festgestellt werden.

Bei drei Anlagen (3, 17 und 23) ist kein Unterschied zwischen Tag und Nacht erkennbar. Die Heizleistung, Effizienz und Vorlauftemperatur sind entsprechend der Aussentemperatur (Quellentemperatur Verdampfer) identisch. Ebenfalls verändert sich die Luftabkühlung zwischen Verdampfereintritt und -austritt nicht, sodass keine Reduktion der Ventilator Drehzahl stattfindet.

Bei vier Anlagen (12, 15, 16 und 24) wird nachts mit einer geringeren Vorlauftemperatur und somit auch mit einer geringeren Heizleistung geheizt. Exemplarisch wird in der Abbildung 25 und Abbildung 26 das Verhalten der Anlage 24 dargestellt.

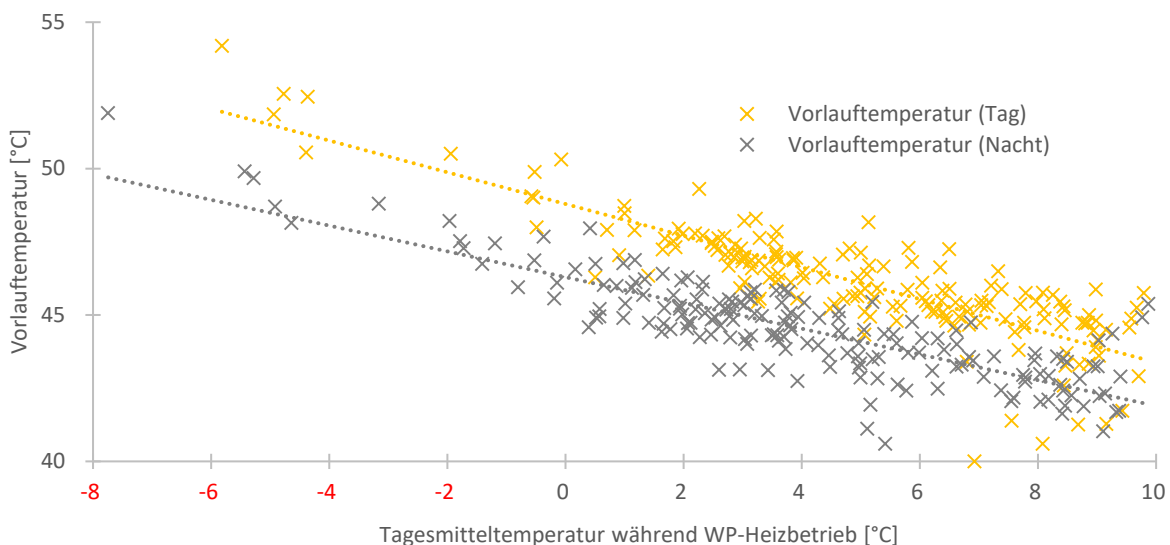


Abbildung 25: Heizkurve Anlage 24 am Tag (gelb) und in der Nacht (grau)

Da bei diesen Wärmepumpen die Temperaturspreizung über den Verdampfer mit geringerer Quellenentzugsleistung ebenfalls sinkt, werden die Ventilatoren nicht oder nicht messbar reduziert und es dürfte sich bei den Anlagen um eine klassische Nachtabsenkung und nicht um einen Silent Mode handeln.

In Abbildung 26 ist die fast unveränderte Leistungsaufnahme des Ventilators am Verdampfer zwischen Tag- und Nachtbetrieb ersichtlich (siehe «Ventilatorleistung (Tag /Nacht)»). Der leistungsgeregelte Verdichter arbeitet mit einer geringeren Drehzahl und nimmt aus diesem Grund sowie dem geringeren Kondensationsdruck (niedrigere Vorlauftemperatur) weniger Leistung auf (siehe «Verdichterleistung (Tag /Nacht)»).

