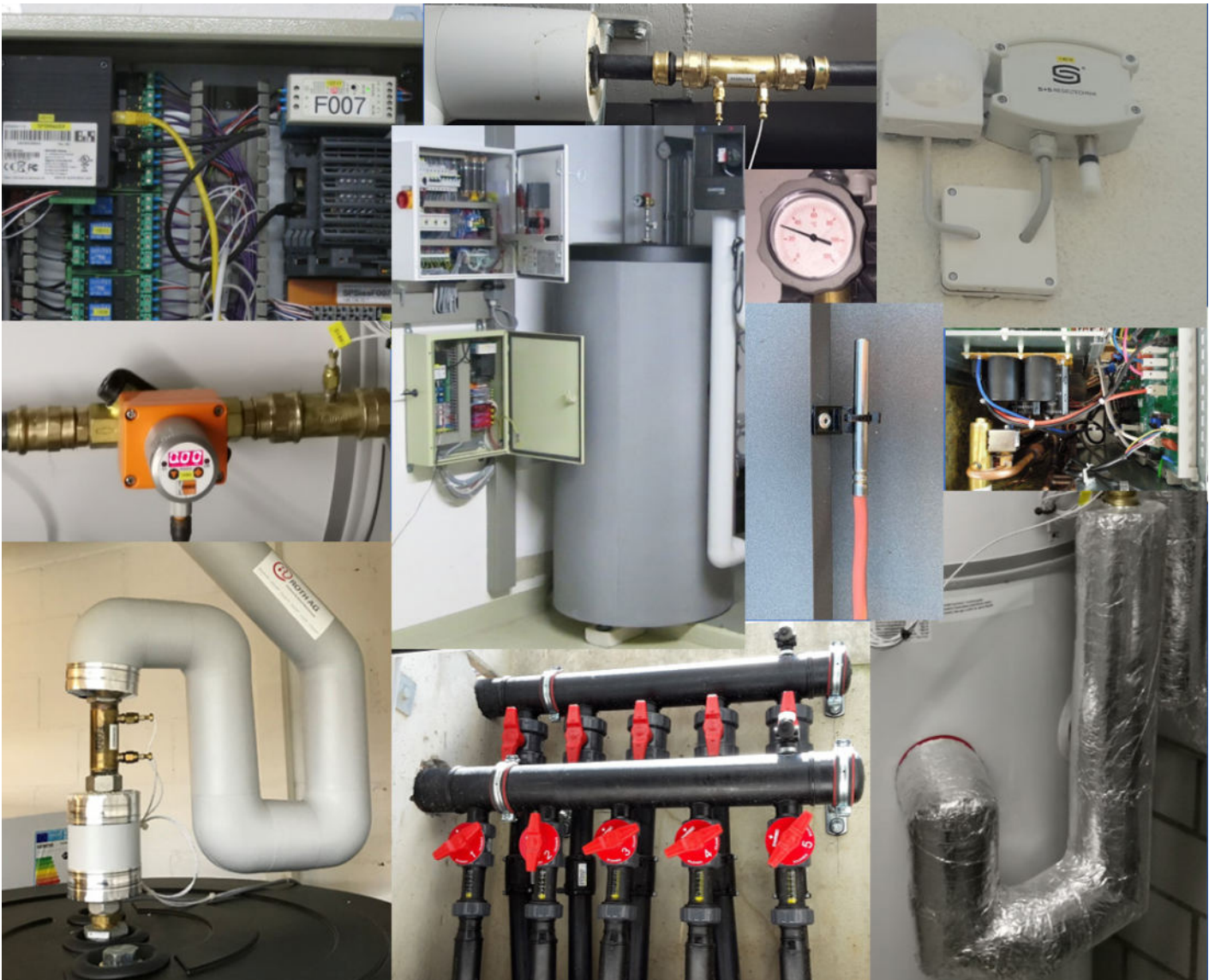


Jahresbericht, 27. November 2023

Bericht «Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2022/23»



Autoren

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

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

Inhaltsverzeichnis

1.	Projektziele	6
1.1	Objektbeschreibungen	6
1.2	Systemgrenzen und Kennzahlen	18
2.	Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen	22
2.1	Vergleich der Effizienzkennziffern (JAZ und WNG).....	22
2.2	Einfluss des Temperaturniveaus	25
2.3	Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung	29
2.4	Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage	32
2.5	Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb.....	35
2.6	Temperaturverlauf der Erdwärmesonden (EWS)	36
2.6.1	Quellenmitteltemperatur im Vergleich zur Heizleistung	39
2.7	Optimierungen und Diverses	41
2.7.1	Anpassung der Heizkurve führte zu Effizienzsteigerung von 2-3 % pro Kelvin.....	41
2.7.2	Effizienz Warmwasser F024	42
3.	Spezialauswertung: «Wärmepumpendimensionierung».....	44
3.1	Ermittlung Wärmeleistungsbedarf für Heizung und Aufladung.....	44
3.2	Bestimmung der Vorlauftemperaturen Auslegepunkt.....	45
3.3	Ermittlung der WP-Leistung (anhand Datenblatt).....	45
3.4	Zusammenspiel von Gebäude und Wärmepumpe	46
3.5	Vergleich der WP-Leistung mit dem Heizleistungsbedarf (anhand Messdaten)	47
3.5.1	On/Off Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWWP-fix).....	47
3.5.2	Leistungsgeregelte Luftwärmepumpen (LWWP-Inv).....	48
3.5.3	On/Off Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWWP-fix).....	49
3.5.4	Leistungsgeregelte Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWWP-Inv).....	51
3.5.5	Vertiefte Analyse bei leistungsgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpen	52
3.6	Dimensionierungsanalyse am Auslegepunkt.....	57
3.7	Dimensionierungstools.....	59
4.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	61
4.1	Veröffentlichungen / Seminare / Weiterbildung	62
5.	Literaturverzeichnis	63
6.	Anhang.....	63
6.1	Methodik und Messequipment.....	63

Zusammenfassung

Für diesen Jahresbericht sind die Messdaten von 28 Wärmepumpenanlagen über insgesamt 91 Heizperioden verfügbar. Zwölf Anlagen beziehen die Umweltenergie aus Erdwärmesonden, 13 Anlagen aus der Umgebungsluft. Bei vier Objekten (Objekte F008, F014, F019 und F023) erfolgt die Aufladung des Trinkwarmwassers mit einer separaten Wärmepumpe, einem sogenannten Wärmepumpenboiler.

Für diesen Bericht konnten zwei zusätzliche kleinere Mehrfamilienhäuser in die Auswertungen aufgenommen werden. Eine weitere Anlage wurde während der Heizperiode in Betrieb genommen und wird dann im nächsten Bericht erscheinen.

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

Die Wärmepumpen aus den Feldmessungen stehen in Gebäuden an verschiedenen klimatischen Standorten. Die Gebäude unterscheiden sich sowohl bezüglich Gebäudehülle, Wärmeabgabesystem sowie Bewohneranzahl und deren Nutzerverhalten, was Auswirkungen auf die Effizienz der Anlagen mit sich bringt. Bei **Luft/Wasser-Wärmepumpen** ist in der letzten Heizsaison (HS 2022/23) ein durchschnittlicher **Wärmenutzungsgrad (WNG)** für Heizen und Aufladung des Trinkwarmwassers von **3.19** (WNG-Bereich von 2.47 bei Objekt F025 bis 4.04 bei Objekt F015) gemessen worden.

Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden überbieten diese Werte mit durchschnittlich **4.26** (WNG-Bereich von 2.89 bei Objekt F026 bis 5.26 bei Objekt F021).

Neben den jährlichen Auswertungen in Kapitel 0 «Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen» werden in Kapitel 3 in Abstimmung mit dem Auftraggeber BFE Spezialthemen bearbeitet. Dieses Jahr wurde die Dimensionierung von Wärmepumpen vertiefter analysiert. Dabei konnte eine mittlere Überdimensionierung von 45% (Median = 36%) festgestellt werden, wobei leistungsgeregelte Wärmepumpen tendenziell stärker überdimensioniert sind als nicht leistungsgeregelte WP.

Résumé

Les données de 28 installations de pompes à chaleur, sur 91 périodes de chauffe, sont disponibles au total pour le présent rapport annuel. Douze installations soutirent l'énergie de l'environnement via des sondes géothermiques, treize autres via l'air ambiant. Pour quatre installations (F008, F014, F019 et F023), l'eau chaude sanitaire (ECS) est chargée au moyen d'une pompe à chaleur séparée, appelée «chauffe-eau pompe à chaleur».

Deux immeubles collectifs supplémentaires, plus petits, ont pu être pris en considération dans les évaluations en vue du présent rapport. Une autre installation a été mise en service durant l'hiver et figurera dans le prochain rapport.

L'efficacité de toutes les installations de pompe à chaleur sera ensuite vérifiée durant au moins une période de chauffe. Si un potentiel d'optimisation réalisable est identifié, il sera par la suite concrétisé en accord avec les propriétaires. L'impact de ces mesures d'optimisation sur l'efficacité de l'installation sera analysé lors de la saison froide suivante.

Les pompes à chaleur comprises dans les mesures de terrain sont situées dans des régions climatiques différentes. Les bâtiments diffèrent au niveau de l'enveloppe du bâtiment, du système de distribution de la chaleur, ainsi que du nombre et du comportement des habitants, ce qui a des conséquences sur l'efficacité des installations. Au cours de la dernière saison de chauffe (2022/2023), on a pu mesurer un **taux moyen d'utilisation de la chaleur** (« Wärmenutzungsgrad » ou WNG en allemand) de **3,19** 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 2,47 pour l'installation F025 à 4,04 pour l'installation F015.

Les valeurs pour les installations avec **pompe à chaleur sol/eau** (sondes géothermiques) sont plus élevées, avec une moyenne à **4,26** et des taux variant de 2,89 pour l'installation F026, à 5,26 pour l'installation F021.

Les évaluations annuelles sont traitées au chapitre 0 «Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen», alors que le chapitre 3 aborde des thèmes spécifiques convenus avec l'OFEN. Le dimensionnement des pompes à chaleur a fait l'objet d'une analyse approfondie cette année, ce qui a permis de constater un surdimensionnement moyen de 45% (médiane = 36%), les pompes à chaleur à puissance variable ayant tendance à être plus fortement surdimensionnées que les autres.

1. Projektziele

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

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

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

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

Bis zum Jahr 2020 sind nur neue Wärmepumpenanlagen aufgenommen worden, welche vorwiegend in einem Einfamilienhaus (Neubau oder Sanierung) installiert sind. Ab 2021 werden nur noch Anlagen in Mehrfamilienobjekten mit einer Heizleistung von ca. 20-30 kW in die Feldmesskampagne aufgenommen. Bestandsanlagen können nicht teilnehmen, da das Messequipment vor Ort mit der Neuinstallation eingebaut werden muss. Auch werden die Wärmepumpen vor der Installation im Wärmepumpen-Testzentrum WPZ in Buchs SG ausgemessen und dabei das Messequipment der Feldmessung kalibriert. Eine Ausnahme bildete Objekt F026, dessen Wärmepumpen aufgrund der Grösse nicht nach Buchs versandt wurde.

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

1.1 Objektbeschreibungen

Im vergangenen Betrachtungszeitraum sind drei neue, kleinere Mehrfamilienhäuser (MFH) hinzugekommen. Die Objekte F027 und F029 wurden beide um 1900 herum gebaut (Bundesamt für Statistik, 2023). Das Objekt F027 wird mit einer Luftwasser-Wärmepumpe beheizt, die Objekte F028 und F029 nutzen beide eine neu erstellte Erdwärmesonde. Die Anlage F029 (EWS-WP) wird aufgrund der Inbetriebnahme innerhalb der Messperiode erst im nächsten Jahr ausgewertet.

Per Ende August 2023 befinden sich somit insgesamt 27 Anlagen in der Feldmessung, welche in diesem Bericht dargestellt werden. Die Anlagen F009 und F018 werden nicht mehr - und Anlage F029 noch nicht ausgewertet. Enthalten sind 14 Luft/Wasser-Wärmepumpen, davon zehn drehzahlgeregelte Modelle, sowie dreizehn Sole/Wasser-Wärmepumpen mit 9 drehzahlgeregelten Modellen. Bei vier Objekten wird das Trinkwarmwasser mittels separater Trinkwarmwasser-Wärmepumpe erwärmt. Der Kühlbetrieb ist bei sieben Objekten aktiviert. Die fünf Objekte F002, F010, F013, F021 und F028 kühlen passiv mittels Erdwärmesonde, die zwei Luft/Wasser-Wärmepumpen in den Objekten F015 und F025 kühlen aktiv mit Verdichter.

Aktuell gibt es mit den Objekten F022, F026, F027 und F028 vier Mehrfamiliengebäude unterschiedlicher Grösse mit auswertbaren Daten im Feldmessprogramm. Die Anzahl Wohnungen je Objekt sind in Tabelle 2 vermerkt. Objekt F019 ist die einzige Wärmepumpenanlage mit reiner Wasserfüllung der Erdwärmesonde (EWS) in dieser Messkampagne. Bei Anlage F026 wird als Fluid ein Ethanol-Wasser-Gemisch verwendet.

Zur besseren Übersicht werden diese Objekte auch in der Kategorie Sole/Wasser-Wärmepumpen aufgeführt. Tabelle 2 stellt eine Kurzübersicht aller Anlagen dar. In Tabelle 2 werden weitere wichtige Informationen je Anlage festgehalten.

Mittlerweile können pro Anlage bis zu sieben Heizperioden (2016/17, 2017/18, 2018/19, 2019/20, 2020/21, 2021/22 und 2022/2023) ausgewertet werden. Im vorliegenden Bericht werden der Übersichtlichkeit halber aber höchstens die letzten fünf Heizsaisons dargestellt. Bei neu aufgenommenen Objekten wird baubedingt in der ersten Messperiode häufig noch keine vollständige Heizsaison mit 365 Tagen gemessen. Liegen weniger als 350 Messtage vor, wird diese Heizsaison in den Abbildungen mit einem Stern gekennzeichnet. Objekte mit weniger als 300 Messtage pro «Heizsaison» werden nicht dargestellt. Dies betrifft beispielsweise Anlage F014 in der Heizsaison 2020/21 aufgrund eines längeren Datenausfalles, sodass in dieser Heizsaison nur 293.3 Messtage erfasst wurden. Bei Objekt F002 ist im Winter 2021 der Volumenströmsensor für die Senke ausgefallen, welcher auf Grund von Lieferengpässen bei Ersatzprodukten erst verspätet ausgetauscht werden konnte. Somit konnte die thermische Heizleistung nicht korrekt ermittelt werden, weshalb alle Grössen, welche diesen Messwert benötigen, in dieser Heizsaison 2020/21 nicht dargestellt werden. Die restlichen Messdaten (inklusive der thermischen Aufladeleistung) wurden korrekt erfasst und werden entsprechend dargestellt. Der Austausch des Volumenstrommessers erfolgte aber noch rechtzeitig vor Beginn der Heizsaison 2021/22.

Bei Anlage F016, einer aussenaufgestellten leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpe, trat im Dezember 2020 ein schleichender Verdichterschaden mit abnehmender Heizleistung und Effizienz auf, sodass der Verdichter am 12.01.2021 ausgetauscht worden ist. Daher sind für die Heizperiode 2020/2021 nur 345 Messtage vorhanden.

In der Heizperiode 2022/23 konnten die Messdaten bis auf wenige Minuten vollständig erfasst werden. Die Datenverfügbarkeit liegt bei 99.98%. Dies bedeutet, dass im Mittel nur 24 Zeitschritte (4 Minuten) von den 3.2 Mio. Zeitschritten pro Jahr und Anlage fehlen. Das Messsystem ist damit sehr zuverlässig.

Tabelle 1: Übersicht der Objekte

Objektnummer	Beginn der Messung	MFH	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung / Altbau	Leistungs-Regelung	Kühlung aktiviert	WP-Boiler
1	11.05.2017		X		X		X		
2	01.01.2017		X		(X)	X	X	X	
3	01.07.2016		X			X	X	X	
4	01.07.2017			X		X	X		
5	25.10.2017		X		X				
6	01.08.2017 (bewohnt seit 24.03.2018)			X		X	X		
7	12.01.2017			X		X		?	
8	12.01.2017		X		X				X
9	wird nicht mehr analysiert								
10	10.11.2018			X		X		X	
11	01.08.2017		X			X	X		
12	25.01.2019		X			X	X		
13	01.08.2017			X		X	X	X	
14	01.12.2017			X		X	X		X
15	01.01.2018		X			X	X	X	
16	01.11.2017		X			X	X		
17	06.11.2018		X			X	X		
18	wird nicht mehr analysiert								
19	09.05.2019 (bewohnt seit 22.12.2018)			X		X			X
20	10.05.2019		X			X			
21	09.02.2020			X		X	X	X	
22	13.07.2019	X		X		X	X		
23	27.07.2019		X		X		X	X	X
24	13.02.2020		X		X		X		
25	23.09.2020		X			X	X	X	
26	11.02.2021	X		X		X	4		
27	24.11.2021	X	X			X	X		
28	30.08.2022	X		X		X		X	
29	25.05.2023	X		X		X	X		
30	Oktober 2023	X	X			X	2	?	

¹ X = Stufenlos (Inverter), Zahl = Anzahl Verdichterstufen

Tabelle 2: Kurzbeschreibung der Objekte

Objektnummer	Anmerkungen:
1	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (über 20 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung) • Seit Servicewartung 24.09.2019 wöchentliche Legionellenschaltung aktiv (spät abends) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = n.a. • SCOP₅₅ = n.a. • Keine Sperrzeit
2	<ul style="list-style-type: none"> • Objekt wurde im Dez. 2016 bezogen. • Heizt und kühlt immer wieder am gleichen Tag • Kühlen wurde nachträglich aktiviert, wird messtechnisch nicht erfasst • Heizstäbe: Nur TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 4.9 • SCOP₅₅ = n.a. – Energielabel A++ • Sperrzeit: 1h, mittags • Ausfall des Volumenstromsensor im Frühjahr 2021. Daher ist diese Anlage nicht in der Auswertung 2020/21 enthalten
3	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (über 20 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung) • Seit Sept. 2016 kein Kühlbetrieb mehr aufgetreten • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 4.78 • SCOP₅₅ = 3.68 • Sperrzeit: 1h, mittags • Ausfall WP Anfang Februar 2023, Schaden an einem Wärmeübertrager der WP. Notheizung war bis Ende Februar aktiv (H+WW). • Sperrzeit: 1h, mittags

Objektnummer	Anmerkungen:
4	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau wärmeisolierter Fenster im Dez. 2017 • WP läuft öfters 24h durch (z.B. vom 11. Nov. bis 11. Dez. 2017 durchgehend in Betrieb) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.23 • SCOP₅₅ = 4.13 • Schwerkraftzirkulationsleitung • Keine Sperrzeit
5	<ul style="list-style-type: none"> • Messung seit dem 25.10.2017, aber erst seit dem 24.3.2018 bewohnt • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 3.85 • SCOP₅₅ = 2.95 • Keine Sperrzeit
6	<ul style="list-style-type: none"> • Solarthermie Unterstützung für Heizen und Trinkwassererwärmung • Holzofen in die Heizungsanlage eingebunden • Heizstab in der WP ist sechsstufig 1-6 kW modulierend. Aufgrund kalter Sonde häufiges Zuschalten? • Unterkühlte Erdwärmesonde (Baujahr EWS: 1994) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 4.20 • Keine Sperrzeit
7	<ul style="list-style-type: none"> • Heizgrenze nicht korrekt eingestellt. Heizt teilweise auch an Tagen mit über 20°C. • Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Samstag für 0.5 bis 1h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet. Auffallend ist, dass der Elektroersatz 2mal hintereinander einschaltet) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.43 • SCOP₅₅ = 4.03 • Sperrzeit: 3x 1h (morgens, mittags, abends)

Objektnummer	Anmerkungen:
8	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmepumpenboiler mit Kellerluft • Aufgrund der zwei Wärmepumpen können die gemeinsamen Kennwerte JAZ+, COP+ nicht ermittelt werden => Es werden nur die Kennwerte der Betriebsziele JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung betrachtet! • Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (20 bis 42 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung) • Heizstäbe: Pufferspeicher und Trinkwarmwasser-Wärmepumpe • SCOP₃₅ = 4.20 • SCOP₅₅ = n.a. • Sperrzeit: 1h mittags
9	<ul style="list-style-type: none"> • Anlage wird nicht weiter ausgewertet.
10	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäude war bis 01.07.2020 wegen Umbau nur teilweise bewohnt • Betriebszustand zwischen Inbetriebnahme (November 2018) und Juli 2020 teilweise nicht korrekt erfasst und daher im Bericht nicht dargestellt • Erdsonde mit 280m zunächst mit Wasser geplant, WP-Hersteller schreibt jedoch Glykalmischung vor. • Passive Kühlung im Sommer deutlich zu sehen (Geocooling via Erdwärmesonde) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.6 • SCOP₅₅ = n.a. • Keine Sperrzeit
11	<ul style="list-style-type: none"> • 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) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 4.35 • SCOP₅₅ = 3.38 • Sperrzeit: 1h mittags

Objektnummer	Anmerkungen:
12	<ul style="list-style-type: none"> • Bis 24.1.2019 fehlte Temperatursensor im Trinkwarmwasserspeicher, daher erfolgten bis dahin die Aufladungen ausschliesslich mit dem Elektroheizstab • 1/3 der Aufladeenergie für Legionellenschaltung mittels Elektroheizstab • SCOP₃₅ = 5.05 • SCOP₅₅ = 3.90 • Sperrzeit: 1h mittags (wahrscheinlich keine Sperrzeit Samstag, Sonntag und Feiertage)
13	<ul style="list-style-type: none"> • Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Freitag für ca. 0.5 h bis 0.9 h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet.) • WP läuft am Wochenende öfters 24h durch (unter der Woche häufig 22.9h aufgrund einer 1h EW-Sperre) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 3.95 • Sperrzeit: 1h mittags (wahrscheinlich keine Sperrzeit Samstag, Sonntag und Feiertage)
14	<ul style="list-style-type: none"> • Einzige Anlage mit Aussenluft als Quelle für WP-Boiler Wärmepumpenboiler Austausch März 2019. Neues Modell hat 700 W Heizstab. Unterscheidung Heizstab vs. Verdichterbetrieb nicht mehr eindeutig möglich. WP-Boiler kann nun Abtauen, Analysen bei -8°C Aussentemperaturen deuten darauf hin, dass kein Heizstab mehr benötigt wird (Bsp. 15.01.2021, Verlauf der Verdichterleistung sowie Quellen Ein- und Ausgangstemperatur der TWW) • Legionellen: Dürfte jeweils am Montag aktiviert sein: Zuerst mit dem TWWP-Verdichter, dann mit dem TWWP-Heizstab (Zeitpunkt dürfte temperaturgesteuert sein, da sie zu unterschiedlichen Uhrzeiten erfolgen [Bsp. 9.8 & 16.8.22]) • Aufgrund der zwei Wärmepumpen können die gemeinsamen Kennwerte JAZ+, COP+ nicht ermittelt werden => Es werden nur die Kennwerte der Betriebsziele JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung betrachtet! • Heizstäbe: Pufferspeicher und Trinkwarmwasser-Wärmepumpe • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 3.95 • nur 293 Messtage in HS 2020/21, Grund: Ausfall der Datenübertragung • keine Sperrzeit

Objektnummer	Anmerkungen:
15	<ul style="list-style-type: none"> • Doppelhaushälfte mit Minergie-Standard, Baujahr 2005 • Wärmepumpe steht in einem Gerätehaus (Aussenklima) • TWW über Frischwasserstationen • Besitzer ist HLK-Ingenieur und Betriebsoptimierer (Eigenverbrauchsoptimierung mit der installierte PV-Anlage, besonders auch für die Kühlfunktion) • Heizstäbe: Nur im TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 4.83 • SCOP₅₅ = 3.98 • Keine Sperrzeit
16	<ul style="list-style-type: none"> • Heizstäbe: WP, TWW-Speicher und Pufferspeicher • Legionellen Schaltung: Heizstab des TWW-Speichers kommt jede Woche für ca. 0.5 bis 1.2 Stunden (Nacht Samstag auf Sonntag) • WP-Störung am 4.2.18 – danach war der Heizstab im Pufferspeicher aktiv. Nach entsprechender Information wurde der Heizstab-Einsatz dann wieder deaktiviert. • SCOP₃₅ = n.a. – Energielabel A++ • SCOP₅₅ = n.a. – Energielabel A++ • Keine Sperrzeit
17	<ul style="list-style-type: none"> • Anfänglich tägliche Legionellenschaltung mit Heizstab, erste Inbetriebnahme nicht vollständig, zweite IB am 21.01.2019: Nun wöchentliche Legionellenschaltung • Auffällige Häufung der Heizstabbetriebsstunden im September 2022. Inverter hatte eine Störung. • SCOP₃₅ = 4.41 • SCOP₅₅ = 3.37 • Keine Sperrzeit
18	<ul style="list-style-type: none"> • Anlage wird nicht weiter ausgewertet.

Objektnummer	Anmerkungen:
19	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmepumpenboiler im Keller (Waschküche) • Wassergefüllte Erdwärmesonde (und spezielle Hinterfüllung der Erdwärmesonde) • Identische Wärmepumpe zu Anlage F007, jedoch TWW mittels Wärmepumpenboiler • SCOP₃₅ = 5.43 • SCOP₅₅ = 4.03 • Keine Sperrzeit
20	<ul style="list-style-type: none"> • Ersatz einer noch funktionsfähigen Luft/Wasser-Wärmepumpe aus dem Jahr 1994 • Aufladung immer abends (ca. um 20 Uhr) • Legionellenschaltung wöchentlich (anschiessen an den normalen Aufladebetrieb) • SCOP₃₅ = n.a. • SCOP₅₅ = n.a. • Keine Sperrzeit
21	<ul style="list-style-type: none"> • Aufladung immer nachmittags (um 15 Uhr) • Legionellenschaltung wöchentlich (anschiessen an den normalen Aufladebetrieb) • Teilweise Kühlbetrieb im Sommer • SCOP₃₅ = 5.2 • SCOP₅₅ = 4.0 • Keine Sperrzeit
22	<ul style="list-style-type: none"> • SCOP₃₅ = n.a. • SCOP₅₅ = n.a. • Keine Sperrzeit • 2 Wohnungen
23	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmepumpenboiler in kleinem Heizungskeller • Kühlmöglichkeit am 18.08.2020 aktiviert, 2023 kein Kühlbetrieb gemessen • Minergie-Holzbauweise aus den 1990igern • SCOP₃₅ = 4.33 • SCOP₅₅ = 3.33 • Keine Sperrzeit

Objektnummer	Anmerkungen:
24	<ul style="list-style-type: none"> • Zirkulationspumpe nicht aktiviert, da starke Schwerkraftzirkulation (Analyse für mögliche Optimierung 2023 durchgeführt) • SCOP₃₅ = 4.5 • SCOP₅₅ = 3.4 • Keine Sperrzeit
25	<ul style="list-style-type: none"> • Zweifamilienhaus • Begleitheizung für TWW • Heizstäbe: Der im TWW-Speicher wird häufig verwendet (PV-Optimierung), der WP-Heizstab ist deutlich seltener in Betrieb. • SCOP₃₅ = n.a. • SCOP₅₅ = n.a • Sperrzeit 1h mittags (Mo-Fr) • Die Vorlauftemperatur wird nicht nach Aussentemperatur geregelt. Optimierung in Vorbereitung (Stand September 2023)
26	<ul style="list-style-type: none"> • 2 MFH (2x 18 Wohnungen) • Haus B über Fernleitung mit Haus A verbunden • Haus A mit Frischwasserstation (Speicher WW und H getrennt) • Haus B mit Magroladung (sehr ungünstig für Wärmepumpe) • Aktive Zirkulation bei beiden Häusern • Kein Heizstab • 2 Wärmepumpen mit je 2 Kompressoren • SCOP₃₅ = 4.57 • SCOP₅₅ = 3.66 • Keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb
27	<ul style="list-style-type: none"> • SCOP₃₅ = n.a. • SCOP₅₅ = n.a. • 3 Wohnungen

Objektnummer	Anmerkungen:
28	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund einer Gewächshausheizung nicht direkt mit anderen Anlagen vergleichbar. • SCOP₃₅ = 4.94 • SCOP₅₅ = 3.73 • 2 Wohnungen
29	<ul style="list-style-type: none"> • Neuanlage, wird erst im Jahresbericht 2024 ausgewertet • SCOP₃₅ = 4.94 • SCOP₅₅ = 3.73 • 4 Wohnungen
30	<ul style="list-style-type: none"> • Neuanlage, wird erst im Jahresbericht 2024 ausgewertet • 2-stufige WP • 3 Wohnungen

Die Höhe des Gebäudestandortes, die Energiebezugsfläche (EBF), die Anzahl der gemeldeten Personen sowie Informationen zum Wärmeverteilsystem (Radiator, Fussbodenheizung, etc.) sind in Tabelle 3 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, 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 3: Nächstgelegene Meteo-Messstation, Energiebezugsflächen (EBF), Höhe des Gebäudestandortes, gemeldete Personen und Angaben zum Wärmeverteilsystem

Objekt	Meteostation für Auslegepunkt	EBF [m ²]	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	200	465	4	FBH und RH
12	Glarus	200	427	unb.	FBH und RH
13	Zürich-MS	190	419	4	FBH
14	Zürich-MS	163	393	5	FBH
15	Zürich-MS	224	402	5	FBH
16	Zürich-MS	225	541	5	RH
17	St. Gallen	187	737	2	FBH
19	St. Gallen	195	600	unb.	RH
20	Wynau	140	458	unb.	FHB
21	St. Gallen	278	834	2	FBH
22	Schaffhausen	466	428	10	FBH
23	Güttingen	240	445	4	FBH
24	Güttingen	173	478	2	RH
25	Vaduz	318	495	6	FBH
26	St. Gallen	4270	780	44	RH
27	Zürich-MS	426	456	unb.	RH
28	Güttingen	302	505	6	FBH und RH
29	Zürich -MS	-	-	-	-
30	Zürich -MS	-	-	-	-

* FBH = Fussbodenheizung, RH = Radiatoren-Heizung

Die geografische Verteilung der Wärmepumpenanlagen ist in Abbildung 1 dargestellt.

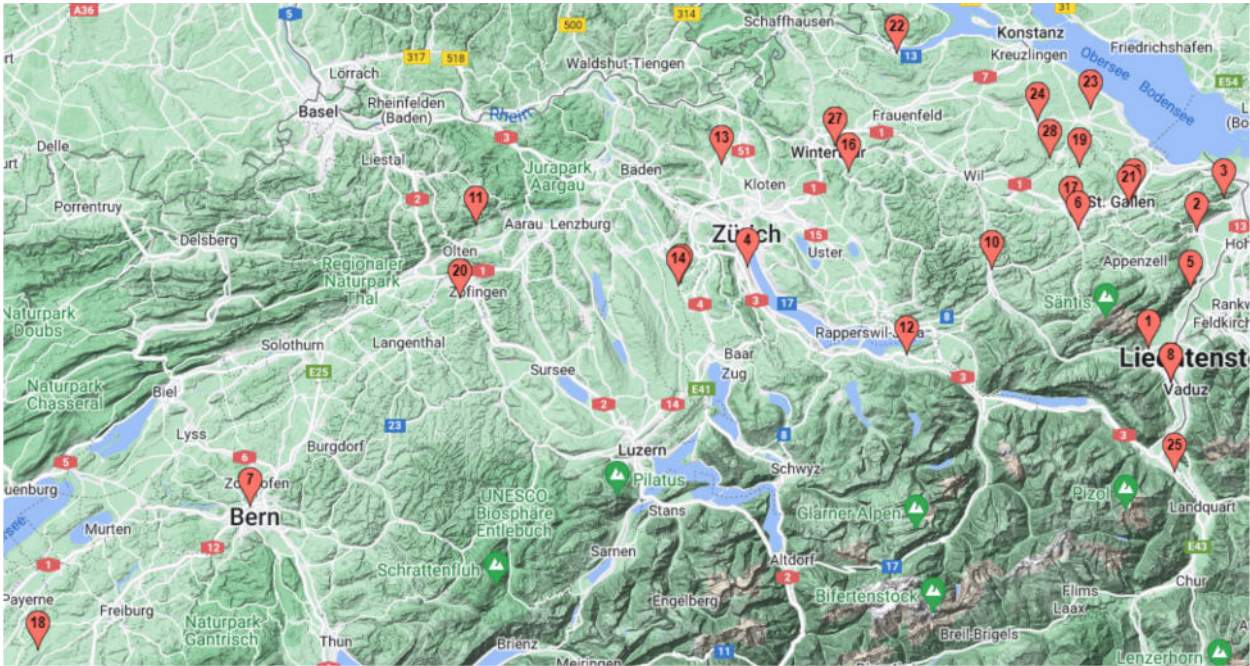


Abbildung 1: Standorte der Wärmepumpenanlagen mit zugeordneter Objekt Nummer. Die Aufstellungsorte erstrecken sich entsprechend der Forderung über das Schweizer Mittelland (Grafik erstellt mit <https://de.batchgeo.com/>).

1.2 Systemgrenzen und Kennzahlen

In Analogie zu den beschriebenen Anwendungshinweisen der verschiedenen Nutzungsgrade des BFE werden unterschiedliche Kennzahlen pro Wärmepumpenanlage dargestellt. Aufgelistet sind nur Kennwerte, welche in den nachfolgenden Abbildungen auch dargestellt werden.

Die Effizienz der Wärmepumpe wird mit der Jahresarbeitszahl JAZ+, die Effizienz der Wärmepumpenanlage mit dem Wärmenutzungsgrad WNG und die Effizienz der Trinkwarmwasser-Aufbereitung in Verbindung mit dem Nutzerverhalten wird mit dem Systemnutzungsgrad SN_{TWW} beschrieben. Für die Messdatenauswertung werden folgende Formeln und Messgrößen verwendet:

$$JAZ+ = (Q_{Heizen} + Q_{Aufladung}) / (E_{Tot} - E_{UP_Senke} - E_{ext_HS}) \quad \text{Jahresarbeitszahl [-]}$$

$$WNG = (Q_{Heizen} + Q_{Aufladung}) / E_{Tot} \quad \text{Wärmenutzungsgrad [-]}$$

$$SN_{TWW} = Q_{TWW} / E_{Aufladung} \quad \text{Systemnutzungsgrad Trinkwarmwasser [-]}$$

Mit:

Q_{Heizen}	Thermische Energie im Heizbetrieb [kWh]
$Q_{Aufladung}$	Thermische Energie im Aufladebetrieb [kWh]
Q_{TWW}	Thermische Energie des gezapften Trinkwarmwassers
E_{Tot}	Elektrische Energie des gesamten Wärmepumpensystems [kWh]
E_{UP_Senke}	Elektrische Energie der Umlaufpumpe Senke [kWh]
E_{ext_HS}	Elektrische Energie der externen Heizstäbe [kWh]

Die Jahresarbeitszahl JAZ+ bezieht sich exklusiv auf die Wärmepumpe, weshalb nur der elektrische Energiebedarf des Verdichters, der Steuerelektronik und des Gebläses (bei Luft/Wasser-Wärmepumpen) bzw. der Quellenpumpe (bei Sole/Wasser-Wärmepumpen) berücksichtigt werden.

Der Wärmenutzungsgrad (WNG) beschreibt die Effizienz des Wärmeerzeugungs- und Verteilungssystem. Deshalb wird auch der elektrische Energiebedarf der Senke-Umwälzpumpe sowie 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 somit auch die Speicherverluste des Trinkwarmwasserspeichers und ggf. Zirkulationsverluste. Ein geringer TWW-Bedarf führt im Allgemeinen zu einem geringen Energiebedarf, aber auch zu einem geringeren Effizienzkennwert SNG_{TWW} , da die auftretenden Verluste einer kleineren Nutzenergie-menge gegenübergestellt werden und dadurch einen grösseren Anteil haben. Aus energetischer Sicht ist ein tiefer Warmwasserbedarf erstrebenswert.

Der SNG_{TWW} kann auch bei den Trinkwarmwasser-Wärmepumpen ermittelt werden, wodurch ein Vergleich mit den zentralen Systemen (WP für Heizung und Aufladung) möglich ist.

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

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

Mit:

Q_{Heizen}	Thermische Energie im Heizbetrieb [kWh]
$Q_{\text{Aufladung}}$	Thermische Energie im Aufladebetrieb [kWh]
E_{Heizen}	Elektrische Energie im Heizbetrieb [kWh]
EBF	Energiebezugsfläche [m ²]

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

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

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

Mit:

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

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

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

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

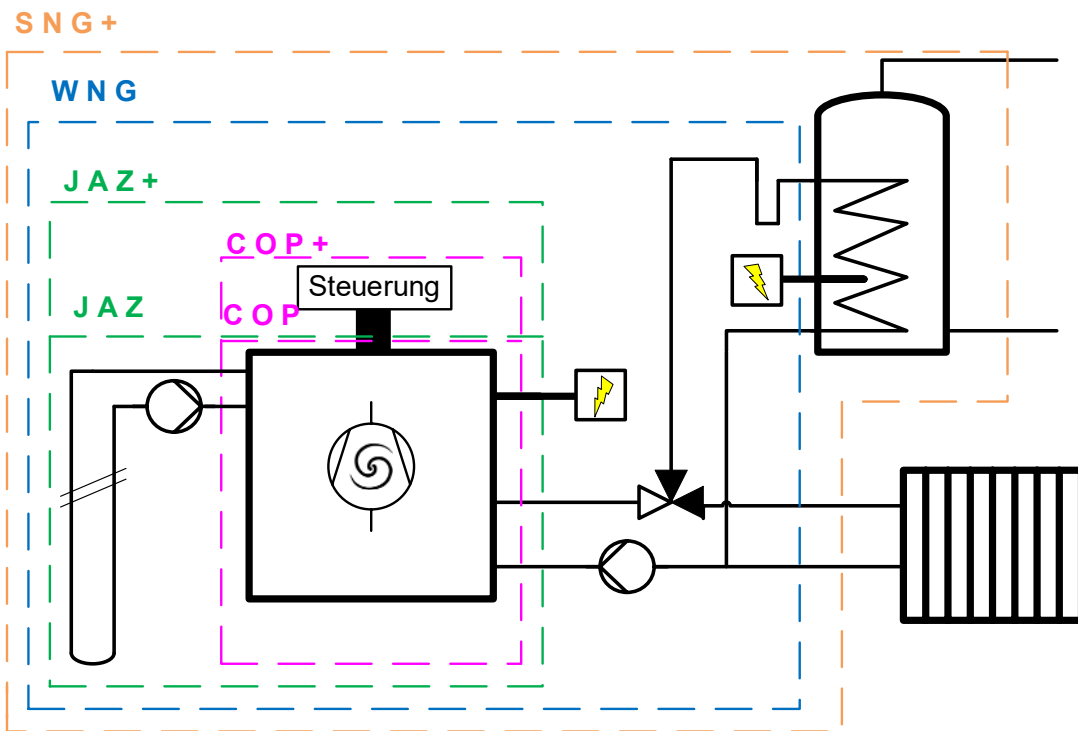


Abbildung 2: Vereinfacht dargestellte Systemgrenzen einer Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Direktheizkreis und Trinkwassererwärmung mittels Speicher.

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

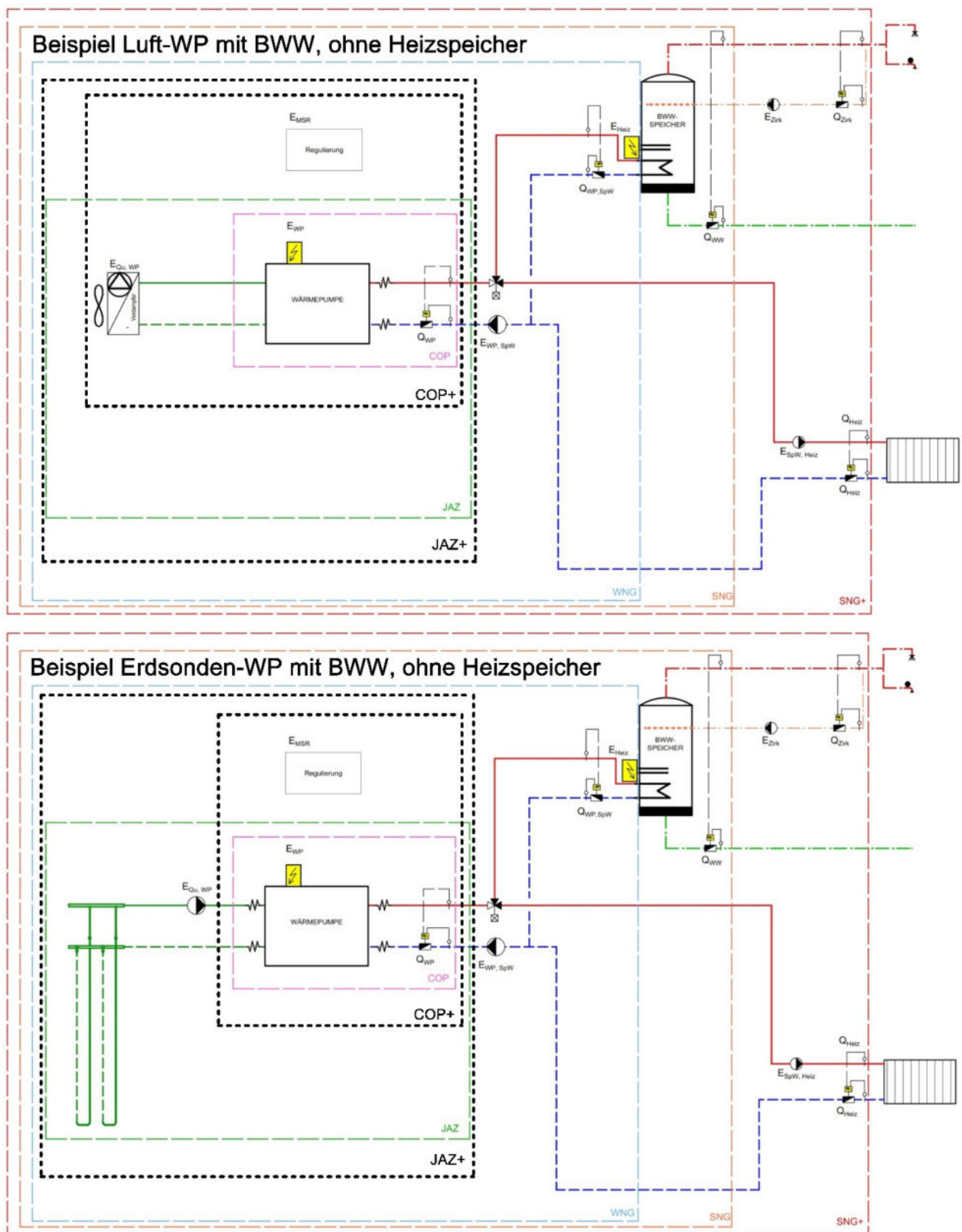


Abbildung 3: Systemgrenzen gemäss BFE für Luft- und Erdwärmesonden-WP mit Trinkwasserspeicher, aber ohne Heizspeicher. Der Kennwert JAZ+ beinhaltet im Gegensatz zum COP+ den Energiebedarf der Quellen-Umwälzpumpe bei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

2. Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen

In diesem Kapitel werden einige Verläufe und Kennwerte der Wärmepumpenanlagen der Heizsaisons 2018/19 bis 2022/23 dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, werden bei älteren Anlagen maximal die letzten 5 Heizsaisons abgebildet, ältere Verläufe sind in den vorigen Jahresberichten enthalten. Neben der allgemeinen Energieeffizienz wird auch auf den Einfluss der Quellen- bzw. der Senken Temperatur eingegangen. Die ausgewerteten Daten beziehen sich auf Heizsaisons, welche Definitionsgemäss den Zeitraum vom 1. September bis 31. August des Folgejahres beinhaltet. Objekte, welche innerhalb einer Heizsaison nur 300 bis 350 Messtage aufweisen (z.B. aufgrund späterer Inbetriebnahme), werden in den Grafiken mit einem Stern (*) gekennzeichnet. Diese Werte sind dann nur begrenzt aussagekräftig und können nicht ohne Weiteres mit den Folgeperioden verglichen werden.

2.1 Vergleich der Effizienzkennziffern (JAZ und WNG)

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

Bei den Objekten F008, F014, F019 und F023 wird das Trinkwarmwasser mittels einer eigenen Trinkwarmwasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Dadurch können bei diesen vier Systemen die Auflade- Kennziffern nicht ermittelt werden. Die JAZ+ und der WNG beziehen sich deshalb bei diesen Objekten nur auf den Heizbetrieb. Mit einer Historie von bis zu sieben Messperioden können nun auch Veränderungen bei einzelnen Anlagen festgestellt werden. Die Gründe dafür sind nicht immer eindeutig zuordenbar. Zur Übersichtlichkeit werden maximal 5 Heizperioden dargestellt.

Die Heizgradtage (HGT) sind ein quantitativer Indikator bzgl. klimatischer Unterschiede zwischen den einzelnen Heizperioden. Den qualitativen Verlauf einer Heizsaison, welcher auch einen Einfluss auf die Effizienz hat, spiegeln die HGT nicht wider (z.B. kurze, intensive Kältewellen). Weitere Einflussfaktoren sind z.B. Nutzerverhalten, Belegungssituation, veränderte Einstellungen an der Heizungsanlage (z.B. Temperatursollwerte), oder auch variierende Solarstrahlung. Die Heizgradtage sind dem Energiebedarf in den Abbildungen 12 bis 15 gegenübergestellt.

Abbildung 4 zeigt die Effizienzkennzahlen der gemessenen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen über die letzten fünf Heizperioden.

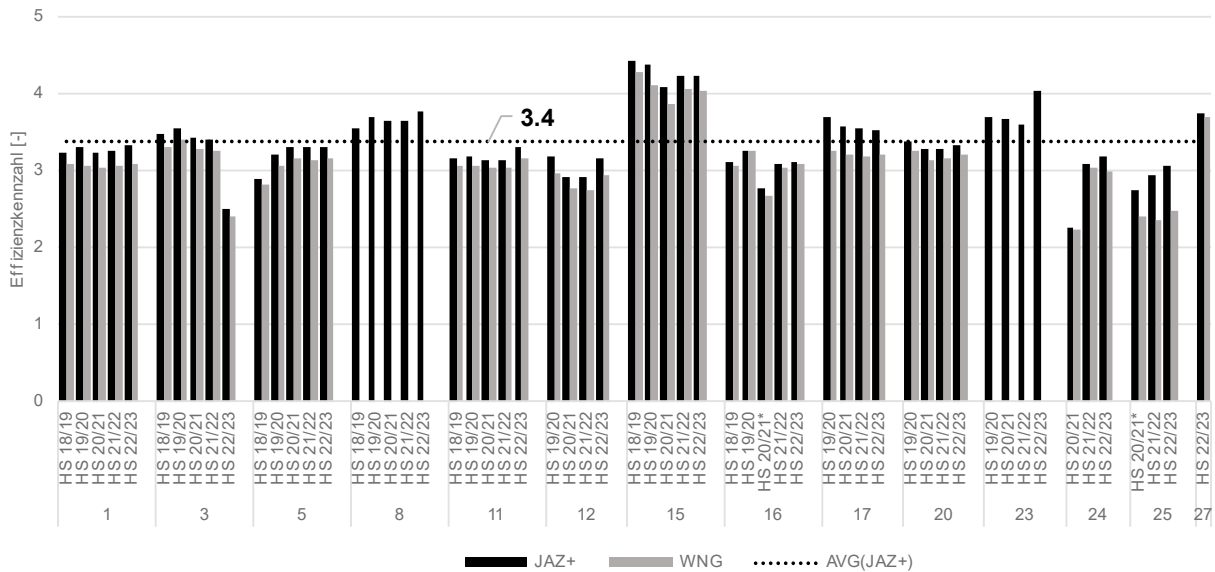


Abbildung 4: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Luft/Wasser-Wärmepumpensystemen

Die meisten Anlagen liegen um eine JAZ+ von 3 herum. Die Anlage F015 fällt mit einer JAZ+ von über 4 positiv auf, diese Anlage ist stark optimiert und wird mit tiefen Vorlauftemperaturen betrieben. Weiter sind die Anlagen F008, F016 und F023 mit einer JAZ+ von über 3.5 leicht besser als der Mittelwert. Eine hohe Effizienz bedeutet nicht direkt, dass eine Anlage gut eingestellt ist. Eine hohe Effizienz kann auch von einer zu hoch eingestellten Heizgrenze kommen, da dabei vermehrt Betriebsstunden bei hohen Aussentemperaturen und tiefen Vorlauftemperaturen auftreten. Das Ziel einer energieeffizienten Wärmepumpenanlage ist immer, den elektrischen Energiebedarf zu minimieren und dabei den Komfort beizubehalten.

Bei Anlage F003 gab es am 29.01.2023 einen Schaden bei einem Plattenwärmeübertrager der Wärmepumpe. Infolgedessen war ab dem 3. Februar bis zur Reparatur am 28. Februar anstatt der Wärmepumpe ausschliesslich der Heizstab der WP-Notheizung in Betrieb. In diesem Zeitraum benötigte der Heizstab 2'775 kWh elektrische Energie, die JAZ+ viel in dieser Heizsaison entsprechend von ca. 3.4 auf 2.4. Der elektrische Gesamtenergiebedarf stieg von ca. 6.7 MWh (HS 2021/22) auf 8.6 MWh (HS 2022/23), obwohl die Heizgradtage um 3% sanken. Bei Objekt F023 wurden die Heizkennlinie optimiert, dadurch reduzierten sich die Heiztemperaturen um 6K, was zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führte. Zum Beispiel stieg die JAZ+ von ca. 3.6 auf 4.0, JAZ+_Heizen stieg von 3.6 auf 4.1, was einer Steigerung von knapp 13% entspricht.