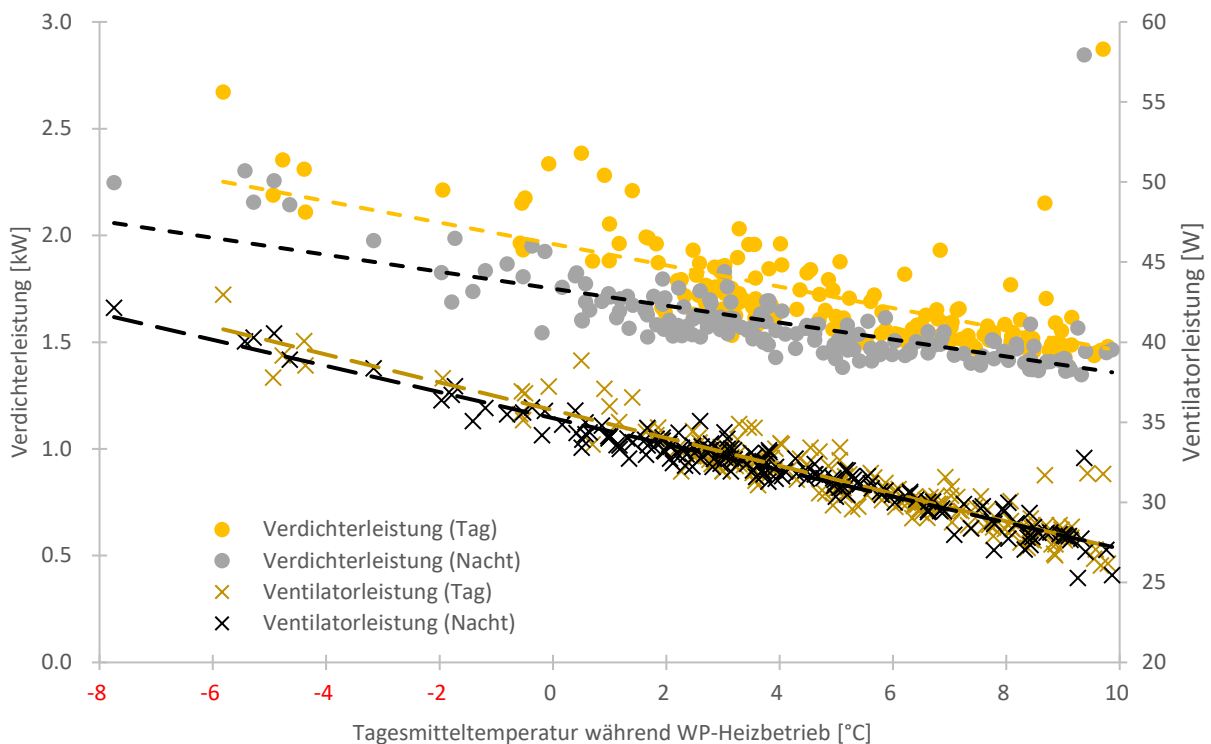


Abbildung 26: Leistungsaufnahme Verdichter (Punkte) sowie Ventilator am Verdampfer (Kreuze) am Tag (gelb) sowie im Nachtbetrieb (grau)

Bei Objekt 11 konnten auf Basis der vorhandenen Messdaten leider keine eindeutigen Aussagen getroffen werden.

Bei den acht betrachteten Anlagen dürfte anhand der Messdatenauswertung bei keiner Regelung ein Silent Mode aktiviert sein. Andernfalls sind die Auswirkungen auf die Betriebsweise der Wärmepumpe gering und werden trotz umfangreicher und genauer Messtechnik nicht erfasst.

## 4. Schlussfolgerung und Ausblick

Insgesamt führt die Heizsaison 2020/21 mit einem deutlich kälteren Winter und einer längeren Kälteperiode von mehreren Tagen im Januar sowie den drei kältesten Tagen im Februar zu leicht verminderten Effizienzwerten gegenüber den Vorjahren bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen. Erstmals kann bei drei Anlagen der Heizstabeinsatz für den Heizbetrieb festgestellt werden. Diese Heizstabeinsätze waren bis auf eine Anlage mit Verdichterschaden für den Wärmebedarf des Gebäudes jedoch nicht notwendig und sind nur durch die Regelstrategie der Wärmepumpe verursacht.

Anlagen mit einer Erdwärmesonde weisen in der Heizsaison 2020/21 sogar eine höhere Gesamteffizienz auf, da im kalten Frühjahr länger mit niedriger Vorlauftemperatur geheizt wurde. Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen ist in der letzten Heizperiode ein durchschnittlicher WNG für Heizen und Aufladung von 3.0 (WNG-Bereich von 2.2 bei Objekt 24 bis 3.9 bei Objekt 15) gemessen worden, Sole/Wasser-Wärmepumpen überbieten diese Effizienzwerte mit durchschnittlich 4.5 (WNG Bereich von 3.1 bei Objekt 6 bis 5.2 bei Objekt 18 und Objekt 21) deutlich.

Die Aufladung des Trinkwarmwassers bietet bei leistungsgeregelten Wärmepumpen ein einfaches Optimierungspotential durch die Anpassung der Ladeleistung.

Der Betrieb der vieldiskutierten Thematik zum Silent Mode bei Luft/Wasser-Wärmepumpen kann bei den Feldmessungen anhand der Messdaten nicht belegt werden. Bei einigen Gebäuden ist eine Nachtabsenkung eingestellt, welche so aber keine Auswirkungen auf die Schallemissionen haben dürfte.