Es gibt weiterhin noch Anlagen, deren Effizienzen unter den Erwartungen liegen. Beispielsweise Anlage F025 (Neubau 2019, FBH). Dort gibt es aktuell noch Optimierungspotential bezüglich Einstellung der Heizkurve und der PV-Eigenverbrauchsoptimierung, welche hier noch häufig mithilfe des Heizstabes erfolgt. Der elektrische Bedarf für den Heizstab im TWW-Speicher belief sich in der Heizsaison 2022/23 auf 1'687 kWh. Im Gegensatz dazu war der elektrische Energiebedarf für den Verdichter der Wärmepumpe mit 4'691 kWh nur 2.7-mal höher als der elektrische Bedarf des TWW-Heizstabes. Der thermische Energieerzeugung der Wärmepumpe ist aber ca. 8-mal höher als die des TWW-Heizstabes.

Die Effizienzkennzahlen der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen werden in Abbildung 5 dargestellt. Anlage F002 wies in Heizsaison 2020/21 einen defekten Volumenstrommesser im Senkenkreis auf (siehe Kapitel 1.1), weshalb in der entsprechenden Heizsaison keine Werte dargestellt wurden, die diese Sensordaten benötigen.

Die Sole/Wasser-Wärmepumpen weisen entsprechend der Messdaten eine hohe Varianz bei den Jahresarbeitszahl JAZ+ auf. Der Tiefstwert liegt bei 2.9 (Anlage F026, MFH), der Höchstwert bei 5.9 (Anlage F019, EFH). Bei Anlage F019 wurden die Vorlauftemperaturen um 3K reduziert, was eine wesentliche Effizienzsteigerung im Vergleich zum Vorjahr bringt: Die JAZ+ stieg von 5.23 auf 5.90, was einer Steigerung von knapp 13% entspricht.

Die Wärmepumpentechnologie, die Quellentemperatur sowie die benötigten Temperaturniveaus eines Objektes haben einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz einer Wärmepumpenanlage. Bemerkenswert ist die hohe JAZ+ von über 5 der Anlagen F013, F019 und F021. Die Gründe hierfür liegen einerseits an den günstigen Temperaturniveaus der Wärmequelle und –senke (siehe Abbildung 7) bzw. auch an der fehlenden TWW-Aufbereitung bei Anlage F019, welche eine separate Trinkwarmwasser-Wärmepumpe hat. Über alle Heizperioden weist Anlagen F006 mit einem Wert von 3.0 den tiefsten WNG auf. Die Erdwärmesonde dieser Anlage ist fast 30 Jahre in Betrieb und überbelastet, was zu tiefen Quellentemperaturen führt (detaillierte Analyse in Kapitel 2.6). Anlage F026 versorgt ein Mehrfamilienhaus und weist nach der ersten Messperiode (und noch vor ggf. möglichen Optimierungsmassnahmen) ebenfalls einen WNG von nur 3.0 auf. Den höchsten WNG von 5.26 erreichte Anlage F021, welche tiefe Vorlauftemperaturen im Heiz- und Aufladebetrieb ausweist.

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

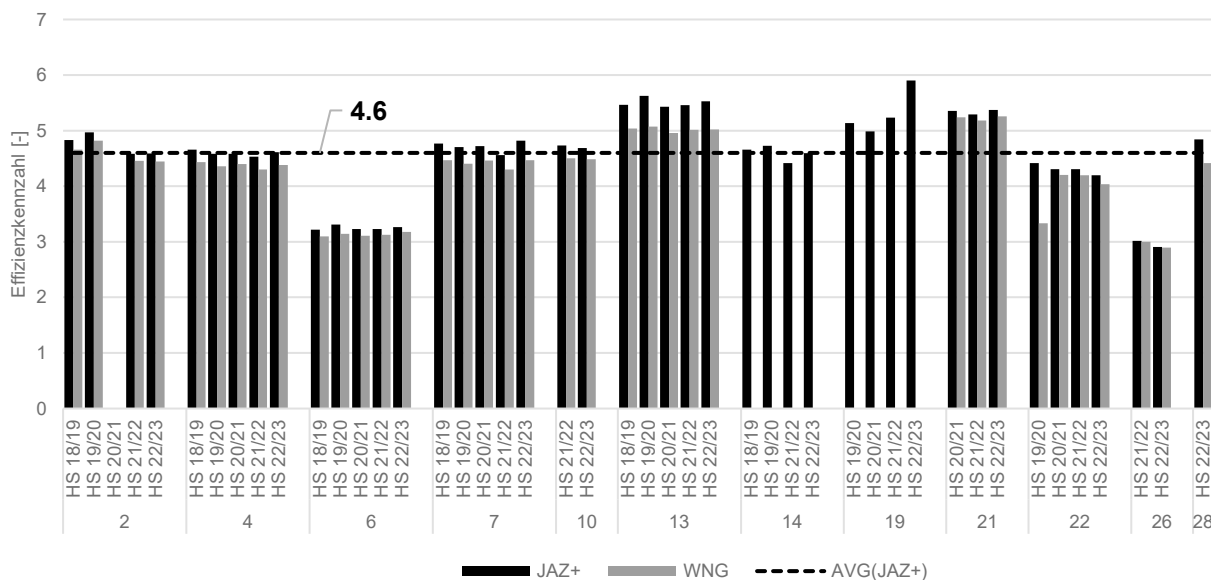


Abbildung 5: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Sole/Wasser-Wärmepumpensysteme

Wie bereits erwähnt, wurde die Vorlauftemperatur bei Objekt F019 reduziert. Zusätzlich dazu sank der Heizwärmebedarf von über 85 kWh/m² auf unter 70 kWh/m².

Bei Objekt F006 liegt die minimale Solemitteltemperatur bei -2.6 °C. Die Erdwärmesonde wird seit 1994 betrieben und liegt bereits jetzt eindeutig unter dem Sollzustand nach SIA384/6 von -1.5 °C nach 50 Jahren.

Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen aufgrund der häufig tieferen Quellentemperaturen eine geringere Effizienz auf als Sole/Wasser-Wärmepumpen (5.1 °C vs. 8.7 °C im Schnitt über alle LWWP vs. SWWP-Anlagen in HS 2022/23, Details siehe Kapitel 2.5). Der in der letzten Heizsaison über alle ausgewerteten Luft/Wasser-Wärmepumpen gemittelte JAZ+ liegt bei 3.4, der Mittelwert aller Sole/Wasser-Wärmepumpen liegt bei 4.6. Die JAZ+ der besten Sole/Wasser-Wärmepumpen liegt mit 5.9 genau 1.7 Punkte über der JAZ+ der besten Luft/Wasser-Wärmepumpe, welche 4.2 aufweist. Bei den jeweils schlechtesten Systemen beträgt der Unterschied nur 0.15 Punkte (2.91 / 3.06).

Ähnlich verhält es sich auch mit dem über alle Anlagen gemittelten WNG. Der in der letzten Heizsaison über alle Luft/Wasser-Wärmepumpen gemittelte Wert liegt bei 3.2. Die Sole/Wasser-Wärmepumpen weisen einen um 1.1 Punkte höheren mittleren WNG von 4.3 auf. Diese Mittelwerte variieren bislang von Heizperiode zu Heizperiode nur um etwa bei +/- 0.1 Punkte.

2.2 Einfluss des Temperaturniveaus

Die verschiedenen Quellen- und Senken-Temperaturniveaus haben einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz von Wärmepumpenanlagen. Für die korrekte Ermittlung der Temperatur-Kennwerte dürfen ausschliesslich jene Zeitbereiche herangezogen werden, in welchen die Wärmepumpe in Betrieb war (Kriterium: «Verdichter Ein»). In den folgenden Grafiken werden die unterschiedlichen Temperaturniveaus entsprechend den Betriebsmodi «Heizbetrieb» oder «Aufladebetrieb» dargestellt.

In den Abbildungen werden dabei folgende Abkürzungen verwendet:

- T_Quin_Heizen: Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Heizbetriebs» der Wärmepumpe.
- T_Quin_AL: Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Aufladebetriebs» der Wärmepumpe.
- T_VL_Heizen: Mittelwert der Senken-Vorlauf-Temperatur, während des «Heizbetriebs» der Wärmepumpe.
- T_VL_AL: Mittelwert der Senken-Vorlauf-Temperatur, während des «Aufladebetriebs» der Wärmepumpe.

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

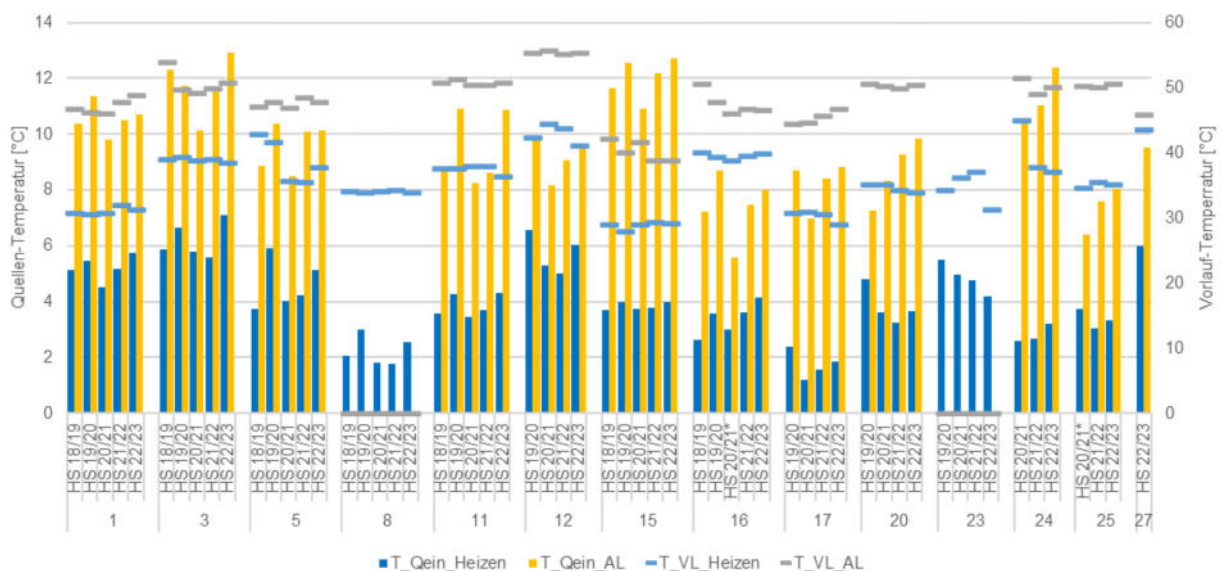


Abbildung 6: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Luftansaugung) und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsmodi «Heizen» und «Aufladung» für Luft/Wasser Wärmepumpen. Die Objekte 8 und 23 verfügen über eine zusätzliche Trinkwarmwasser-Wärmepumpe,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

In der Heizsaison 2022/23 weisen alle Anlagen weniger Heizgradtage auf als in beiden Jahren davor. Der letzte Winter war tendenziell mild, entsprechend sind auch die Quellentemperaturen bei den Luft-Wasser Wärmepumpen im Mittel höher als in den Vorjahren.

Die letzten beiden Heizsaisons weisen in Bezug auf die Quelleneintrittstemperaturen der meisten Luft/Wasser-Wärmepumpen keine grossen Unterschiede auf. Auch die Vorlauf-Temperaturen blieben im Heizbetrieb als auch bei der Aufladung ähnlich, mit Ausnahme der Anlage F023. Hier kam es zu einer Reduktion der Vorlauf-Temperaturen von 6 K.

Anlage F015 und F017 weisen im Heizbetrieb mit 29.1 °C bzw. 30.1 °C die tiefsten mittleren Vorlauf-Temperaturen auf. Bei der Aufladung weist Anlage F015, welche das Trinkwasser mittels Frischwasserstation erwärmt, mit einer mittlerer Vorlauf-Temperatur von 38.8 °C ebenfalls die tiefste Temperatur aus. Der Abstand zur zweitiefsten Temperatur (Anlage F027) beträgt hier ca. 7 Kelvin.

Auffallend ist, dass die Quellentemperatur im Heizbetrieb der LWWP bei Anlage F019 im Heizbetrieb mit jedem Betriebsjahr stetig sinkt, bei allen anderen Anlagen jedoch steigt oder konstant ist.

Das unterschiedliche Verhalten zeigt sich auch bei den Energiekennzahlen für den Heizbetrieb. Die mittlere Quellentemperatur während der Aufladung war hingegen bei allen Anlagen in der Heizsaison 2022/23 etwas höher als 2021/22. Trotzdem konnte für den Aufladebetrieb kein einheitlicher Anstieg der Effizienzkennzahlen festgestellt werden. Dies konnte bereits im letzten Jahr beobachtet werden. Eine eindeutige Erklärung für diesen Effekt steht noch aus.

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

Die Anlagen F014 und F019 haben eine separate TW-Wärmepumpe, weshalb die Werte der TW-Aufladung nicht dargestellt werden können.

Anlage F006 weist mit ca. 43 K im Heizbetrieb und ca. 51 K im Aufladebetrieb die grössten Temperaturhübe aus. Hier liegen hohe Senkentemperaturen für die Radiatorenheizung und niedrige Quellentemperaturen der Erdwärmesonde vor. Anlage F014 weist ebenfalls tiefe Quellentemperaturen auf. Die Jahresmitteltemperatur einer Erdwärmesonde ist für eine Sonden-Zustandsbeurteilung nicht ausreichend, da vor allem die im Jahresverlauf minimal aufgetretene Quellenmitteltemperatur betrachtet werden muss (KRIESI, 2017). Dies wird in Kapitel 2.6 gesondert dargestellt und analysiert.

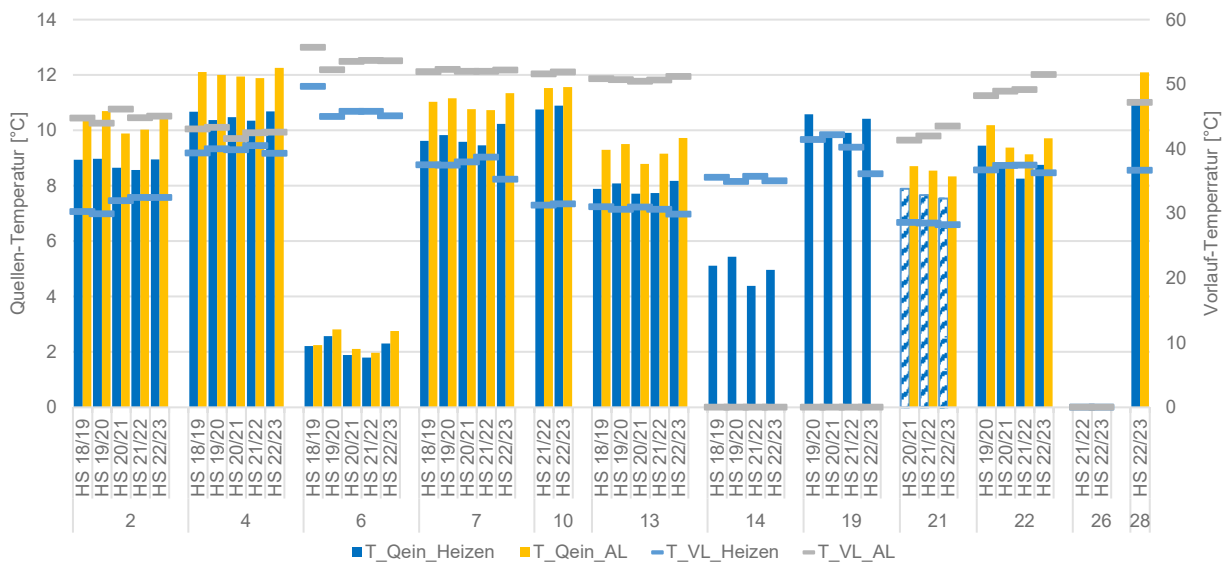


Abbildung 7: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Erdwärmesondenvorlauf) und des Senken-Vorlaufs während den unterschiedlichen Betriebsmodi «Heizen» und «Aufladung» für Sole/Wasser Wärmepumpen. Objekt F014 und F019 haben eine eigene TW-Wärmepumpe, weshalb die Werte der TW-Aufladung nicht dargestellt werden können. Bei Objekt F018 und Objekt F026 ist aus hydraulischen Gründen keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb möglich. Deshalb wurde hier bei «T_Quin_Heizen» die Quellentemperatur «T_Quin_WPein» dargestellt, und die Balken zur optischen Unterscheidung «gestreift» dargestellt.

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

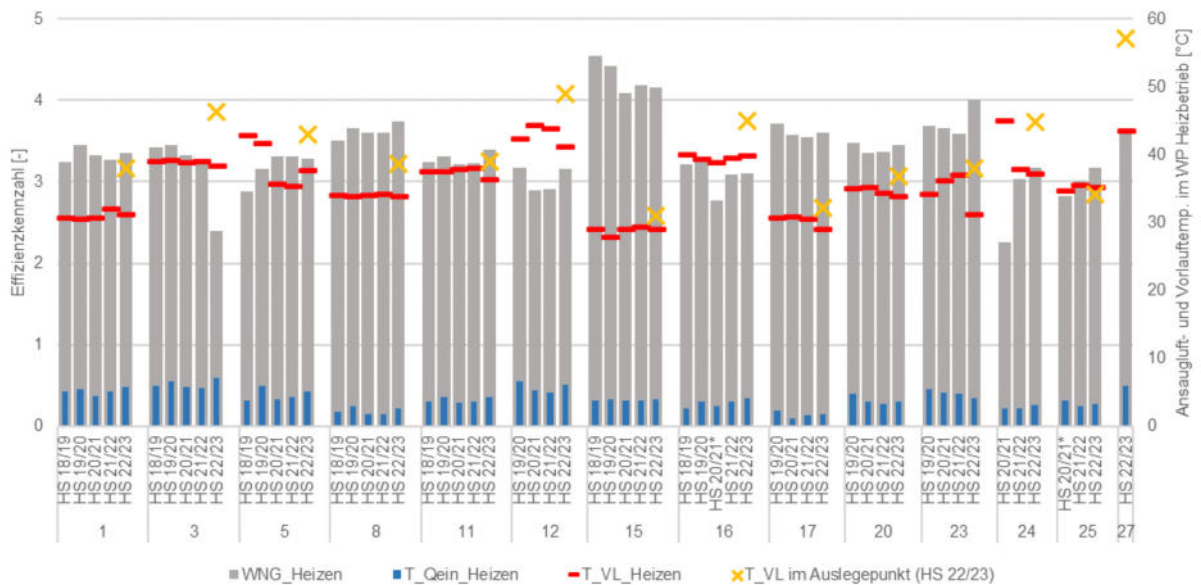


Abbildung 8: Wärmenutzungsgrad der Luft/Wasser-Wärmepumpen und die Temperaturen der Ansaugluft (blau) sowie des mittleren Senkenvorlaufs (rot) während des Heizbetriebs. Zusätzlich ist die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt (gelbes Kreuz) dargestellt.

Dargestellt sind die zeitgewichteten Jahresmittelwerte der Temperaturen im Heizbetrieb. Die Distanz zwischen der Quelleneintrittstemperatur «T_Qein_Heizen» (blauen Säule) und der Senkentemperatur im Heizbetrieb «T_VL_Heizen» (rote Balken) veranschaulicht den Temperaturhub, den die Wärmepumpe bewerkstelligen muss.

Allgemein gilt (für korrekt eingestellte Anlagen): Je geringer der Temperaturhub, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe. Entsprechend höher wird der «WNG_Heizen».

Bei L/W-Wärmepumpen lag die mittlere Quellentemperatur im Heizbetrieb mit 4.1 °C (Vorjahr: 4.0°C) um ca. 4 Kelvin tiefer als die Quellentemperaturen bei den S/W-Wärmepumpen. Die Senken-Vorlauftemperaturen liegen mit 36.0°C (LW-WP) und 36.3°C (SW-WP) deutlich näher zusammen.

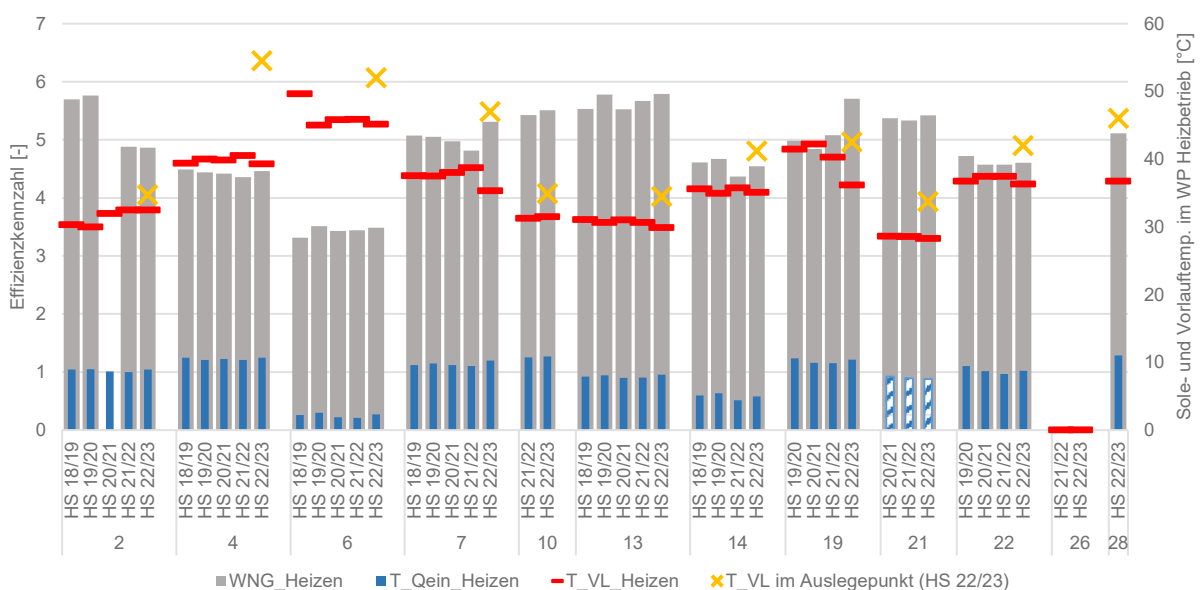


Abbildung 9: Wärmenutzungsgrad der Sole/Wasser Wärmepumpen und die Temperaturen der Erdwärmesonde (blau) sowie des Senkenvorlaufs (rot) während des Heizbetriebs. Zusätzlich ist die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt (gelbes Kreuz) dargestellt. Bei Objekt F018 und Objekt F026 ist aus hydraulischen Gründen keine Unterscheidung zwischen Heiz- und Aufladebetrieb möglich. Deshalb wurde hier bei «T_Qein_Heizen» die Quellentemperatur «T_Qein_WPein» dargestellt, und die Balken zur optischen Unterscheidung «gestreift» dargestellt.

Werden die Mittelwerte der WNG_Heizen für alle Sole/Wasser- bzw. alle Luft/Wasser -Wärmepumpen in gleicher Weise gebildet, wie vorhin die Mittelwerte der Temperaturen, so zeigt sich, dass der mittlere «WNG_Heizen» von Sole/Wasser-Anlagen mit 5.0 um 1.5 Punkte höher liegt als der Mittelwert aller Luft/Wasser-Anlagen. Diese weisen einen «WNG_Heizen» von 3.5 aus. Wird der Einfluss, der um ca. 4 K höheren Quelltemperatur bei Sole/Wasser-Anlagen mit einem Effizienzzuwachs von 2-3 % / K berücksichtigt, so stiege der WNG_Heizen der Luft/Wasser-Anlagen um ca. 10% von 3.5 auf ca. 3.9 an. Die Differenz ist dann immer noch 1.1 Punkte, welche z.B. auf fehlende Abtauungen bei SWWP, etc. zurückzuführen sind.

In den Abbildungen sind auch die Vorlauftemperaturen im Auslegepunkt der Objekte mit einem gelben Kreuz dargestellt. Anlagen mit einer Fussbodenheizung weisen tendenziell eine «flachere» Heizkennlinie auf, entsprechend liegen bei diesen Gebäuden die gemessenen Vorlauftemperaturen nahe bei der Vorlauf-temperatur im Auslegepunkt. Dies ist bei den Luft/Wasser-Anlagen der Objekte F001, F005, F015, F017, F020, F023 und F025 sowie bei den Sole/Wasser-Anlagen der Objekte F002, F010, F013, F021, F022 und F028 gut zu erkennen.

² Die Einstellwerte im Heizungsregler sind bei den Feldmessungen nicht bekannt. Die Heizkurve wird anhand der Messwerte ermittelt und daraus die Vorlauftemperatur im Auslegepunkt bestimmt bzw. extrapoliert.

2.3 Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung

In Abbildung 10 sind die drei Effizienzkennwerte ($JAZ_{\text{Aufladung}}$, $WNG_{\text{Aufladung}}$ und SNG_{TWW}) der gemessenen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen dargestellt. Bei den Trinkwarmwasser-Wärmepumpen (TWW-WP) könnte die thermische Aufladeenergie nicht ohne grösseren Umbau und Eingriff in den Kältekreis des Messobjekts ermittelt werden, weshalb die thermische Aufladeleistung «Pth_AL» bei den TWW-WP nicht gemessen wird. Entsprechend kann der Wärmenutzungsgrad sowie die Jahresarbeitszahl für die Aufladung bei den Anlagen F008, F014, F019 und F023 nicht ermittelt und dargestellt werden.

Die Jahresarbeitszahl $JAZ_{\text{Aufladung}}$ und der Wärmenutzungsgrad $WNG_{\text{Aufladung}}$ beziehen sich auf die Effizienz der Aufladung. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen liegen die gemittelten Jahresarbeitszahlen für die Trinkwassererwärmung $JAZ_{\text{Aufladung}}$ je nach Anlage zwischen 2.5 und 3.9. Den Bestwert erreichte Anlage F015. Demgegenüber inkludiert der Systemnutzungsgrad SNG_{TWW} auch die Trinkwarmwassernutzung der Bewohner. Im SNG_{TWW} sind somit die Wärmeverluste des Trinkwarmwasserspeichers, der heizungsseitigen Hydraulik sowie mögliche Zirkulationsverluste enthalten. Weshalb der SNG_{TWW} bei Anlage F001 und F017 mit der Zeit stetig abnimmt ist aus den Messdaten nicht klar ersichtlich. Eine mögliche Ursache könnte beispielsweise eine fortschreitende Verkalkung des Wärmeübertragers sein. Beim Vergleich der Kennwerte mit unterschiedlichen Systemgrenzen fällt auf, dass der über alle Luft/Wasser-Anlagen und Perioden gemittelte Wärmenutzungsgrad $WNG_{\text{Aufladung}}$ mit 2.5 um 14 % tiefer liegt als die Jahresarbeitszahl $JAZ_{\text{Aufladung}}$ mit 2.9. Die maximale Abweichung für ein einzelnes Objekt liegt bei 38 % und tritt bei Objekt F025 und Objekt F012 auf. Dieser Unterschied entsteht, da in der $JAZ_{\text{Aufladung}}$ die energetischen Anteile des externen Heizstabes und der Senken-Umwälzpumpe nicht berücksichtigt werden. Objekt F025 verwendet aktuell den Heizstab des TWW-Speichers für eine vermeintliche PV-Eigenverbrauchs-Optimierung. Hierzu ist aber festzuhalten, dass eine Erhöhung des Eigenverbrauchs nur dann sinnvoll ist, wenn damit auch der Netzbezug reduziert wird. Optimaler wäre es dementsprechend, wenn auch in diesem Falle die deutlich effizientere Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung verwendet würde, anstatt des Elektroheizstabes.

Zur optimalen Eigenstromnutzung gibt es von energieschweiz ein Faktenblatt vom November 2022 (EnergieSchweiz, 2022) mit folgender Aussage:

«Zielgrössen der Eigenverbrauchs-Optimierung sollten die Reduktion des Netzstrombezugs sowie die Minimierung der jährlichen Netto-Stromkosten sein. Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad zu maximieren führt zu ineffizienten Systemen und zu energetischen und finanziellen Verlusten.»

Bei Objekt F012 ist ein tägliches Legionellen-Programm über den TWW-Heizstab aktiviert, weshalb der Wärmenutzungsgrad reduziert ist. Die Legionellenschaltung erfolgt zeitgesteuert von 2 bis 4 Uhr inklusive einer WP-Vorerwärmung von 0 bis 1 Uhr.

Der SNG_{TWW} , in welchen das Nutzerverhalten mit eingeht, variiert bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen zwischen 0.9 (Anlage F012) und 3.2 (Anlage F027).

Objekt F024 wies in der Heizsaison 2020/21 mit einem SNG_{TWW} von 0.64 das bisherige Minimum auf. Der SNG_{TWW} konnte aber durch mehrere Optimierungsmassnahmen im Folgejahr (siehe Jahresbericht 2022) deutlich auf 1.21 verbessert werden. Der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung wird durch eine unkontrollierte Schwerkraftzirkulation und damit eingehende Wärmeverluste zusätzlich gesteigert. Durch eine Unterbrechung der Schwerkraftzirkulation in der Nacht (Tagsüber soll die Schwerkraftzirkulation aus Komfortgründen nicht unterbunden werden), könnte der SNG_{TWW} gemäss kurzen Versuchsphasen auf ca. 1.4 verbessert werden (Siehe Kapitel 2.7.2).

Den höchsten SNG_{TWW} aller Luft/Wasser-Anlagen weist Objekt F027 mit einem Wert von 3.2 auf.

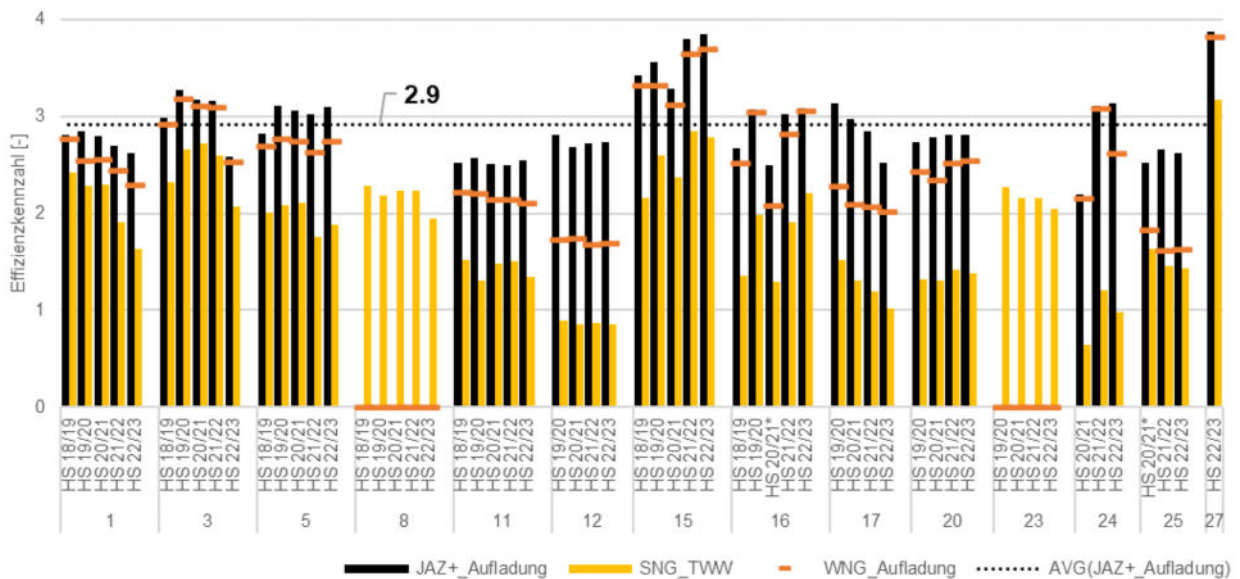


Abbildung 10: Jahresarbeitszahl JAZ+ Aufladung, Wärmenutzungsgrad WNG Aufladung und Systemnutzungsgrad SNG_TWW der Trinkwassererwärmung für Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen.

Ein Vergleich der Effizienzen für die Trinkwassererwärmung bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen ist in Abbildung 11 dargestellt. Auch hier ist der Wärmenutzungsgrad sowie die Jahresarbeitszahl der Anlagen F014, F019 und F023 nicht dargestellt, da diese eine eigene Trinkwarmwasser-Wärmepumpen haben.

Die Jahresarbeitszahlen JAZ+ Aufladung liegen zwischen 1.6 und 4.8. Der Mittelwert liegt mit 3.4 um 1.8 Punkte unter dem Mittelwert des Heizbetriebes (JAZ+ Heizen = 5.2). Die Sole-Wasser Wärmepumpen weisen aber mit einem mittleren JAZ+ Aufladung von 3.4 einen im Vergleich zu den Luft-Wasser Wärmepumpen um 0.5 Punkte höhere Effizienz aus.

Die Wärmenutzungsgrade WNG Aufladung variieren zwischen 1.4 und 4.7 und sind mit einem Schnitt von 2.9 um 12 % tiefer als die JAZ+ Aufladung. Der Unterschied dieser beiden Kenngrößen liegt bei Sole/Wasser-Wärmepumpen im selben Bereich wie bei Luft/Wasser-Wärmepumpen. Die Effizienzkennzahlen von Anlage F006 sind nur bedingt aussagekräftig, da dieses Objekt eine zusätzlichen Solaranlage aufweist, dessen Wärmeintrag nicht gemessen wird.

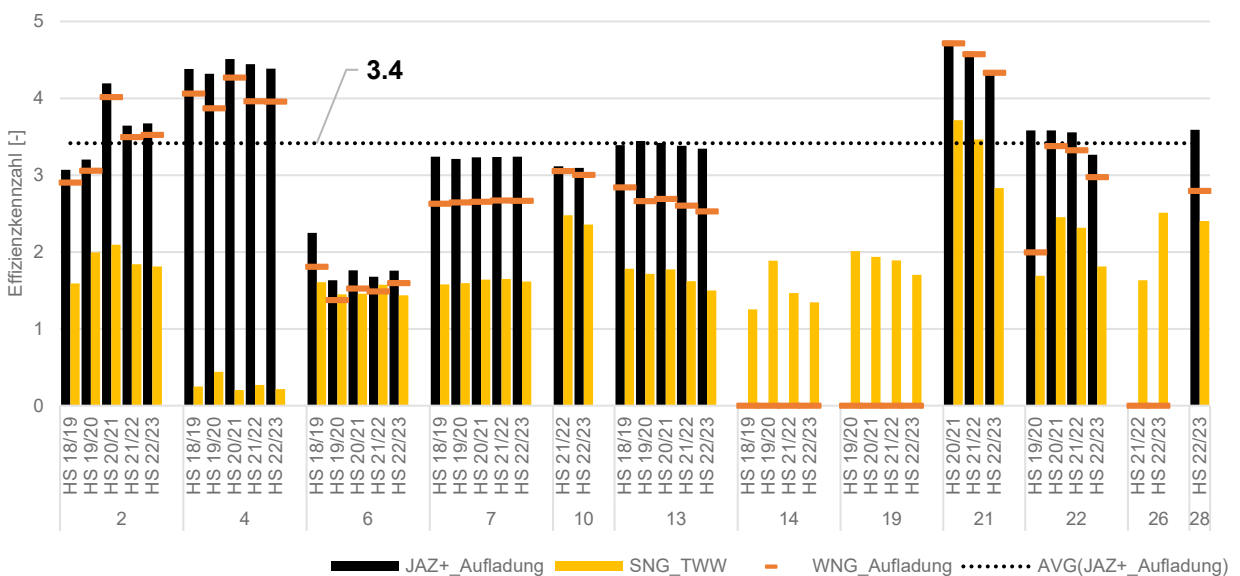


Abbildung 11: Jahresarbeitszahl JAZ+ Aufladung, Wärmenutzungsgrad WNG Aufladung und Systemnutzungsgrad SNG_TWW der Trinkwassererwärmung für Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen. Grosse Unterschiede zwischen JAZ+ und WNG weisen oft auf eine energieintensive Legionellenschaltung hin.

Bei Objekt F022 wurde nach der Heizsaison 2019/20 die Legionellenschaltung von «täglich» auf «wöchentlich» umgestellt. Dies erhöhte die WNG_Aufladung von 2.0 auf 3.0 bis 3.4. Der elektrische Energiebedarf für die TWW-Bereitstellung (TWWB_el) reduzierte sich von 13.7 kWh/m² (HS 2019/20) auf unter 7 kWh/m² in den Folgejahren (!). Dies ist auf die erhöhte Effizienz bei der Warmwasseraufbereitung zurückzuführen (WNG_Aufladung), als auch auf die kontinuierliche Reduktion des Trinkwarmwasserbedarfs. Dieser thermische Trinkwarmwasserbedarf (TWWB) reduzierte sich kontinuierlich von 27.3 kWh/m² (HS 2019/20) auf nun 18.5 kWh/m² (HS 2022/23). Diese Einsparungen wirken sich sehr positiv auf den elektrischen Energiebezug aus, welcher die relevante Grösse für Optimierungen darstellt. Aufgrund des nun geringeren TWW-Bedarfs nimmt der Systemnutzungsgrad SNG_TWW nach der ersten Steigerung von 1.7 (HS 19/20) auf 2.5 (HS 20/21) nun kontinuierlich auf 1.8 ab. Energetisch optimal ist aber ein möglichst geringer elektrischer Energiebedarf (und nicht ein möglichst hoher SNG_TWW).

Bemerkenswert ist der Unterschied zwischen Objekt F004 und F021. Beide Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden führen die Aufladung sehr effizient mit hohem Wärmenutzungsgrad durch, der Systemnutzungsgrad fällt bei Objekt F004 aber sehr tief aus (SNG_{TWW} von 0.2). Dieser tiefe SNG_{TWW} beruht auf einem sehr geringen Warmwasserbedarf der je nach Heizsaison einen Tagesmittelwert zwischen 10 l/d (HS 2020/21) und 28 l/d (HS 2017/18) aufweisen kann. Der jeweilige Tagesbedarf an Warmwasser (2017-2023) liegt in 75% der Fälle zwischen 0 und 20 l/d. Zusätzlich weist dieses Objekt noch eine Schwerkraftzirkulation der Trinkwasserhydraulik auf, welche sich in Bezug auf den Energiebedarf, die Energieeffizienz und Hygiene negativ auswirkt.

Generell möchten wir aber noch einmal darauf hinweisen, dass ein geringer Warmwasserverbrauch die grösste Energieeinsparung bewirkt, auch bei einer geringeren Effizienz. Eine geringe Warmwassernutzung führt systembedingt zu einem geringeren Systemnutzungsgrad (SNG = "genutzte Warmwasserenergie" / "gesamte Aufladeenergie"), da die Nutzenergie klein ist. Ziel sollte es somit sein, den Endenergiebedarf zu minimieren (geringer Warmwasserkonsum, hohe Effizienz bei der Bereitstellung), und nicht den Systemnutzungsgrad (SNG_TWW) zu erhöhen, was sie auch mit einer Erhöhung ihres Warmwasserverbrauchs erreichen.

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

- Warmwasser-Zirkulationssysteme: Diese können die thermischen Verluste erheblich erhöhen.
- Dämmung: Die Wärmedämmung des Speichers und die dadurch anfallenden Transmissionsverluste.
- Legionellenschaltung: Viele Anlagen führen derzeit Legionellenschaltung zeitgesteuert mithilfe des elektrischen Heizstabes durch, ohne Einbindung der Wärmepumpe. Damit wird auf eine mögliche, deutlich effizientere Vorerwärmung mithilfe der Wärmepumpe verzichtet. Die überarbeitete SIA 385/1:2020 fordert eine grösstmögliche Vorwärmung mithilfe der Wärmepumpe.
- Trinkwarmwassernutzung: Die genutzte TWW-Menge hat einen grossen Einfluss auf den SNG_{TWW}, da diese hier die Ausgangsgrösse ist. Eine Reduktion des TWW-Bedarfs führt daher zu einer Reduktion des Systemnutzungsgrades SNG_TWW, aber auch zu einer Reduktion des absoluten Energiebedarfes, welcher die Zielgrösse ist.

³ Legionellenprogramm: Der TWW-Speicher wird mithilfe des Heizstabes nun jeden Samstag auf über 55 °C erwärmt.

⁴ Berechnung $SNG_{TWW} = Q_{TWW} / E_{Aufladung}$, ist somit die «gezapfte, thermische TWW-Energie» bezogen auf die «gesamte elektr. Energie, welche für die Aufladung» benötigt wurde.

2.4 Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage

Mithilfe einer Gebäude-, einer Verbrauchs- und einer Standortkenngrösse können die Einsatzbedingungen von Wärmepumpensysteme während jeder Heizsaison besser beschrieben werden:

<i>HWB</i>	= Q_{Heizen} / EBF	spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m ²]
<i>TWWB</i>	= $Q_{\text{Aufladung}} / EBF$	spezifischer Trinkwarmwasserbedarf [kWh/m ²]
<i>GWB</i>	= $(Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / EBF$	Gesamtwärmebedarf [kWh/m ²]
<i>HGT_20_16</i>		Heizgradtage [°C] mit Heizgrenze 16 °C und Raumtemperatur von 20 °C (Sanierung)
<i>HGT_20_12</i>		Heizgradtage [°C] mit Heizgrenze 12 °C und Raumtemperatur von 20 °C (Neubau)

Der Grenzwert des Gesamtwärmebedarfs *GWB* für Minergie liegt bei 55 kWh/m²a und bei Minergie A bei 35 kWh/m²a. Der Gesamtwärmebedarf entspricht der Summe aus Heizwärmebedarf für die Raumwärme (*HWB*) und dem Aufladebedarf für die Trinkwarmwasserbereitstellung (*TWWB*). Die Heizgradtage werden bei Sanierungen auf Aussentemperaturen unterhalb von 16 °C bezogen (*HGT_20_16*), bei Neubauten auf Aussentemperaturen unterhalb von 12 °C (*HGT_20_12*), wie in Kapitel 1.2 beschrieben.

Der Heizwärmebedarf *HWB* der einzelnen Objekte variiert während der letzten Heizperiode zwischen 30 und 136 kWh/m². Dieser Wert ist stark von den thermischen Eigenschaften der Bausubstanz sowie vom Nutzerverhalten abhängig.

Der spezifische Trinkwarmwasserbedarf *TWWB* weist eine Bandbreite von 3 bis 10 kWh/m² auf. Der *TWWB* wird vom Nutzerverhalten («Warmwasserverbrauch») und den thermischen Eigenschaften des Aufladesystems (thermische Speicherverluste, ggf. Zirkulationsverluste, etc.) beeinflusst.

Abbildung 12 beschreibt den thermischen Energiebedarf der Gebäude, aufgeteilt nach Raumwärme (*HWB*) und *TWW*-Bedarf (*TWWB*). Die klimatischen Einflüsse spiegeln die Heizgradtage wider. Beim Raumwärmebedarf ist der Unterschied zwischen Neubau und Altbau signifikant. Die Neubauten mit Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen (Objekte F001, F005 und F025) weisen mit 30 bis 40 kWh/m² einen geringen spezifischen Heizwärmebedarf auf. Sanierungsobjekte weisen eine grössere Divergenz auf: Es gibt sowohl Objekte mit tiefem *HWB* (z.B. F015 mit 30.1 kWh/m²) wie auch mit hohem Energiebedarf. F012 und F027 weisen den höchsten spezifischen Heizwärmebedarf von ca. 110 kWh/m² auf. Das Gebäude von F027 ist mit Baujahr 1897 bereits über 125 Jahre alt, entsprechend ist ein hoher Wärmebedarf nicht aussergewöhnlich. Bei Objekt F012 ist die Dachfläche in Relation zu den Aussenwänden relativ gross und nicht durchgehend isoliert.

Abbildung 12 zeigt auch eindrücklich, wie unterschiedlich der Anteil des Heizwärmebedarfes (*HWB*) am Gesamtwärmebedarf (*GWB*) für Heizen und Trinkwarmwasser-Bedarf (*HWB*+*TWB*) ist. In der Heizsaison 2021/22 liegt der *HWB*-Anteil bei Anlage F012 bei ca. 90%, beim Neubauobjekt F025 reduziert sich der *HWB*-Anteil auf 70%. Dies zeigt aber auch, dass auch bei einem Neubau der Heizwärmebedarf etwas mehr als zwei Drittel des Gesamtwärmebedarfs ausmacht. Auffallend ist auch der tiefe Heizwärmebedarf von Objekt F024, handelt es sich hierbei doch um ein umfangreich saniertes Gebäude aus dem Jahr 1975.

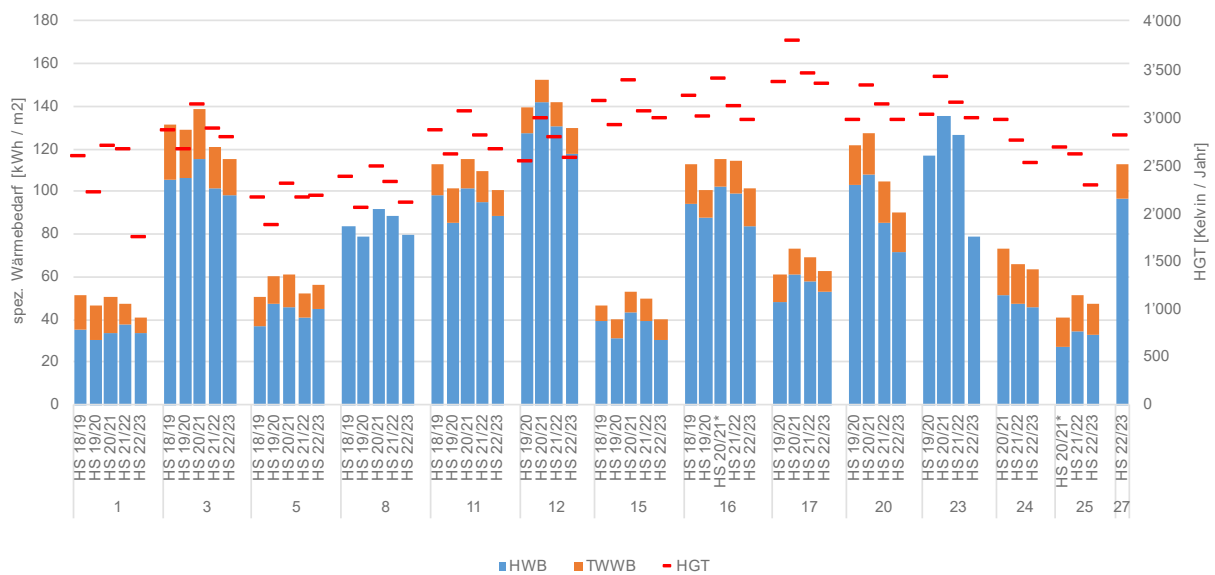


Abbildung 12: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfes (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

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

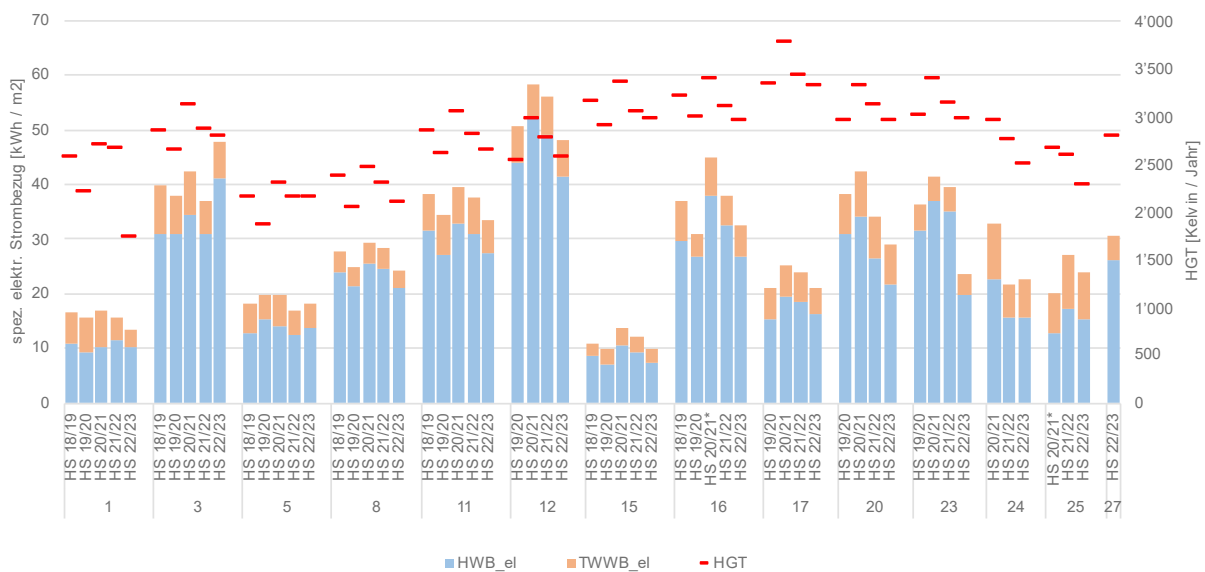


Abbildung 13: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m², sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Auffallend ist zum Beispiel der Vergleich von Objekt F005 und F025: Der spezifische Gesamt-Wärmebedarf (HWB + TWWB) fällt bei beiden Anlagen ähnlich aus (56 vs. 48 kWh/m²), der elektrische Energiebedarf liegt jedoch aufgrund der Effizienzunterschiede bei Objekt F025 mit 24 kWh_{el}/m² um 30 % über dem elektrischen Bedarf von Objekt F005, welches 18 kWh_{el}/m² benötigt.

Ab Abbildung 14 werden die Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen untersucht. Hier liegen die Heizwärmebedarfswerte zwischen 33 und 95 kWh/m² während der letzten, vollständig gemessenen Heizperiode. Der Trinkwarmwasserbedarf liegt im Bereich von 6 bis 19 kWh/m². Bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen wird mit Objekt F002 nur ein Neubau gemessen, alle anderen Objekte sind Bestandsgebäude. Auch hier zeigt sich, dass der Bedarf an Raumwärme im Neubau mit 33 kWh/m² wesentlich unter dem Durchschnitt der Bestandsgebäude liegt, welche hier im Schnitt 58 kWh/m² benötigen.