Die wichtigsten Erkenntnisse können aus dem Vorjahr übernommen werden: Die einfachsten Möglichkeiten für eine Energieeinsparung entstehen bei der Inbetriebnahme mit der Einstellung der Regelung der Wärmepumpenanlage. Des Weiteren wird im nachfolgenden Betrieb durch mangelndes Wissen oder Interesse der Betreiber bzw. Bewohner mögliches Einsparpotential im Zusammenhang mit der Feineinstellung der Heizkurve nicht genutzt. Fehlerhafte Einstellungen oder Installationen bleiben nach der Inbetriebnahme ohne ein Monitoring unentdeckt, sofern die Behaglichkeit für die Bewohner nicht beeinträchtigt wird.

Mittels der hochauflösenden und genauen Messtechnik konnte u.a. das genaue Anlagenverhalten in den Kälteperioden im Detail analysiert werden. Des Weiteren ermöglichen nur umfangreiche und hochauflösende Messdaten eine Analyse des Regelverhalten der Wärmepumpen.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Messdaten der Heizsaison 2020/21 nochmals aufgelistet:

- Elektrisches Zuheizen während der Kälteperiode war gering und unnötig (Einstellungen am Regler müssten geprüft und angepasst werden)
- Luft/Wasser-Wärmepumpen deckten auch an den sehr kalte Wintertagen den Wärmebedarf problemlos
- Korrekte hydraulische Installation ist wichtig: kurze Leitung zwischen WP und Trinkwarmwasserspeicher, Isolation der Rohrleitungen und Anschlüsse am Speicher, Thermosiphon
- Überarbeitet SIA 380 – keine Empfehlung einer Legionellenschaltung.
- Leistungsbegrenzung der Trinkwarmwassererwärmung bei leistungsgeregelten WP sinnvoll
- Trinkwarmwasser-Wärmepumpen möglichst nicht mit kalter Aussenluft betreiben (Abtauproblematik & dadurch viele Starts und häufiger Heizstabeinsatz)
- Zeigesteuerte Erwärmung des Trinkwarmwassers, bei Luft/Wasser-WP: Am warmen Nachmittag steigern höhere Quellentemperaturen die Effizienz (sowie bei PV-Anlagen den Eigenverbrauch)
- Silent Mode in den Feldmessungen nicht feststellbar
- Sole/Wasser-WP mit neuen Erdwärmesonden erreichen dauerhaft die höchsten Effizienzwerte

Im Herbst 2020 ist die letzte Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus installiert worden. Durch den verzögerten Einzug in den Neubau stehen erst mit der Betrachtungsperiode 2021/22 auswertbare Messdaten zur Verfügung. Alle bisher bestehenden Wärmepumpenanlagen werden weiterhin ausgemessen. Dadurch können die Betriebsweise sowie die durchgeführten Optimierungsmassnahmen weiterhin analy-

siert und bewertet werden. Ebenfalls kann mit der Aufzeichnung von mehreren Betriebsjahren das Anlageverhalten auf mögliche Veränderungen (Legionellenprogramm, veränderte Einstellungen, Softwareupdates, Defekte, etc.) beobachtet werden.

Im vergangenen Jahr konnten vier Publikationen zu den Erkenntnissen der Feldmessungen in der Fachzeitschrift «planer + installateur» mit den Titeln:

- «Wie gut sind aktuelle Wärmepumpen im Feld?», Ausgabe 11/12-2020
- «Trinkwarmwassererwärmung mit Wärmepumpen», Ausgabe 1-2021
- «Wärmepumpen in fossil beheizten Bestandsgebäuden» Ausgabe 2-2021
- «Vorgangsweise bei Feldmessungen», Ausgabe 3-2021

veröffentlicht werden.

Auf wissenschaftlicher Seite konnten die Feldmessungen bei der DKV Tagung in Magdeburg (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein) sowie bei der 18<sup>th</sup> International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue dem Fachpublikum vorgestellt werden. Erfahrungen konnten zudem auch in einem Schulungsvideos für Energieberater geteilt werden.

Ab 2020 sollen jährlich noch kleinere Mehrfamilienhäuser mit einer Heizlast von ca. 20-30 kW in die Messkampagne aufgenommen werden. Ein sehr grosses Objekt (Anlage 26) mit einer Fläche von 4270 m<sup>2</sup> und 44 Bewohnern wird für die Heizperiode 2021/22 bereits ausgemessen.

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**

Für eine genaue Beschreibung der Methodik und das eingesetzte Messequipment wird auf die Ausführung in den vorherigen Berichten verwiesen.