Es gibt aber auch hier Objekte mit kleinem Heizwärmebedarf, zum Beispiel das Objekt F010, welches in der Saison 2022/23 mit einem Raumwärmebedarf von 39 kWh/m² mit dem Neubau gleich auf liegt. Auffallend ist auch, dass bei Anlage F004, F007, F013, F019 und F022 der Heizwärmebedarf wesentlich geringer war. Möglich sind bauliche Anpassungen, veränderte Einstellparameter oder Nutzerverhalten. Eine endgültige Erklärung dafür liegt aktuell noch nicht vor.

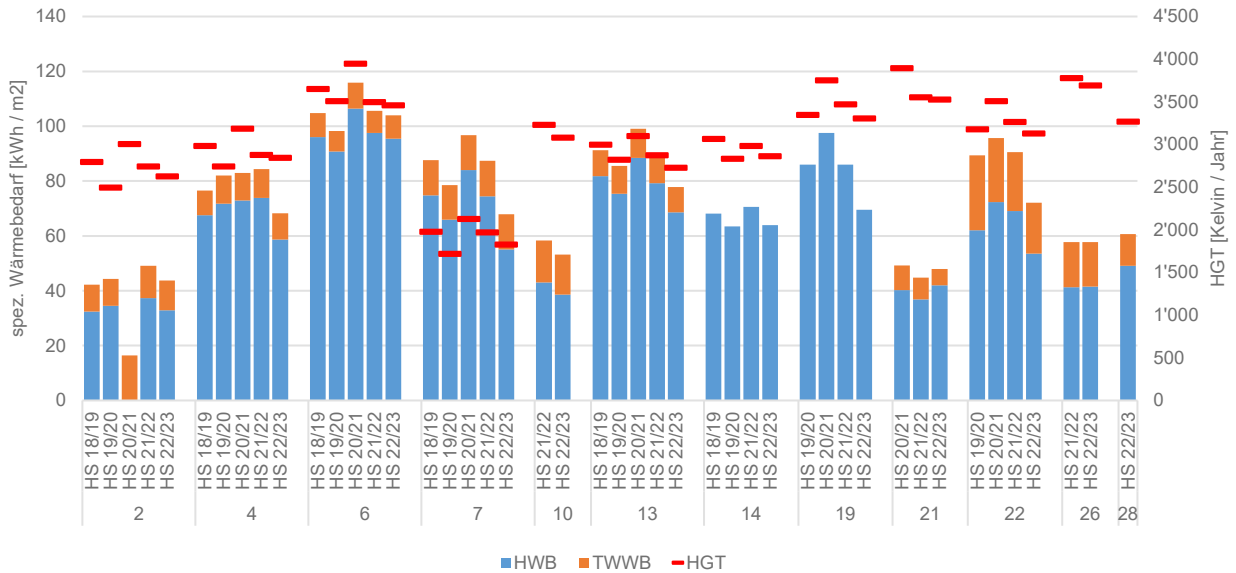


Abbildung 14: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfes (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

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

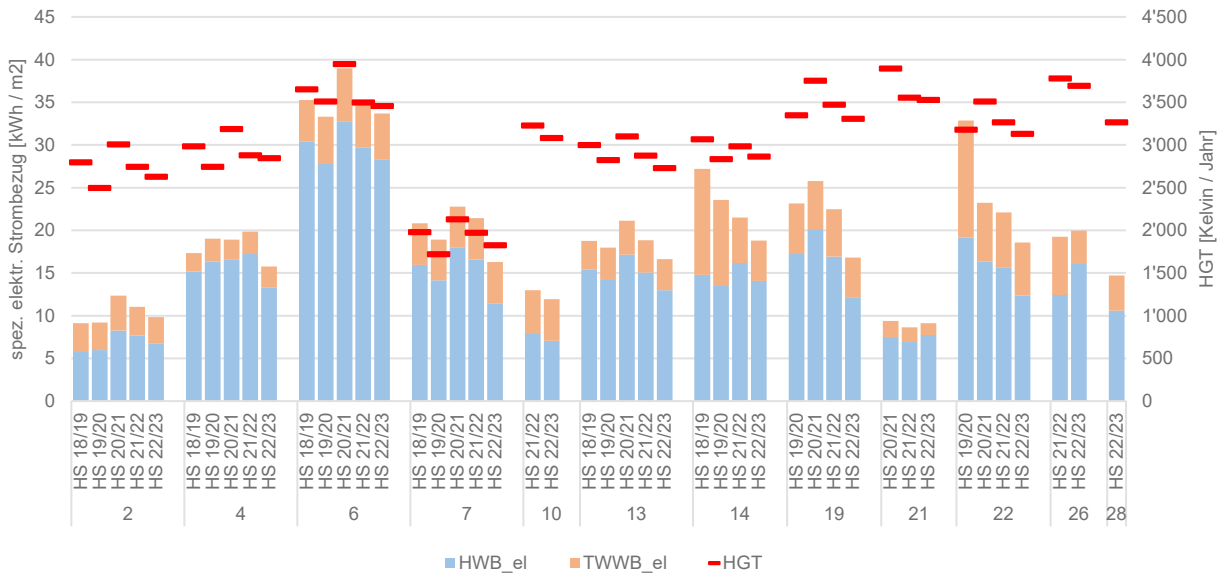


Abbildung 15: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m², sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Bei den Objekten F014 und F019 erfolgt die TWW-Aufbereitung mittels Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler) daher fehlen die Daten in den Diagrammen der Abbildung 15. Auffallend ist, dass der elektrische Energiebedarf der Trinkwassererwärmung (TWWB_el) der Anlagen F014 und F022, seit der Heizsaison 2020/21, stark abgenommen hat und nun im Bereich der anderen Anlagen liegt. Bei der Anlage F022 wurde vor Beginn der Heizsaison 2020/21 das Legionellenprogramm geändert, was zu einer erheblichen Reduktion der aufgenommenen elektrischen Energie führte.

Bei Objekt F014 wurden die Einstellungen, der im März 2019 ausgetauschten Trinkwarmwasser-Wärmepumpe Anfang der Saison 2021/22 optimiert. Nun kommt der Elektro-Heizstab kaum mehr zum Einsatz.

2.5 Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb

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

Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen, verändern sich die Quellentemperaturen über das Jahr stark, da die Quelle die Aussenluft ist. Dementsprechend weisen diese beiden Kennwerte bei den LWWP einen deutlich höheren Unterschied auf, da Aufladungen im Sommer bei hohen Aussentemperaturen stattfinden. Im Gegensatz dazu erfolgt der Heizbetrieb meist bei niedrigen Aussentemperaturen und somit vorwiegend im kälteren Winter. In der Heizsaison 2022/23 liegt die mittlere Quellentemperatur $T_{\text{Qein_WPein}}$ somit 0.77 Kelvin über der reinen Quellentemperatur im Heizbetrieb $T_{\text{Qein_Heizen}}$. Bei SWWP ist dieser Unterschied gering (0.12 Kelvin), da die Soletemperaturen in den wenigen Sommerbetriebsstunden auch nur wenige Kelvin über den Soletemperaturen des Winters liegen, in welchen die Wärmepumpe deutlich mehr Betriebsstunden aufweist.

Die mittleren Aussentemperaturen über alle Gebäude lag in der Heizsaison 2021/22 bei 12.5°C.

Die meisten Sole/Wasser-Wärmepumpen zeigen gegenüber Luft/Wasser-Wärmepumpen höhere Quellentemperaturen auf, wie Abbildung 16 zeigt. Die mittlere Quellentemperatur im Heizbetrieb aller Sole-Wasser-Anlagen beträgt 8.54°C. Wenn der Aufladebetrieb mitberücksichtigt wird, steigt die mittlere Quellentemperatur auf 8.66°C. Die mittlere Quellentemperatur aller Luft/Wasser-Wärmepumpen beträgt 5.14°C im Ganzjahresbetrieb ($T_{\text{Qein_WPein}}$), bzw. 4.37°C nur im Heizbetrieb ($T_{\text{Qein_Heizen}}$). Damit liegen die Quellentemperaturen der SWWP im Schnitt um 3.6 Kelvin bzw. 4.1 Kelvin im Heizbetrieb über den LWWP. Im Vergleich zum letzten Jahr, sind die LWWP-Quellentemperaturen 0.6°C höher als in der letzten Heizperiode.

Die jeweils tiefsten auftretenden mittleren Quellentemperaturen liegen hier bei den LWWP mit Objekt F008 und SWWP mit Objekt F006 aber fast gleichauf. Wichtig: Bei den SWWP-Anlagen F006 und F014 wurde eine alte WP durch eine neue, effizientere Wärmepumpe getauscht. Die bestehenden Erdwärmesonden wurden weiterverwendet, was zu tieferen Quellentemperaturen führt. Die Luft/Wasser-Anlage F017 liegt auf einer Höhe von 737 m.ü.M und weist die tiefste Heiz-Quellentemperatur $T_{\text{Qein_Heizen}}$ auf. Die Objekte F008, F014, F019 und F023 haben eine eigene Trinkwarmwasser-Wärmepumpe (TWWP) weshalb $T_{\text{Qein_Heizen}}$ und $T_{\text{Qein_WPein}}$ identisch sind.

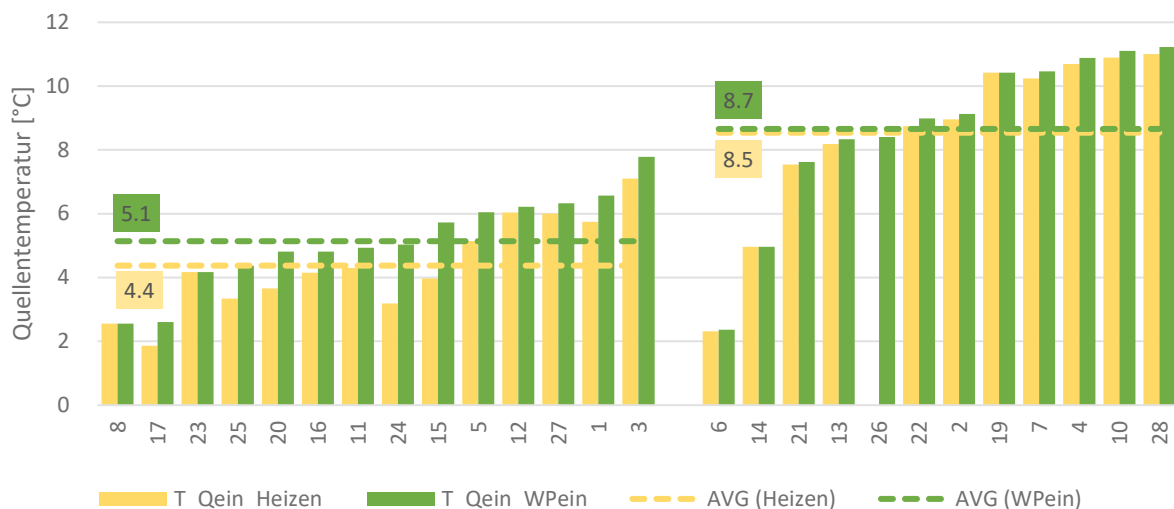


Abbildung 16: Quellentemperaturen im Heizbetrieb und gesamt für die Heizsaison 2021/22, getrennt nach Luft/Wasser- (LW) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (SW), aufsteigend sortiert

2.6 Temperaturverlauf der Erdwärmesonden (EWS)

Für den Betrieb der Wärmepumpe ist die Quelltemperatur massgebend. Für die Beurteilung der Effizienz ist dabei die mittlere Quelltemperatur (bspw. Jahresmittelwert) ein gutes Instrument. Diese werden in Kapitel 2.5 behandelt. Zur Beurteilung des Zustands der Erdwärmesonde muss die minimale im Jahresverlauf auftretende Sole-Mitteltemperatur verwendet werden. Die Massgebende SIA-Norm 384/6 fordert eine minimale Solemitteltemperatur von nicht tiefer als -1.5°C nach 50 Jahren. Diese Temperatur wird wie folgt berechnet:

$$\text{Min } T_{Qm} = T_{\text{Quelle,mittel,min}} = \text{minimaler Stundenmittelwert von } \frac{T_{\text{Quelle,ein}} + T_{\text{Quelle,aus}}}{2}$$

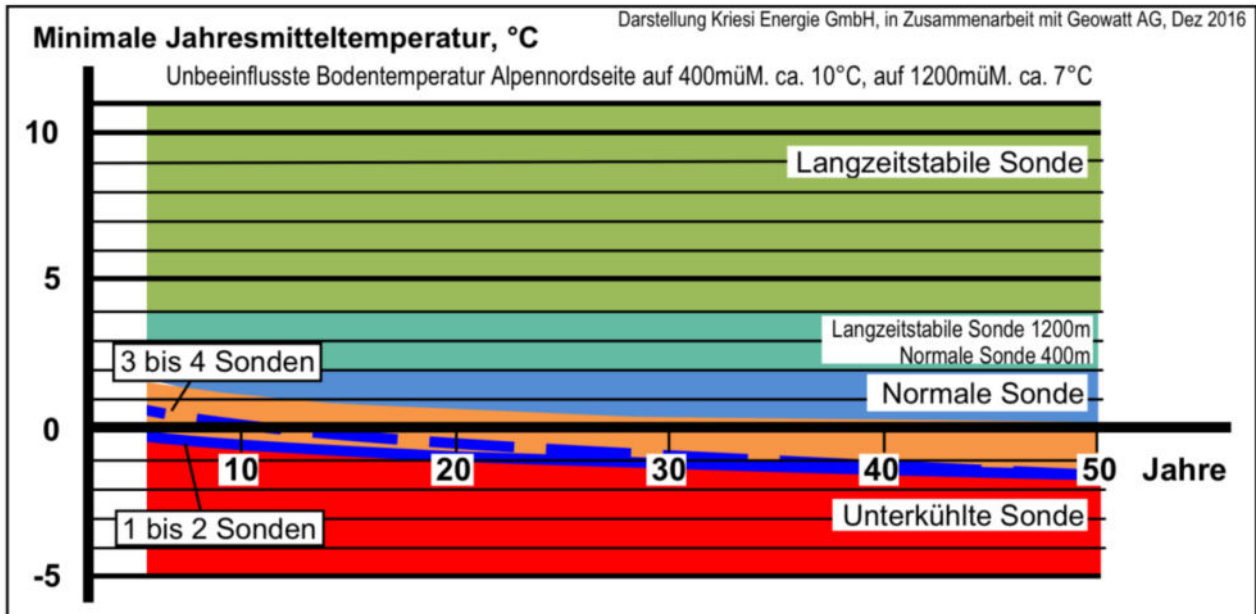


Abbildung 17: Beurteilungsdiagramm für gemessenen Quelltemperaturen von Erdwärmesonden (Kriesi, 2017). Je nach Anlagengrössen, -standort und -alter kann anhand der Temperatur der Anlagenzustand definiert werden. Bei unterkühlten Anlagen wird davon ausgegangen, dass diese, ohne Massnahmen, die Vorgaben der SIA Norm nicht einhalten.

Für alle Anlagen wurde der Temperaturverlauf und $\text{Min } T_{Qm}$ über alle Betriebsjahre ermittelt und in Abbildung 18 dargestellt (je Diagramm unten rechts). Dabei wurde zwischen 30-Minuten-Mittelwerten (schwarz) und Tagesmittelwerten (gelb) unterschieden. In den 30-Minuten-Mittelwerten sind die Extremwerte erkennbar, aus den Tagesmittelwerten kann der Jahresverlauf leichter abgeschätzt werden. Um den Erdwärmesondenzustand in Abhängigkeit der Feldgrösse, Standort und Betriebsalter zu beurteilen kann das Diagramm aus Abbildung 17 (Kriesi, 2017) verwendet werden. Es gibt drei Kategorien: grün = Langzeitstabil, blau = Normal, und rot = unterkühlt. Der Grenzbereich zur Unterkühlung wird in Abbildung 18 als rote gestrichelte Linie dargestellt. Wird diese Linie unterschritten, kann die Erdwärmesonde als unterkühlt eingestuft werden. Bleibt die Temperatur jedoch über $+4^{\circ}\text{C}$ dann gilt diese als Langzeitstabil (grüne Linie in Abbildung 18).

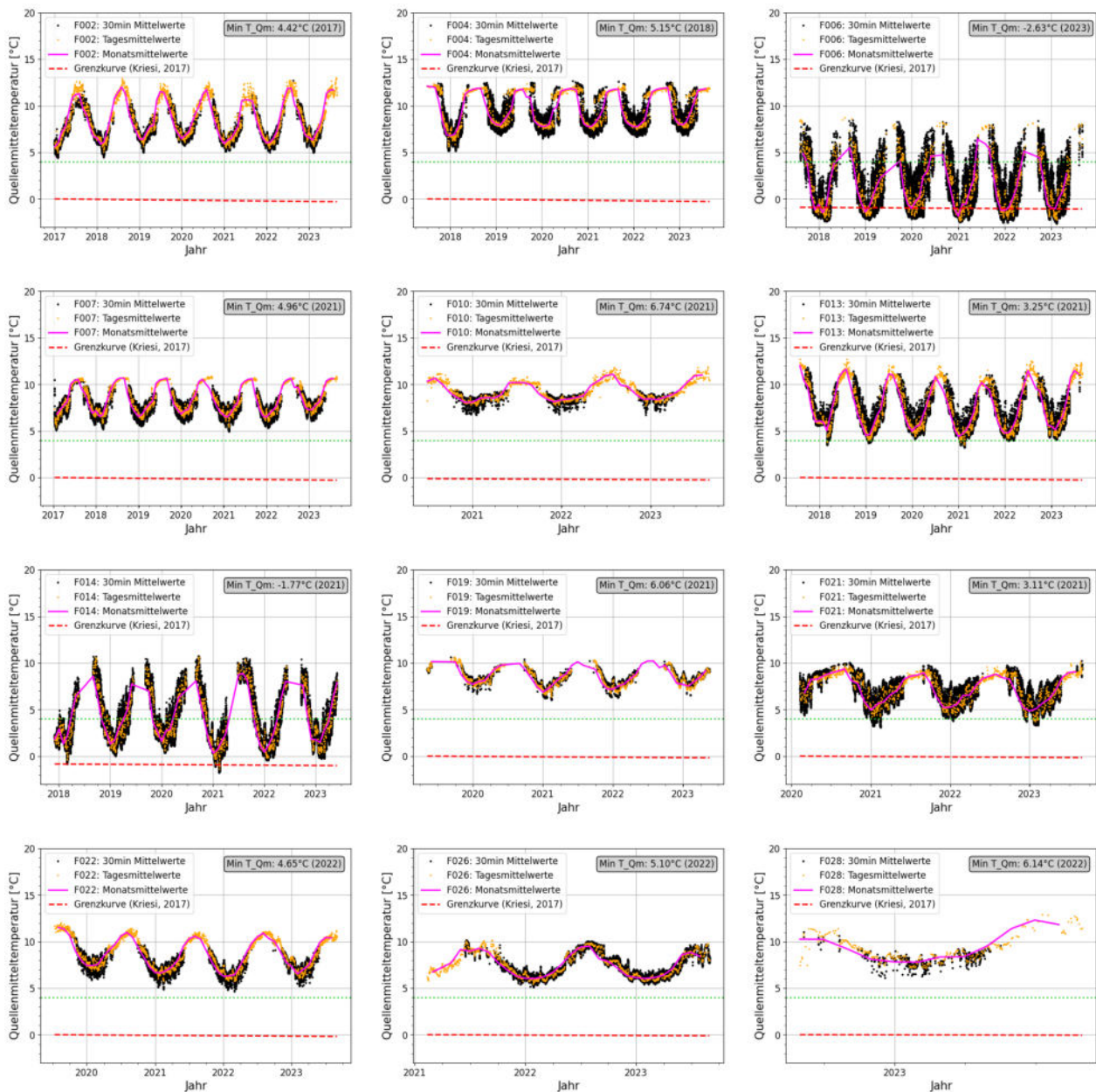


Abbildung 18: Die Quellenmitteltemperatur $[(T_{VL} + T_{RL}) / 2]$ im zeitlichen Verlauf für alle Anlagen. In schwarz sind die 30-Minuten-Mittelwerte und in gelb die Tagesmittelwerte dargestellt. Die Mittelwerte enthalten nur Daten, bei denen die WP mind. 30min in Betrieb war. Die tiefste erreichte Mitteltemperatur (hier 30 Minuten-Mittelwert) wird zur Einstufung nach Krieglösungsgrenze (Altersabhängige Grenzkurve in rot dargestellt). Wird die rote Linie unterschritten, gilt die Anlage als unterkühlt. Anlagen mit minimalen Temperaturen über 4°C nach mind. 5 Betriebsjahren gelten als Langzeitstabil (grüne Linie). Die Anlagen F002, F004, F007 und F010 können als Langzeitstabil betrachtet werden, die Anlagen F019, F021, F022, F026 und F028 weisen zu wenige Betriebsjahre auf, um den Zustand qualitativ kategorisieren zu können.

Die meisten Anlagen sind in einem guten Zustand, acht Anlagen befinden sich sogar in einem Langzeitstabilen Zustand, wobei vier von diesen acht Anlagen noch nicht die minimale Betriebszeit von fünf Jahren aufweisen. Die EWS der Anlagen F013 und F021 sind im normalen Bereich. Anlage F014 ist knapp an der Grenze und Anlage F006 ist bereits stark unterkühlt. Diese beiden Anlagen stammen aus den 1990er Jahren und befinden sich in der zweiten Lebensphase, der erste WP-Ersatz ist bereits erfolgt. Anlage F014 ist aktuell nicht kritisch, sollte jedoch weiter beobachtet werden, um ein mögliches Einfrieren in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten frühzeitig zu erkennen und zu verhindern.

Kritisch ist hingegen der Zustand der EWS von Anlage F006, weshalb in Abbildung 19 der Temperaturverlauf grösser dargestellt wurde. Es ist klar ersichtlich, dass die Grenzkurve (rot) häufig unterschritten wird.

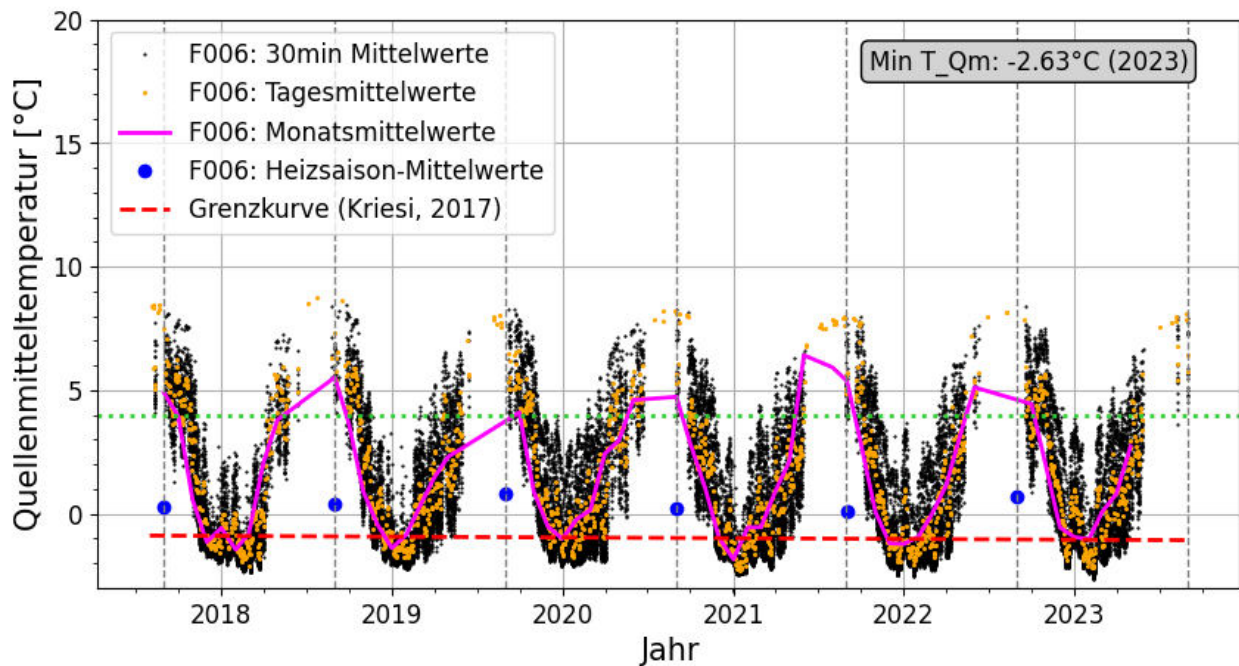


Abbildung 19: Die Quellenmitteltemperatur $[(T_{VL} + T_{RL}) / 2]$ im zeitlichen Verlauf für die Anlage F006. In schwarz sind die 30min-Mittelwerte, in gelb die Tages-, in magenta die Monats- und in blau die Heizsaison-Mittelwerte dargestellt (graue senkrechte Linien zeigen die Grenzen der Heizsaisons [01.09 – 31.08]). Die tiefste erreichte Solemitteltemperatur, hier -2.61°C wird zur Einstufung nach Kriesi verwendet (Altersabhängige Grenzkurve in rot dargestellt). Diese Anlage ist unterkühlt. Eine Regeneration der Erdwärmesonde wird empfohlen.

Bei Anlage F006 ist die Temperatur im unterkühlten Bereich ($\text{Min } T_{Qm} = -2.61^{\circ}\text{C}$). Hier kann unter Umständen ein teilweises Einfrieren am Bohrlochrand um die Sonde herum nicht gänzlich ausgeschlossen werden und auch mögliche zukünftige Nachbaranlagen könnten den Zustand der 1994 in Betrieb genommenen Erdwärmesonde weiter verschlechtern. Im ungünstigsten Fall entsteht in einigen Jahren oder Jahrzehnten Permafrost um die Erdwärmesonde, dann kann diese nicht mehr genutzt werden und benötigt mehrere Jahre, um wieder aufzutauen. Um ein Einfrieren frühzeitig zu verhindern, wird bei dieser Anlage eine Regeneration der Erdwärmesonde empfohlen. Es gibt unterschiedliche Regenerationssysteme wie Solar, Geocooling (Wärme im Sommer aus dem Haus in die EWS einbringen) und Luftwärmetauscher. Die Anlage F010 weist mit 6.74°C die höchste minimale Solemitteltemperatur auf.

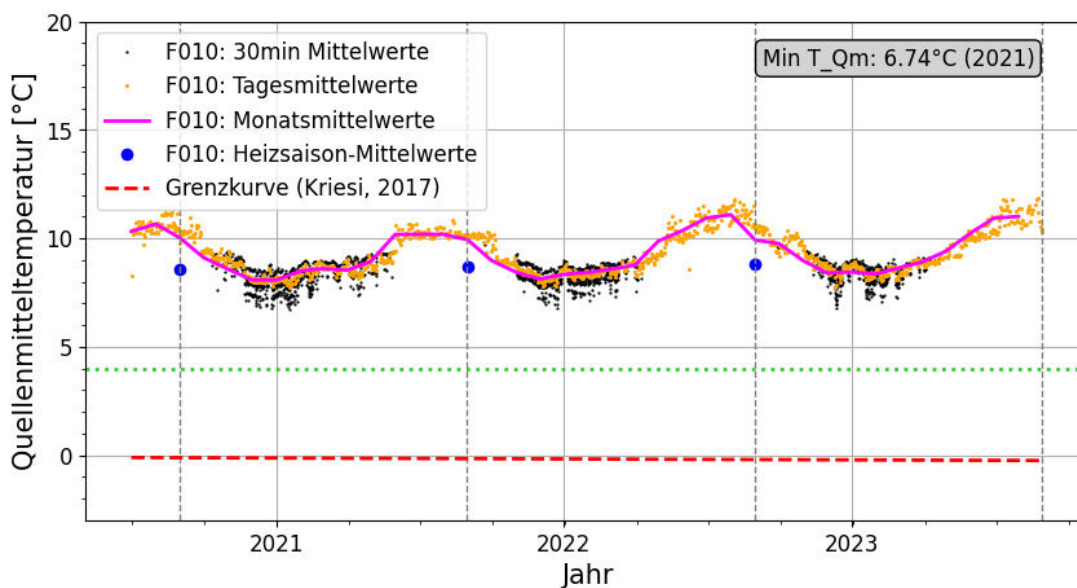


Abbildung 20: Die Quellenmitteltemperatur $[(T_{VL} + T_{RL}) / 2]$ im zeitlichen Verlauf für die Anlage F006. In schwarz sind die 30min-Mittelwerte, in gelb die Tages-, in magenta die Monats- und in blau die Heizsaison-Mittelwerte dargestellt (graue senkrechte Linien zeigen die Grenzen der Heizsaisons [01.09 – 31.08]). Im Gegensatz zu Anlage F006 ist der Zustand der Anlage F010 sehr gut. Die Erdwärmesonde kann mit einer T_{Qm} von 5.98°C als Langzeitstabil eingestuft werden. Die Temperaturen im Sommer sind aufgrund von Geocooling höher. Im Diagramm werden nur die Werte bei aktivem Wärmepumpenbetrieb mit einer Mindestlaufzeit von 30 Minuten dargestellt.

2.6.1 Quellenmitteltemperatur im Vergleich zur Heizleistung

Um eine mögliche Belastungsabhängigkeit der Erdwärmesonde zu erkennen, wird die Quellenmitteltemperatur zusammen mit dem Heizleistungsbedarf und der gelieferten WP-Leistung dargestellt. Wichtig dabei ist, dass sich die Grössen «Heizleistung geliefert» und «Quellenmitteltemperatur» jeweils nur auf die täglichen Heizbetriebszeiten beziehen:

- «Heizleistung geliefert» entspricht dem Heizenergiebedarf des Tages geteilt durch die Heizbetriebsstunden des Tages.
- «Heizleistungsbedarf» entspricht dem Heizenergiebedarf des Tages geteilt durch 22h (2h Sperrzeit berücksichtigt).
- «Quellenmitteltemperatur» ist der Mittelwert der Quellen-Eintrittstemperatur und der Quellen-Austrittstemperatur im Heizbetrieb.

Bei der leistungsgeregelten Wärmepumpe von Anlage F006 ist zu erkennen, dass die Quellenmitteltemperatur im dargestellten Zeitbereich um 2 bis 3 Kelvin ansteigt, wenn die WP-Leistung von ca. 8 kW auf ca. 4 kW halbiert wird. Dies entspricht einer Quellen-Temperaturänderung von ca. 0.75 Kelvin pro kW Heizleistung. Der dargestellte Zeitbereich wurde aufgrund der Warmphase zwischen Weihnachten 2021 und Jahresanfang 2022 gewählt, da so Leistungsänderungen und deren Einfluss auf die Quellentemperatur gut ersichtlich sind.

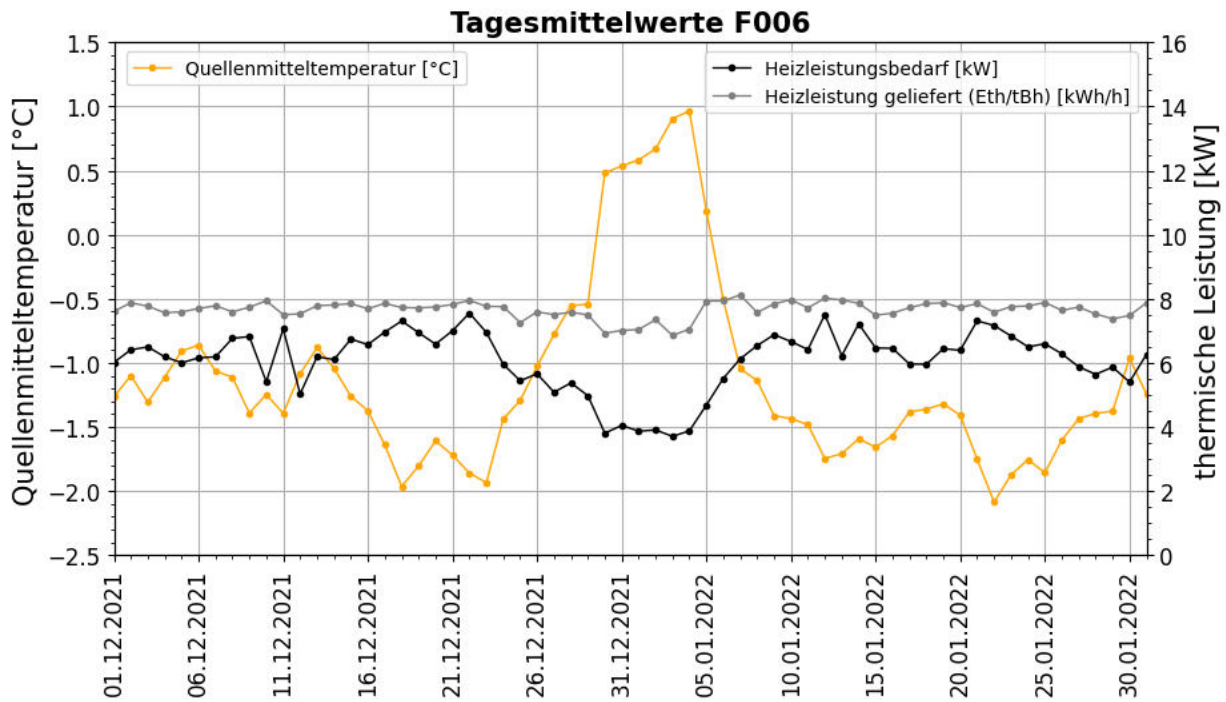


Abbildung 21: Vergleich der Quellenmitteltemperatur (gelb), dem Leistungsbedarf (schwarz) und der gelieferten Leistung (grau, berechnet anhand Tagesenergie geteilt durch Heizbetriebsstunden). Bei der Leistungsvariablen Wärmepumpe der Anlage F006 ist eine deutliche Veränderung der Quellentemperatur festzustellen.

Die älteren Anlagen (F006: 1994; F014:1996) werden bei tieferen Temperaturen und mit höheren Entzugsleistungen betrieben, wobei die höhere spezifische Entzugsleistung der damaligen Dimensionierungspraxis geschuldet sein dürfte. Tendenziell sinken die gemessenen Temperaturen mit höherer spezifischer Entzugsleistung. Unabhängig ob die älteren Anlagen in der Regressionsbildung enthalten sind, weisen die Messdaten auf eine tiefere, minimale Solemitteltemperatur bei höheren Belastungen hin. Dies deckt sich mit den Erwartungen aus der Theorie, wonach die Entzugsleistung einen wesentlichen Einfluss auf die Temperatur der Erdwärmesonde hat.

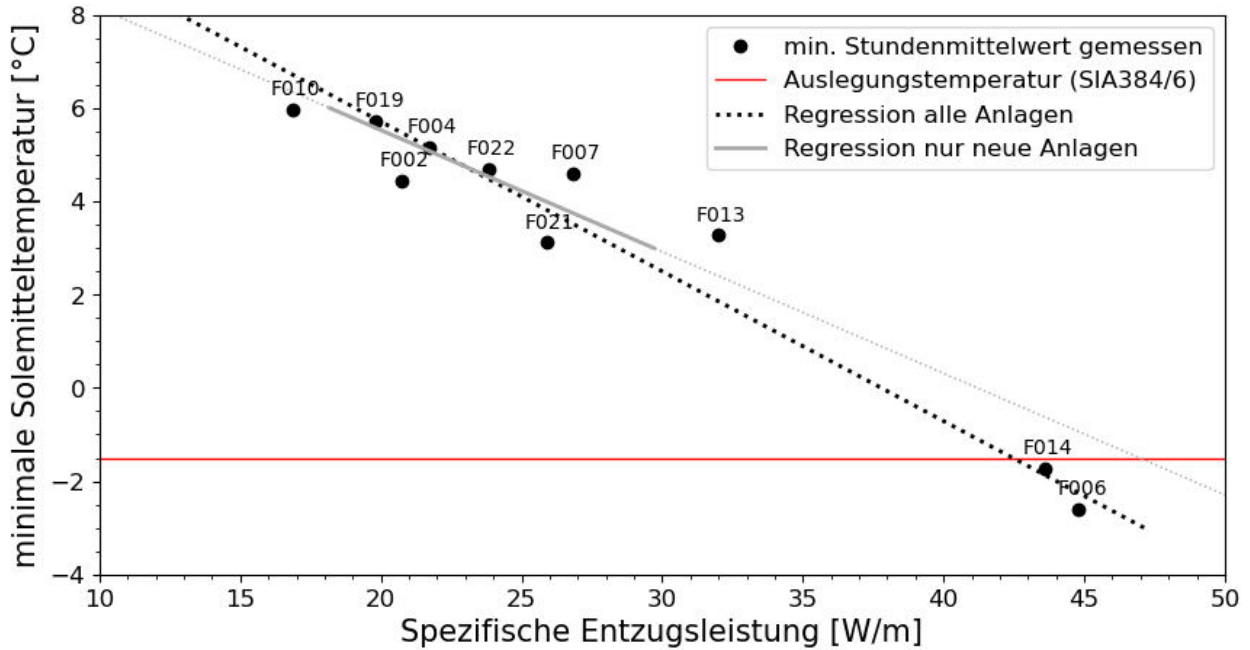


Abbildung 22: Gegenüberstellung der minimalen Quellenmitteltemperatur und der Entzugsleistung (am Auslegepunkt). Die älteren Anlagen F006 und F014 sind stärker abgekühlt als die neuen Anlagen. Dies hängt einerseits mit dem Alter, als auch mit der eher hohen Entzugsleistung zusammen. Die Anlagen F002, F004, F007 und F010 können als Langzeitstabil betrachtet werden, die Anlagen F019, F021, F022, F026 und F028 weisen zu wenige Betriebsjahre auf, um den Zustand qualitativ zu kategorisieren. Bei allen Anlagen ist mit fortschreitendem Betrieb auch mit weiterer Abkühlung (Verschiebung in Y-Richtung) zu rechnen.

Anmerkung: Diese Diagramme dürfen nicht zu Auslegungszwecken verwendet werden!
Die Dimensionierung von Erdwärmesonden wird durch die SIA-Norm 384/6 vorgegeben.

2.7 Optimierungen und Diverses

2.7.1 Anpassung der Heizkurve führte zu Effizienzsteigerung von 2-3 % pro Kelvin

Bei zwei Anlagen im Feldmessprogramm wurden vor, bzw. während der letzten Heizsaison die Heizkurven angepasst und damit die Vorlauftemperaturen reduziert. Wie aus der Theorie zu erwarten und bereits im Jahresbericht 2022, Kapitel 3.3 gezeigt, hängt die Effizienz von Wärmepumpen direkt mit dem Temperaturhub zusammen. Also dem Temperaturunterschied zwischen Quelleneintrittstemperatur und der Heizungsvorlauftemperatur. Je kleiner der Hub, umso effizienter der Wärmepumpenprozess.

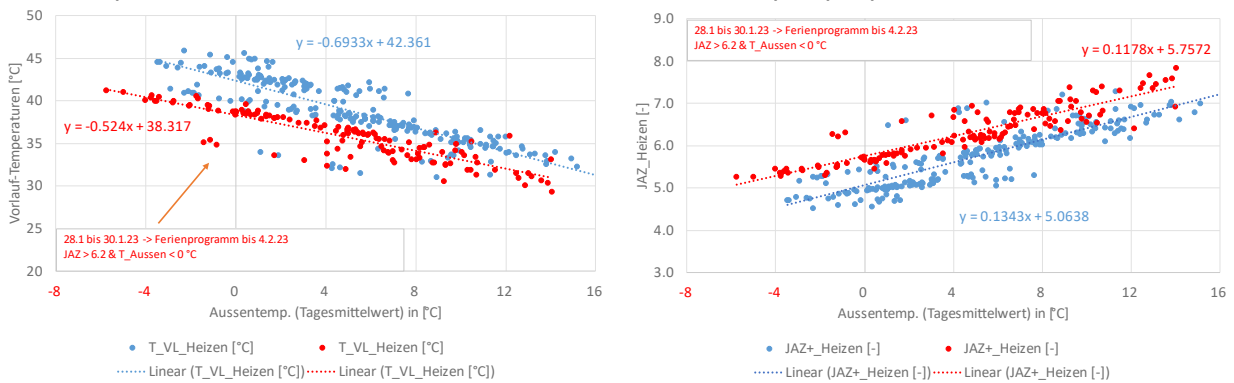


Abbildung 23: Veränderung der Vorlauftemperatur und JAZ+ im Heizbetrieb bei Anlage F019. Im linken Diagramm ist die alte und die neue Heizkurve dargestellt. Im rechten Diagramm ist die Veränderung der Effizienz (JAZ+ Heizen) geplottet. Blau ist die «alte» Einstellung, rot die «neue». Durch die Reduktion der Vorlauftemperatur konnte die Effizienz der Wärmepumpe gesteigert werden (+14%).

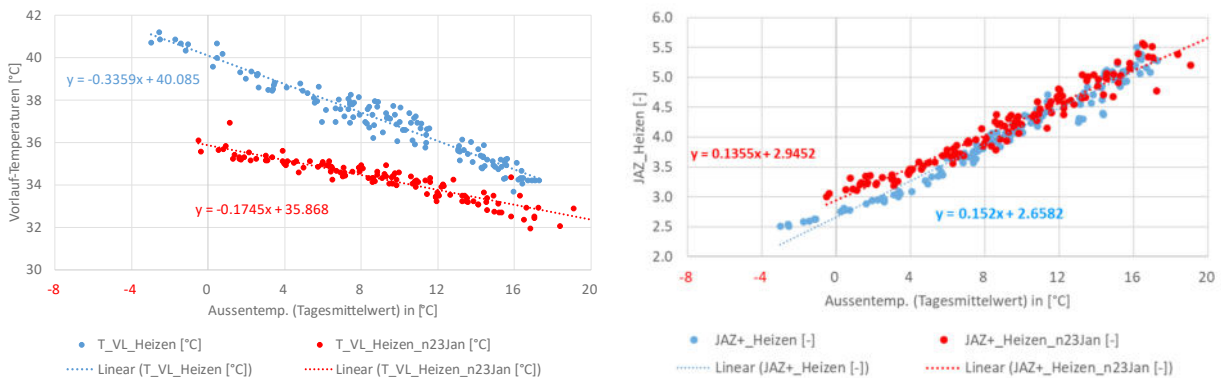


Abbildung 24: Veränderung der Vorlauftemperatur und JAZ+ im Heizbetrieb bei Anlage F011. Im linken Diagramm ist die alte und die neue Heizkurve dargestellt. Im rechten Diagramm ist die Veränderung der Effizienz (JAZ+ Heizen) geplottet. Blau ist die «alte» Einstellung, rot die «neue». Durch die Reduktion der Vorlauftemperatur konnte die Effizienz der Wärmepumpe gesteigert werden (+7%).

Generell wird in der Branche von einer Effizienzsteigerung von 2-3 % pro Kelvin (Reduktion) ausgegangen. Diese Größenordnung zeigt sich auch bei Anlage F019 mit + 2.3% pro Kelvin sowie Anlage F011 mit +2.5 % pro Kelvin messtechnisch:

- Bei Anlage F019 (Abbildung 25) konnte die Vorlaufftemperatur um 6 Kelvin reduziert werden. Der Effizienzkennwert «JAZ+_Heizen» erhöhte sich anschliessend um 14%. Dies entspricht einer Effizienzsteigerung von 2.3 %/Kelvin.
- Bei Anlage F011 wurde die Heizkennlinie am 23. Januar 2023 verändert. Somit ist bei diesem Objekt ein Vergleich über die Heizsaisonkennwerte nicht möglich. In Abbildung 26 sind die Tagesmittelwerte vor der Umstellung blau, der Umstellung rot dargestellt. Ausgehend von den Regressionsgeraden reduzierte sich die Vorlauftemperatur bei einer Aussentemperatur von 0°C um 4.2 Kelvin von 40.1 °C auf 35.9 °C. Der Kennwert «JAZ+_Heizen» stieg dabei um 10.5 % von 2.95 auf 3.18. Dies ergibt eine Effizienzsteigerung von 2.5 %/Kelvin.

Diese beiden Beispiele verdeutlichen, dass eine einfache Reduzierung der Vorlauftemperatur den elektrischen Energiebedarf um 2-3 % pro Kelvin reduzieren kann, ohne den Komfort einzuschränken.

Man geht davon aus, dass bei den meisten Heizungsanlagen eine Optimierung der Heizkurve möglich ist, wobei darauf zu achten ist, dass die Vorlauftemperatur nur so weit reduziert wird, dass der Komfort aufrechterhalten bleibt. Dazu gibt es vom Bundesamt für Energie ein Merkblatt (BFE, Bundesamt für Energie, 2022) und ein Video der Energie Agentur Wirtschaft (QR-Code).



<https://enaw.ch/unser-tipp-heizkurve/>

2.7.2 Effizienz Warmwasser F024

Bei Anlage F024 wurde ein hoher Temperaturabfall beim Warmwasser festgestellt. In Abbildung 27 ist die Trinkwarmwassertemperatur am Speicherausgang dargestellt (rote Linie). Aufgrund der Zirkulation entspricht diese Temperatur auch der Temperatur im TWW-Speicher, welche hier stetig von ca. 52 °C auf ca. 39 °C innerhalb von 24 Stunden absinkt. Dies entspricht einer Speichertemperaturabnahme von ca. 0.5 Kelvin pro Stunde, welche relativ unabhängig vom Warmwasserbezug (grüne Linie) ist. Teilweise beträgt der Temperaturabfall bis zu 0.79 K/h bei 0 Liter Warmwasserbezug (11.9K über 15h). Dies bedeutet, dass die thermischen Verluste aufgrund der Zirkulation hoch sind. Entsprechend lag der Trinkwarmwasser-Nutzenergieanteil in der Heizsaison 2022/23 bei 37 % der thermischen Auflade-Energie. Das Minimum lag bei 30 % (Heizsaison 2020/21). Während der Aufladungen steigt die Warmwassertemperatur wieder auf über 52 °C, die Aufladezeiten sind anhand des Durchflusses «22_Vaufl» (violette Linie) gut zu erkennen.

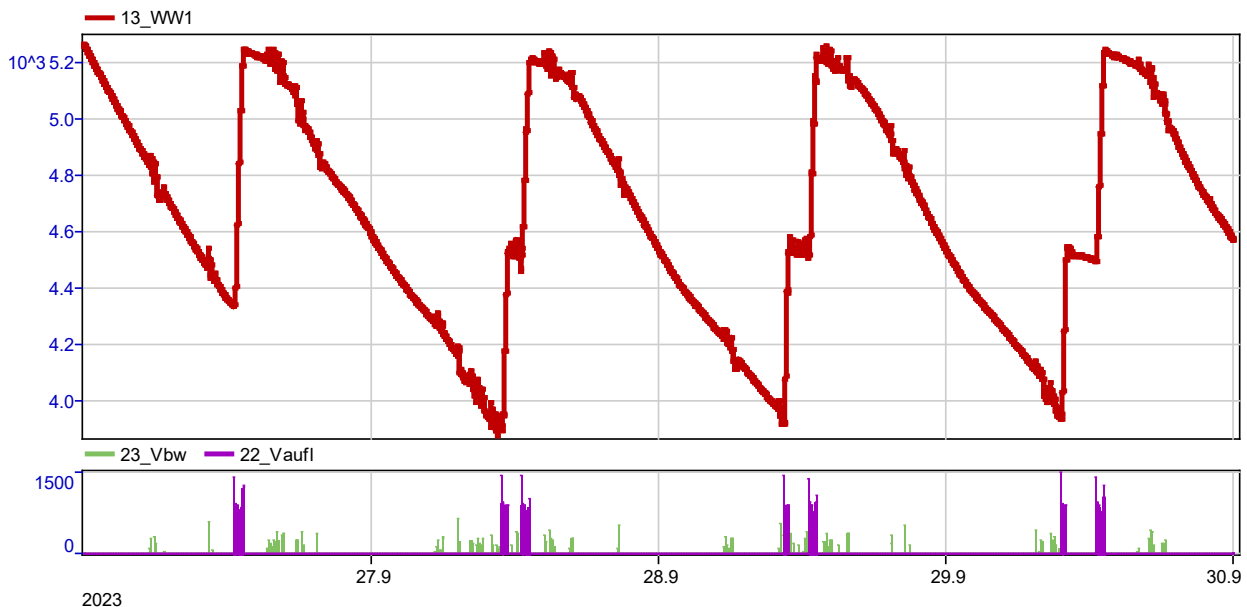


Abbildung 25: Im obigen Ausschnitt aus der Datenvisualisierung sind im oberen Bereich die Warmwassertemperaturen (gemessen am Austritt) und im unteren Bereich die Aufladungen (violette, [l/h]) und Warmwasserbezüge (grün, [l/h]) dargestellt. Der Temperaturverlauf ist auffällig. Zu erwarten wäre, dass mit jeder Zapfung die Temperatur kurz ansteigt und dann auskühlt und bei der nächsten Zapfung wieder ansteigt. Der Verlauf weist auf eine Zirkulation mit eher hohen Wärmeverlusten hin. (Temp. mit 10 multiplizieren)

Die Auskühlung wird durch eine ausgeprägte Schwerkraftzirkulation via Warmwasserleitung und Zirkulationsleitung verursacht. Die natürliche Zirkulation erfüllt bereits die Komfortanforderungen der Nutzer, weshalb die verbaute Zirkulationspumpe aktuell deaktiviert ist. Aufgrund der Komfortanforderungen wurde die natürliche Zirkulation (Schwerkraft oder Rohr in Rohr) nur temporär zu Testzwecken unterbunden.

Um das mögliche Einsparungspotential zu ermitteln, wurde während kurzer Versuchsphasen die Zirkulation mithilfe einer vorhandenen Absperrung unterbunden. In Abbildung 28 markiert die blaue Linie das händische Schliessen des Absperrhahnes (orange eingekreist). Bei unterbrochener Zirkulation sinkt die gemessene Temperatur aufgrund der lokalen Auskühlung nun deutlich schneller ab, da kein Warmwasser aus dem Speicher nachgeführt wird. Bei jedem Warmwasserbezug steigt die gemessene Warmwassertemperatur sprunghaft an. Der Trend dieser Maxima ist als grün strichlierte Linie eingezeichnet. Die Steigung der grün strichlierten Linie gibt die Auskühlgeschwindigkeit des Speichers wieder, welche im dargestellten Zeitraum 0.2 K/h beträgt. Die braun strichlierte Linie weist eine Steigung auf 0.5 K/h aus.

⁵ Bei aktiver Zirkulationspumpe verändert sich das Temperaturprofil kaum. Dies deutet auf eine dominierende Schwerkraftzirkulation hin.

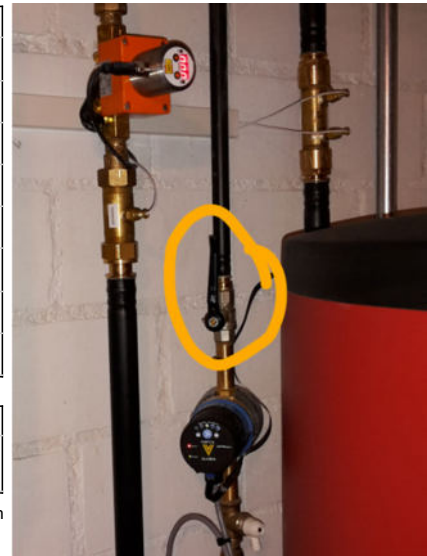
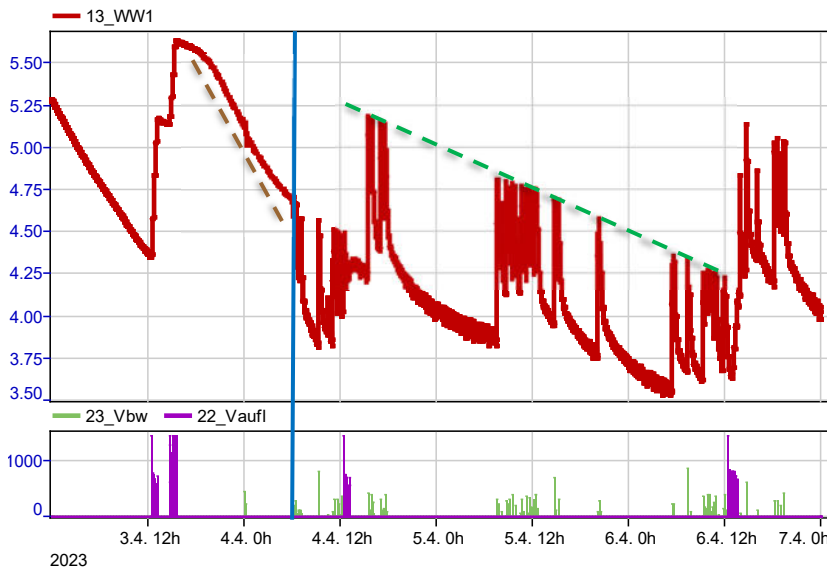


Abbildung 26: Im obigen Ausschnitt aus der Datenvisualisierung sind im oberen Bereich die Warmwassertemperaturen (gemessen am Austritt) und im unteren Bereich die Aufwendungen (violette) und Warmwasserbezüge (grün) dargestellt. In der Zeit vor der blauen Linie ist die Absperrung (orange eingekreist) offen, danach geschlossen. Mit geschlossenem Ventil ist das Verhalten so wie zu erwarten. Im Szenario «kontrollierte Zirkulation» wurde das Ventil jeweils morgens geöffnet und abends geschlossen. Im Szenario «ohne Zirkulation» bleibt das Ventil dauerhaft geschlossen.

Für die Abschätzung der möglichen Effizienzverbesserungen wurde die Zirkulation mithilfe des Absperrventils für 5 Tage jeweils nur während der Nacht («kontrollierte Zirkulation») und einmal für 10 Tage komplett unterbunden («ohne Zirkulation»). Die Energieaufwendungen dieser Zeiträume wurde dann mit denen des Normalbetriebes («unkontrollierten Zirkulation») verglichen.

Tabelle 4: Vergleich der analysierten Szenarien: Im Szenario «kontrollierte Zirkulation» wurde das Ventil jeweils morgens geöffnet und abends geschlossen. Im Szenario «ohne Zirkulation» blieb das Ventil dauerhaft geschlossen. Bei der «unkontrollierten Zirkulation» blieb die Absperrung dauerhaft offen. Bei allen Szenarien blieb die Zirkulationspumpe aus.

Szenario	SNG (ohne Heizstab TWW)
unkontr. Zirk. (HS_21/22)	1.21
kontr.* Zirk. (Hochrechnung 5d => 365d)	1.56
ohne Zirk. (Hochrechnung 10d => 365d)	1.75

*ca. 16h/d Zirk. (autom. Absperrventil)

Da die Leitungen nicht oder nur schwach gedämmt sind, kommt der Wärmeverlust in den Wintermonaten aktuell der Heizung zugute und eine Reduktion des Wärmeverlusts würde dann durch die Heizung ausgeglichen werden müssen. Eine Verbesserung des Zirkulationsverlustes könnte hier bereits eine durchgängige Dämmung der Warmwasser- und Zirkulationsleitungen bringen, da damit die Temperaturdifferenz zwischen Warmwasser- und Zirkulationsrücklaufemperatur reduziert und damit die Fließgeschwindigkeit reduziert würde. Um eine kontrollierte Zirkulation nachträglich zu ermöglichen, wäre der Einbau eines Zeitgesteuerten Absperrventils in die Zirkulationsleitung, welches über Nacht die Zirkulation unterbindet, möglich. Die ausgewiesenen Systemnutzungsgrade basieren auf kurzen Messzeiträumen von wenigen Tagen und wurden auf ein ganzes Jahr hochgerechnet. Dies führt naturgemäß zu einer grösseren Unsicherheit, die hauptsächlich vom Nutzerverhalten abhängig ist.

Erklärung der hier verwendeten Abkürzungen:

SNG	Systemnutzungsgrad [-]
TWW	Trinkwarmwasser
Zirk.	Zirkulation
kontr.	Kontrolliert
autom.	Absperrventil

3. Spezialauswertung: «Wärmepumpendimensionierung»

In verschiedenen Publikationen (beispielsweise: (Ehrbar, Hubacher, & Erb, 2004) oder (Bosshard, et al., 2023)) wird beschrieben, dass Wärmeerzeuger in der Praxis häufig überdimensioniert sind. Auch in der Branche wird seit Jahren davon gesprochen. Die Feldmessungen eignen sich perfekt, um die Dimensionierung dem effektiven Bedarf gegenüberzustellen, um ein möglichst genaues Bild von Wärmepumpenanlagen im Feld zu erhalten. Dazu wird der Heizleistungsbedarf mit den Messdaten ermittelt und der Wärmepumpenleistung gegenübergestellt. In einem weiteren Schritt kann mit den Messdaten vielleicht auch ermittelt werden, welche Auswirkungen eine Über- oder Unterdimensionierung hat und ob sich bereits in Betrieb stehende Anlagen nachträglich optimieren lassen. Nachfolgend wird das Vorgehen für die Ermittlung der notwendigen Werte beschrieben und die Ergebnisse analysiert.

3.1 Ermittlung Wärmeleistungsbedarf für Heizung und Aufladung

Um den Wärmeleistungsbedarf ermitteln zu können, wird der Tagesenergiebedarf dem Tagesmittelwert der Aussentemperatur gegenübergestellt. Dargestellt werden all jene Tage, bei welchen die Wärmepumpe mindestens 1h im Heiz-, oder 0.5h im Aufladebetrieb (Brauchwassererwärmung) war. Um den Heizleistungsbedarf des Gebäudes zu ermitteln, wird der benötigte Tagesenergiebedarf für die Raumwärme sowie die Brauchwassererwärmung (Aufladung) durch die maximal mögliche Betriebszeit der Wärmepumpe geteilt, welche hier pauschal mit 22 Stunden angenommen wurde. Damit wird eine mögliche Sperrzeit von 2h berücksichtigt. Entscheidend ist der Heizleistungsbedarf im Auslegepunkt gemäss SIA2028. Häufig wurden diese tiefen Auslegetemperaturen in den letzten Jahren nicht erreicht, weshalb der Heizleistungsbedarf im Auslegepunkt auf Basis der vorhandenen Messdaten extrapoliert wurden. Für diese Bedarfsermittlung wurden alle verfügbaren Heizsaisons berücksichtigt. Zwischen den einzelnen Heizsaisons wurden nur geringe Differenzen festgestellt.

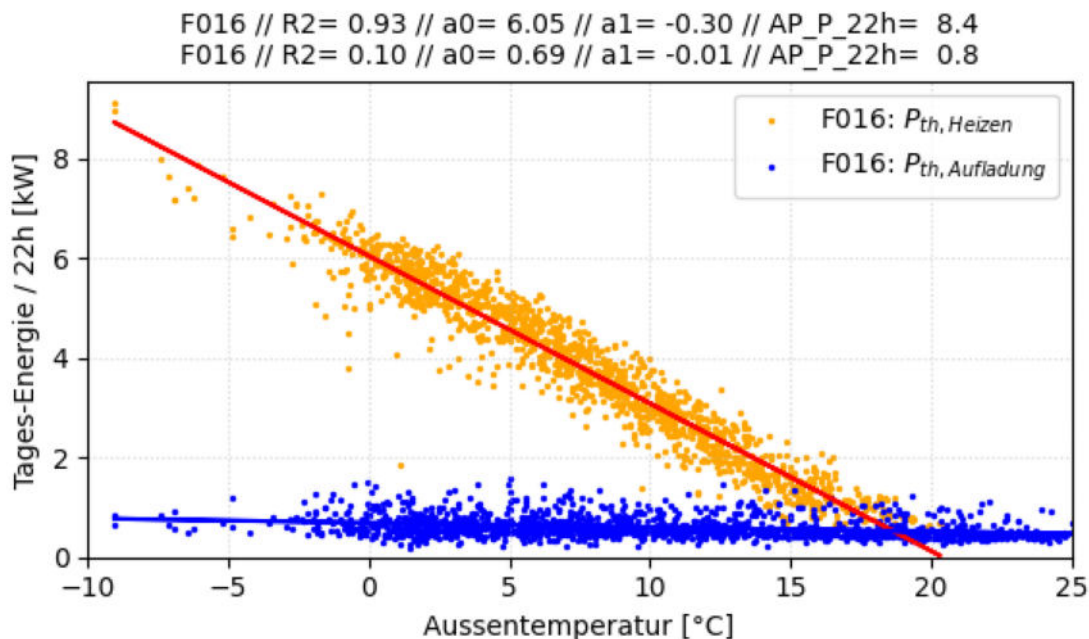


Abbildung 27: Heizleistungsbedarf (Heizung in orange und Wassererwärmung in blau) in Funktion der Aussentemperatur (Zeitraum: HS18/19 bis HS22/23). Die Leistung ist die Tagesenergie, an Tagen mit mind. 1h Heizbetrieb bzw. 0.5h Aufladebetrieb, geteilt durch 22h (2h Sperrzeit berücksichtigt). Die anhand der Tageswerte gebildete Regression erlaubt die Bestimmung der benötigten Heizleistung am Auslegepunkt (bei dieser Anlage bei -8°C). Die Regressionswerte, wie auch die Leistungen am Auslegepunkt sind im Titel enthalten. ($AP_P_22h = a1 \times \text{Temperatur} + a0$) R2 gibt den Bestimmtheitsgrad an. Erste Zeile steht für den Heizleistungsbedarf, die zweite Zeile für die Leistung (über 22h gerechnet) die für die Wassererwärmung benötigt wird.

Im Titel der Diagramme werden ganz rechts jeweils die berechnete Werte (lineare Regression) für den Auslegepunkt ausgewiesen:

- Heizleistungsbedarf = 8.4 kW
- Aufladeleistungsbedarf = 0.8 kW

Diese Werte wurden für jede Anlage ermittelt und in die Tabelle 5 übernommen.

3.2 Bestimmung der Vorlauftemperaturen Auslegepunkt

Um die richtige Wärmepumpenleistung aus dem Datenblatt herauszulesen, wurde auch die Heizkurve, bzw. die Vorlauftemperatur am Auslegepunkt berücksichtigt. Dazu wurden die Tagesmittelwerte der Heizmedientemperaturen der Aussentemperatur gegenübergestellt und ebenfalls eine lineare Regression gebildet.

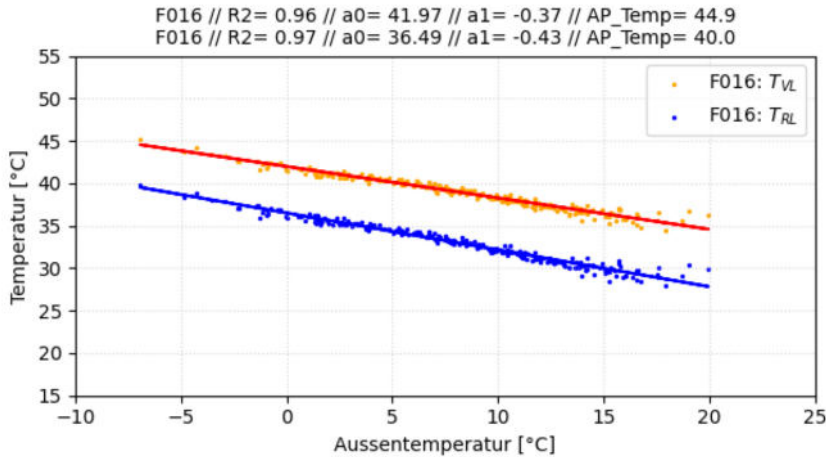


Abbildung 28: Medientemperaturen (Vorlauf in orange und Rücklauf in blau) in Funktion der Aussentemperatur (Zeitraum: HS22/23). Zur Ermittlung der Tageswerte wurden Tage mit mind. 1h Heizbetrieb bzw. 0.5h Aufladebetrieb berücksichtigt. Die anhand der Tageswerte gebildete Regression erlaubt die Bestimmung der benötigten Vorlauftemperatur am Auslegepunkt (bei dieser Anlage bei $-8^{\circ}\text{C} = 44.9^{\circ}\text{C}$). Die Regressionswerte, wie auch die Heizmedientemperaturen am Auslegepunkt sind im Titel enthalten. ($\text{AP_Temp} = a1 \times \text{Aussentemperatur} + a0$) R^2 gibt den Bestimmtheitsgrad an. Die erste Zeile steht für die Vorlauftemperatur, die zweite Zeile für die Rücklauftemperatur.

Auch hier wurden die extrapolierten Werte jeder Anlage in die Tabelle 5 übernommen.

3.3 Ermittlung der WP-Leistung (anhand Datenblatt)

Um die Wärmeleistung der WP mit dem Heizleistungsbedarf über die gesamte Betriebszeit analysieren zu können, wird ein Leistungsdiagramm mit der Leistung anhand Quelltemperatur benötigt. Bei den meisten Anlagen bieten die Datenblätter jedoch zu wenig Informationen, daher wurde die Leistung der WP aller Anlagen im Auslegepunkt, basierend auf den realen Betriebsbedingungen (Temperaturen), aus den Datenblättern gelesen und in Tabelle 5 festgehalten. Bei den Anlagen mit guten Informationen wurde zusätzlich ein eigenes Leistungsdiagramm (Abbildung 31) erstellt, um die Rückverfolgbarkeit zum Hersteller zu vermeiden. Im Teillastfall wurde zur Vereinfachung jeweils die angegebene Heizleistung bei Vorlauftemperatur 35°C verwendet.

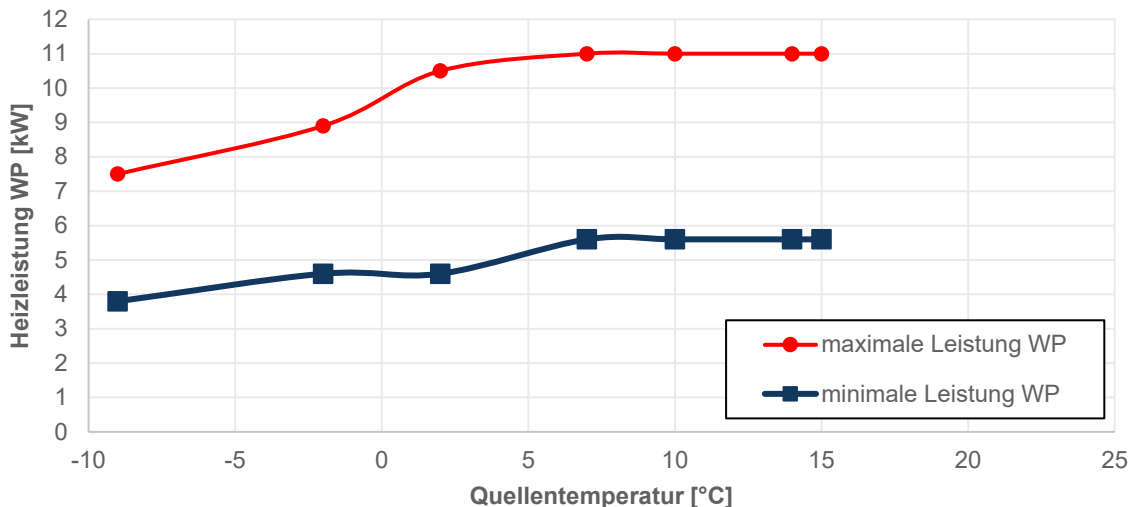


Abbildung 29: Die Leistungen in Funktion der Quelltemperatur entstammen direkt dem Datenblatt/Leistungsdiagramm der Leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpe der Anlage F017 bei W35. In rot die maximale Leistung, in blau die minimale Heizleistung.

Diese Daten werden zur Analyse des Betriebsverhaltens von drei Luft-Wasser-Wärmepumpen in Kapitel 3.5.5 und in der Dimensionierungsübersicht aller Anlagen im Kapitel 3.6 verwendet.

3.4 Zusammenspiel von Gebäude und Wärmepumpe

Ausschlaggebend für den Heizleistungsbedarf eines Gebäudes ist die Aussentemperatur. Entsprechend werden auf der linken Seite von Abbildung 30 der Heizleistungsbedarf des Gebäudes (blaue Punkte) sowie die mittlere Heizleistung der Wärmepumpe (orange Punkte) über die Tagesmittelwerte der Aussentemperatur dargestellt. Dementsprechend gibt es für jeden Temperaturwert der X-Achse exakt zwei Leistungspunkte. Für die Effizienz der Wärmepumpe ist die Quelleneingangstemperatur während des Wärmepumpenbetriebes relevant. Deshalb wurde auf der rechten Seite nun die Wärmepumpenleistung im Heizbetrieb (orange Punkte) über die Quellentemperatur während dem Heizbetrieb dargestellt. Der Wärmebedarf des Gebäudes (blaue Punkte) wurden wie bisher über die Aussentemperatur dargestellt. Nun sind die Leistungswerte jeweils über die für sie relevante Temperatur abgebildet. Hier fällt auf, dass die Quellentemperaturen im Heizbetrieb (orange Punkte) einen tieferen Wertebereich aufweisen als der 24h-Mittelwert der Aussentemperatur. Grund für den tieferen Wertebereich ist, dass die Wärmepumpen tendenziell während der kälteren Tagesstunden im Heizbetrieb sind. Bei tiefen Aussentemperaturen ist die Wärmepumpe deutlich länger in Betrieb, weshalb die mittlere Quellentemperatur während des Heizbetriebes deutlich näher beim 24h-Mittelwert der Aussentemperatur liegt (Vgl. Linie a). Wäre die Wärmepumpe 24h in Betrieb, dann sollten sich diese Temperaturen angleichen, sofern keine Fremdeinflüsse vorhanden sind. Bei höheren Aussentemperaturen reduziert sich die Laufzeit der Wärmepumpe, entsprechend weicht die mittlere Quellentemperatur während des Heizbetriebes weiter vom 24h-Mittelwert der Aussentemperatur ab. Da die Wärmeanforderungen an die Wärmepumpen entsprechend der WP-Regelung tendenziell während der kälteren (Nacht-) Stunden eines Tages erfolgt, ist dieser Wert deutlich tiefer als der, für das Gebäude relevante 24h-Mittelwert der Aussentemperatur (siehe Linie b).

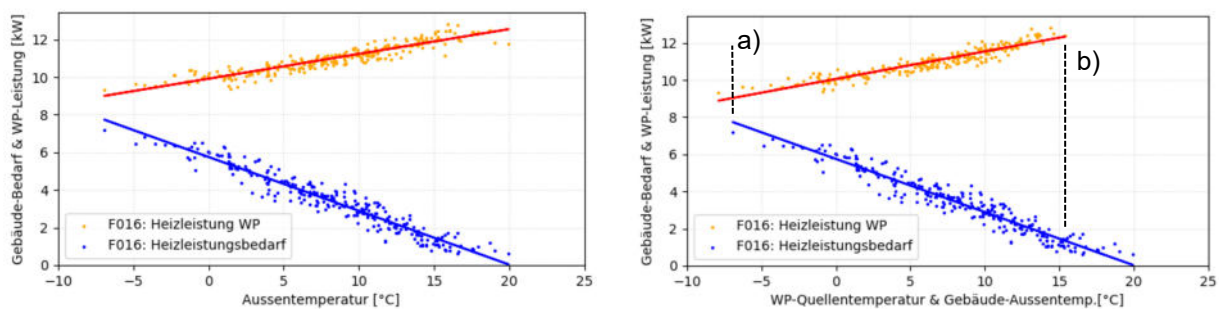


Abbildung 30: In der linken Abbildung werden die Heizleistung der Wärmepumpe und der thermische Heizbedarf des Gebäudes über den 24h-Mittelwert der Aussentemperatur dargestellt. In der rechten Grafik wird Heizleistung der Wärmepumpe über die für die Heizleistung relevante mittlere Quelleneintritts-Temperatur während des Heizbetriebes dargestellt, während der Heizleistungsbedarf des Gebäudes weiterhin über den 24h-Mittelwert der Aussentemperatur dargestellt bleibt. Entsprechend der Laufzeiten wird die rote Kurve nach links zu tieferen Quellentemperaturen im Vergleich zur Aussentemperatur verschoben.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist der Unterschied zwischen Quellentemperatur und Aussentemperatur systembedingt offensichtlich. Entsprechend Abbildung 34 variiert die Quellentemperatur bei Erdwärmepumpen im Jahresverlauf deutlich weniger als die Aussentemperatur.

⁶ Fremdeinflüssen sind z.B. solare Einstrahlung, oder Wärmetransmission durch die Wand zum Aussentemperatur-Sensor, etc.

3.5 Vergleich der WP-Leistung mit dem Heizleistungsbedarf (anhand Messdaten)

Der Heizleistungsbedarf der Gebäude sowie die gelieferten Heizleistungen der Wärmepumpen konnten für alle Anlagen aus den Messdaten ermittelt werden. Ein Vergleich mit den Leistungsdiagrammen der Hersteller wurde nur für die leistungsgeregelten LW-WP der Anlagen F011, F012 sowie F017 gemacht. Bei den meisten anderen Wärmepumpen fehlten oftmals die dafür erforderlichen Informationen in den Datenblättern. Diese drei Anlagen werden in Kapitel 3.5.5 detaillierter dargestellt.

Zunächst werden die Anlagen entsprechend ihrer Wärmepumpenkategorie (LWWP vs. SWWP) und Regelungsart (Leistungsgeregelt vs. On/Off) dargestellt.

3.5.1 On/Off Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWWP-fix)

Das zu erwartende Verhalten bei nicht leistungsgeregelten Luftwasserwärmepumpen ist, dass die Wärmeleistung mit höherer Aussentemperatur ansteigt. Bei Luftwärmepumpen steigt mit der Aussentemperatur auch die Quelltemperatur. Durch die höhere Verdampfungstemperatur steigt die Dichte des Sauggases und somit der Massenstrom in der On/Off-Wärmepumpe, was wiederum zu einer höheren Leistung führt. Gleichzeitig sinkt aufgrund der hinterlegten Heizkurve die benötigte Senktemperatur. Dies reduziert den benötigten Temperaturhub deutlich, entsprechend steigt die Wärmepumpen-Effizienz.

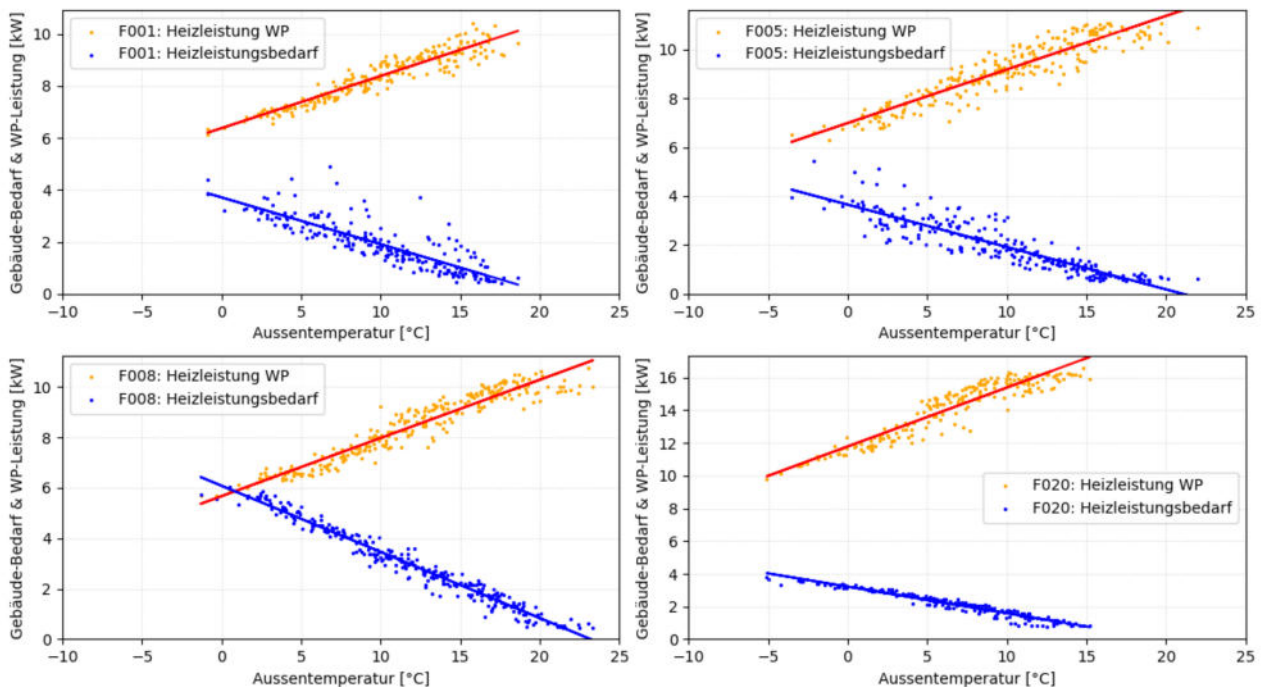


Abbildung 31: Zur Betrachtung des Betriebsverhaltens von nicht leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen werden die Heizleistung der Wärmepumpe und der thermische Heizleistungsbedarf des Gebäudes in Funktion der Aussentemperatur einander gegenübergestellt. Die Anlage F020 fällt mit einer hohen Differenz zwischen Wärmepumpenleistung und Heizleistungsbedarf auf. Diese Wärmepumpe liefert im Auslegepunkt fast das doppelte der benötigten Leistung, ist somit überdimensioniert. Die Überdimensionierung aller Anlagen ist in Tabelle 5 dargestellt.

Anlage F001, F005 und F020 weisen am linken Ende einen Gap zwischen der gelieferten und der benötigten Heizleistung auf. Dies deutet auf eine Überdimensionierung hin.

Bei einstufigen Wärmepumpen ist die Streuung der Leistung (orange Punkte) sehr gering.

Bei den tiefsten erreichten Aussentemperaturen (linkes Ende der blauen Linie) bleibt bei 3 von 4 Anlagen ein Gap zwischen Leistungsbedarf und gelieferter WP-Leistung. Diese Anlagen takteten daher stärker als wenn keine Überdimensionierung vorliegen würde. Takteten haben zwar auch noch andere Ursachen, jedoch führt eine zu gross dimensionierte Anlage zu sehr kurzen Laufzeiten bei hohen Vorlauftemperaturen, das wiederum die Effizienz mindert.

Mithilfe dieser Darstellung kann die obere Heizgrenze auch sehr leicht ermittelt werden, da nur Tage dargestellt sind, an welchen die Wärmepumpe in Summe mindestens eine Stunde im Heizbetrieb war.

So erkennt man, dass die Wärmepumpen der Anlagen F005 und F008 auch an einzelnen Tagen mindestens eine Stunde im Heizbetrieb waren, an welchen der Tagesmittelwert der Aussentemperatur über 20°C war. Dies deutet auf keine, oder eine tendenziell zu hoch eingestellte obere Heizgrenze hin.

3.5.2 Leistungsgeregelte Luftwärmepumpen (LWWP-Inv)

Leistungsvariable Wärmepumpen sollen ihre Heizleistung soweit möglich auf den Bedarf des Gebäudes anpassen. Eine perfekt zum Gebäude passende Wärmepumpe würde exakt dem Leistungsbedarf des Gebäudes nachregeln. Entsprechend sollten in Abbildung 32 die orangenen Heizleistungspunkte der Wärmepumpe identisch mit den blauen Wärmebedarfspunkten des Gebäudes sein. Ab einer gewissen Aussentemperatur ist die minimale WP-Leistung höher als der Leistungsbedarf. Dies ist beispielsweise bei Anlage F015 ab 0 °C, bei Anlage F023 ab +4 °C der Fall. Das Ziel ist es, den Regelbereich möglichst gut auszunutzen.

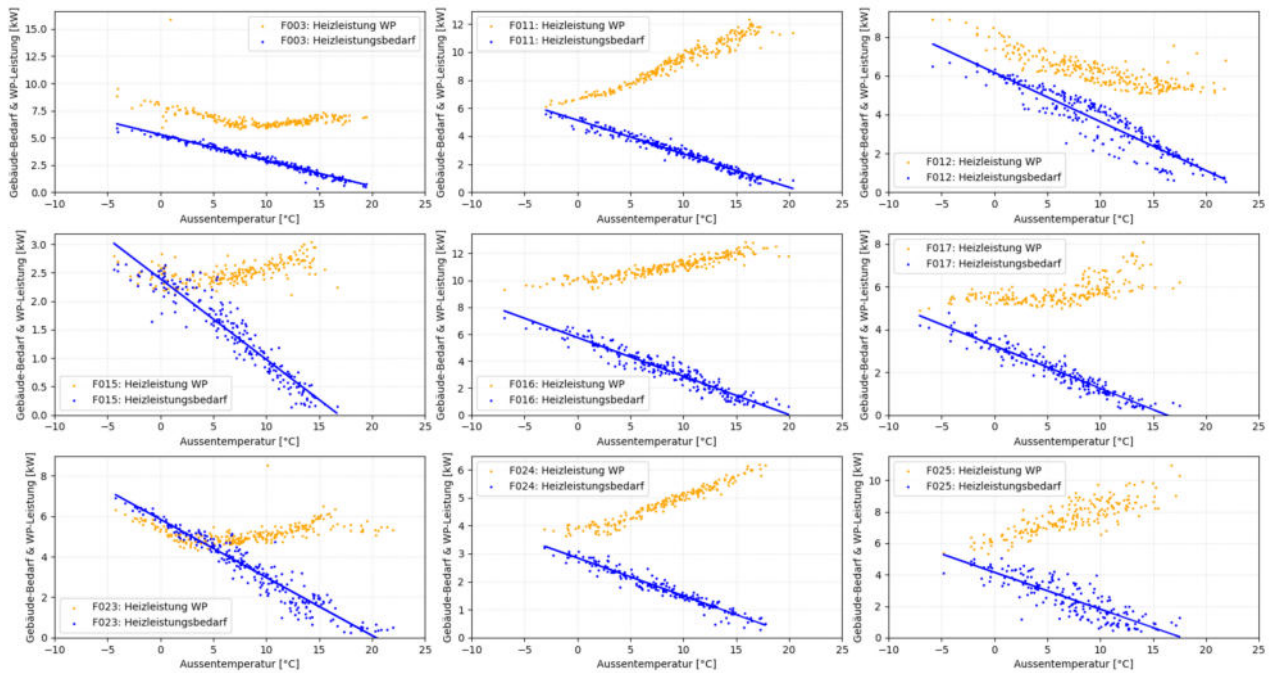


Abbildung 32: Zur Betrachtung des Betriebsverhaltens von Leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen werden die Heizleistung der Wärmepumpe und der thermische Heizleistungsbedarf des Gebäudes in Funktion der Aussentemperatur einander gegenübergestellt. Die Anlage F024 fällt mit einer früh ansteigenden Differenz zwischen Wärmepumpenleistung und Heizleistungsbedarf auf. Diese Wärmepumpe wird fast konstant mit der minimalen Leistung betrieben und ist somit eindeutig überdimensioniert. Am Auslegepunkt liefert die Wärmepumpe bei Volllast das 2.4-fache der benötigten Leistung. Die Überdimensionierung aller Anlagen ist in Tabelle 5 dargestellt.

Leistungsgeregelte Wärmepumpe weisen eine gewisse Minimalleistung auf, welche nicht unterschritten werden kann. Daher kann ab einer gewissen Aussentemperatur nicht bis zum Wärmebedarf des Gebäudes heruntergeregelt werden. Dies führt zu einem Taktbetrieb. Je grösser die Leistungsdifferenz ist, umso kürzer wird die tägliche Betriebszeit der Wärmepumpe, was tendenziell zu einer höheren Taktrate führt. Ein Taktbetrieb führt zu geringerer Effizienz durch ansteigende Vorlauftemperaturen. Zur Lebensdauer von takten Inverter-Wärmepumpen gibt es bisher keine weitreichenden Untersuchungen.

Die Anlagen F003, F012, F015 und F023 weisen unterhalb einer gewissen Aussentemperatur eine gute Leistungsregelung auf. Die restlichen Anlagen zeigen beinahe ausschliesslich eine positive Regression, die WP-Leistung steigt mit steigender Aussentemperatur. Dies deutet darauf hin, dass diese Anlagen die gesamte Zeit mit ihrer Minimalleistung betrieben werden oder die WP-Regelung den Leistungsbereich der Wärmepumpe ungenügend nutzt. Somit weisen die eigentlich leistungsgeregelten Wärmepumpen eine ähnliche Betriebsweise auf, wie die nicht leistungsgeregelten On/Off Wärmepumpen.

Überdimensionierte Wärmepumpen können das Potential einer Leistungsregulierung nur beschränkt oder gar nicht ausnutzen, wenn deren Minimalleistung höher als die vom Gebäude benötigte Heizleistung ist. Dann müssen auch diese Wärmepumpen in einen weniger effizienten Taktbetrieb wechseln. Dies ist dann doppelt schade, da leistungsgeregelte Wärmepumpen bei ihrer Minimalleistung häufig auch eine geringere Effizienz ausweisen als bei höheren Leistungen.

Entsprechend Abbildung 34 ist dies auch bei einigen der hier untersuchten, leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen der Fall.

3.5.3 On/Off Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWWP-fix)

On/Off Solewärmepumpen verhalten sich ähnlich wie On/Off Luftwärmepumpen. Die Quelltemperatur ist im Gegensatz zur Aussenluft relativ konstant, aber auch hier nimmt die Heizleistung der WP mit steigender Aussenstemperatur zu und der Heizleistungsbedarf ab. Durch die höheren Quelltemperatur bei geringerer Sondenbelastung und durch Senkung der Vorlaufstemperatur steigt die Heizleistung mit steigender Aussenstemperatur an, wie in Abbildung 33 ersichtlich. Der reduzierte Temperaturhub führt natürlich auch zu einer höheren Effizienz.

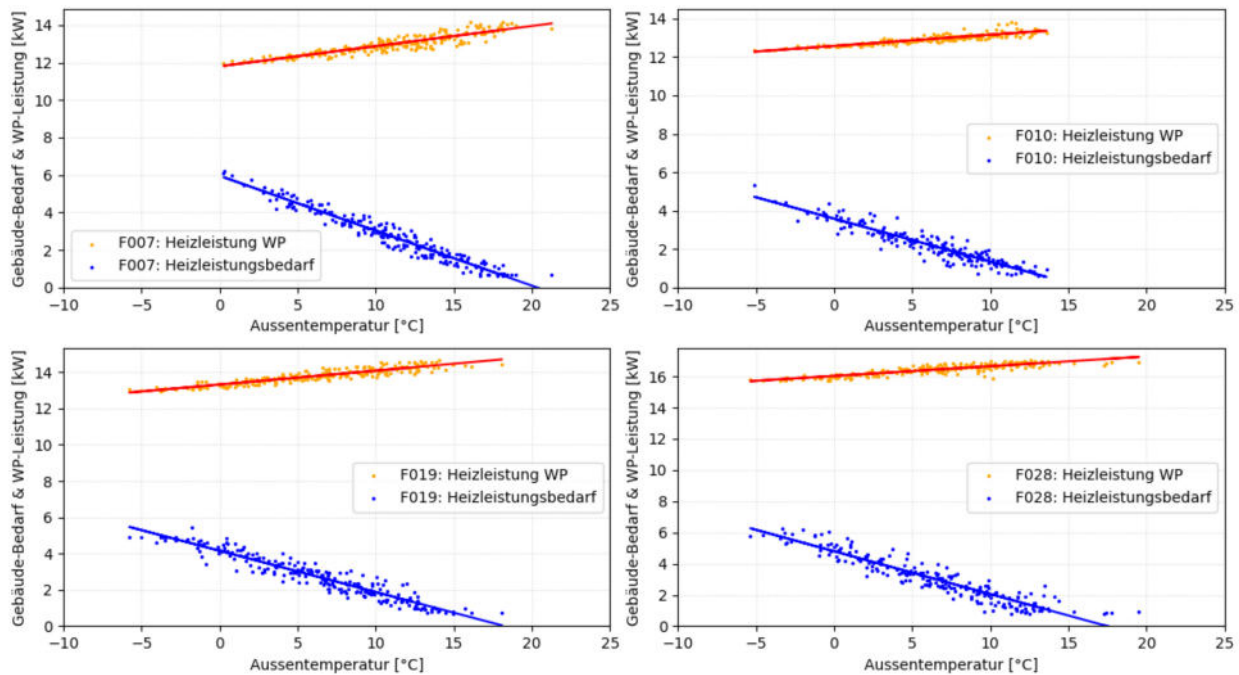


Abbildung 33: Zur Betrachtung des Betriebsverhaltens von nicht Leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen werden die Heizleistung der Wärmepumpe und der thermische Heizleistungsbedarf des Gebäudes in Funktion der Aussenstemperatur einander gegenübergestellt. Die Anlage F019 fällt mit einer grossen Differenz zwischen Wärmepumpenleistung und Heizleistungsbedarf auf. Am Auslegepunkt liefert die Wärmepumpe das 1.75-fache der benötigten Leistung. Die Überdimensionierung aller Anlagen ist in Tabelle 5 dargestellt.

Mit zunehmender Quelltemperatur nimmt auch die Wärmeleistung zu. . Richtigerweise müsste man von abnehmender Leistung mit abnehmender Quelltemperatur sprechen. Je mehr Energie der Erdwärmesonde entzogen wird, umso tiefer ist die Quelltemperatur. Wie in Kapitel 2.6 zu sehen ist, verhalten sich die Quelltemperaturen im Trend wie die Aussenstemperaturen (der Effekt ist jedoch schwächer), sie nehmen im Herbst gegen den Winter zu ab und beginnen sich im Frühling, gegen den Sommer hin, zu regenerieren. Wenn man die Leistung der Quelltemperatur gegenüberstellt, ist bei SWWP die Änderung der Quelltemperatur naturgemäss wesentlich geringer als die Aussenstemperatur. Aufgrund der Überdimensionierung der Wärmepumpen, sind glücklicherweise auch die Erdwärmesonden teilweise überdimensioniert, was zu höheren Temperaturniveaus der Quelle und damit auch zu besseren Effizienzen führt. Insgesamt scheint die Überdimensionierung der SW-Anlagen grösser als bei den LW-Anlagen.

Die thermische Heizleistung der Wärmepumpen kann entweder über die Quelltemperatur oder Aussenstemperatur dargestellt werden. Beispielhaft ist dies für Anlage F010 in Abbildung 34 dargestellt. Wird die Leistung über die Quelltemperatur dargestellt (Abbildung 34, links), erkennt man die Korrelation der WP-Heizleistung von 12 kW bis 14 kW über eine Temperaturänderung der Quelle von knapp 3 Kelvin. Die gleiche Korrelation der WP-Heizleistung von 12 kW bis 14 kW erkennt man auch bei der Darstellung über die Aussenstemperatur (Abbildung 34, rechts), hier aber über eine Temperaturänderung von knapp 20 Kelvin. Über die Heizkennlinie führen tiefe Aussenstemperaturen zu höheren Vorlauftemperaturen (siehe Kapitel 3.2). Bei Anlage F010 erhöht sich die Vorlaufstemperatur z.B. um ca. 5 Kelvin (von 29 °C bei einer Aussenstemperatur von 14°C auf 34 °C bei einer Aussenstemperatur von -5 °C).

Gut erkennbar ist, dass auch die thermische Heizleistung der On/Off Solewasserwärmepumpen wie zu erwarten linear mit der Quellentemperatur als auch Aussentemperatur (aufgrund geringerer Vorlauftemperaturen und längeren «Regenerationsphasen») steigt, da in beiden Fällen der benötigte Temperaturhub ab- und somit die Effizienz zunimmt.

Um die Auslegung der Wärmepumpe untersuchen zu können, muss sowohl der Heizleistungsbedarf des Gebäudes als auch die thermischen Heizleistung der Wärmepumpe über die Aussentemperatur dargestellt werden (Abbildung 34, rechts). Das Vorgehen ist dann analog zur Beschreibung in Kapitel 3.5.1.

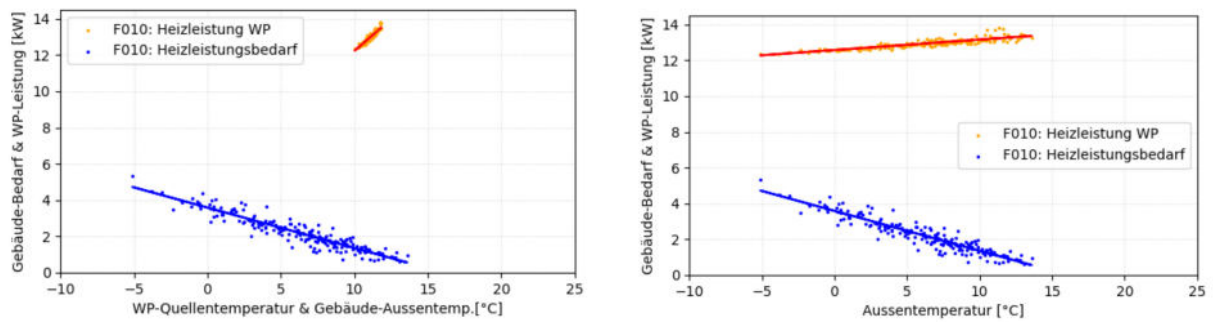


Abbildung 34. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen besteht ein grosser Unterschied zwischen der Aussen- und der Quellentemperatur. In den beiden hier dargestellten Diagrammen ist dies ersichtlich. Im linken Diagramm wird die Leistung WP (rot/orange) anhand der Quellentemperatur und rechts anhand der Aussentemperatur geplottet. Die markante Differenz des Temperaturbereichs kommt durch die viel kleinere Schwankung der Quellentemperatur. Auch hier besteht eine grosse Differenz zwischen Leistungsbedarf und WP-Leistung, was zu erhöhten Taktraten führt. Anlage F010 ist 64% überdimensioniert.

3.5.4 Leistungsgeregelte Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWWP-Inv)

Der Heizleistungsbedarf der Gebäude sowie die gelieferte Heizleistung der Wärmepumpen sind in Abbildung 35 in Abhängigkeit der Aussentemperatur dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass die gelieferte Heizleistung der Wärmepumpen deutlich mehr variiert, somit einen grösseren Regelbereich aufweisen. Dies hängt mit der konstanteren Quelltemperatur der Erdwärmesonde und dem dadurch grösseren Regelbereich zusammen. Bei den Anlagen F013, F014 und F021 entspricht an den meisten Tagen die von der Wärmepumpe gelieferte Heizleistung (orange Punkte) dem Heizleistungsbedarf des Gebäudes (blaue Punkte). Erkennbar ist dies, an dem grossen Überlappungsbereich der «blauen» und «orangenen» Punkte, an welchen die Leistungen übereinstimmen und der benötigte Energiebedarf somit ohne Taktbetrieb erbracht werden kann. Die Anlage F013 weist mit einer gut eingestellten Heizgrenze von ca. 17 °C über 3'980 Heizbetriebsstunden auf. Anlage F014 weist sogar über 5'017 Heizbetriebsstunden auf, hier liegt die Heizgrenze zumindest an einigen Tagen bei einem Tagesmittelwert der Aussentemperatur von über 21 °C. Anlage F013 weist eine mittlere Laufzeit von 11.2 Stunden pro WP-Start auf (Mittelwerte vom Heiz- und Aufladebetrieb), Anlage F014 weist 12.5 Stunden pro WP-Start aus. Anlage F014 hat eine eigene Trinkwasserwärmepumpe, entspricht weist F014 hier keinen Aufladebetrieb aus.

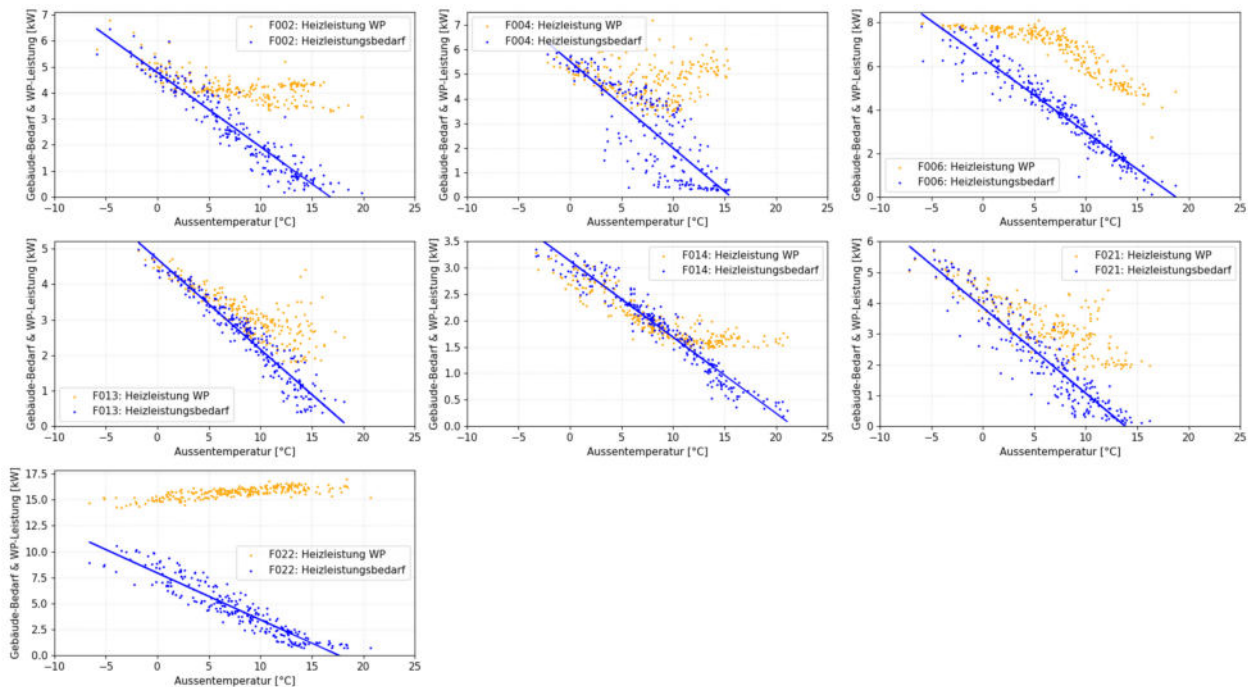


Abbildung 35: Zur Betrachtung des Betriebsverhaltens von Leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen werden die Heizleistung der Wärmepumpe und der thermische Heizleistungsbedarf des Gebäudes in Funktion der Aussentemperatur einander gegenübergestellt. Generell stimmen die WP-Leistungen dieser Anlagen mit dem Leistungsbedarf auffällig gut überein. Einzige Anlage F022 fällt mit einer konstant ansteigenden Differenz zwischen Wärmepumpenleistung und Heizleistungsbedarf auf, obwohl diese noch mitten im Regelbereich liegt. Die Überdimensionierung aller Anlagen ist in Tabelle 5 dargestellt.

In Abbildung 38 (unten) wird die Heizleistung der Aussentemperatur und der Quellentemperatur der Anlage F014 dargestellt. Die minimale Wärmepumpenleistung von 1.5 kW ist gut zu erkennen (grüne Linie). Unterhalb einer mittleren Aussentemperatur von 12 °C liegt der Heizleistungsbedarf bereits über 1.5 kW und somit oberhalb der minimalen Wärmepumpenleistung. Dies bedeutet, dass bei Aussentemperaturen unter 12 °C die Wärmepumpe den Heizleistungsbedarf des Gebäudes ohne Taktbetrieb erbringen kann. Erst bei mittleren Aussentemperaturen oberhalb von 12 °C ist der Gebäudebedarf kleiner als die minimale Wärmepumpenleistung, wodurch ein Taktbetrieb nötig ist (gelbe Bereich). Die Wärmepumpe von Anlage F014 passt hier sehr gut zum Gebäudeenergiebedarf, entsprechend kann das Betriebsverhalten als sehr gut beurteilt werden. Im rechten Bild ist die Leistung der Wärmepumpe über der Quelleneintrittstemperatur dargestellt. Gut zu erkennen ist die mit der Quellentemperatur ansteigende Minimalleistung der Wärmepumpe (grüne Linie) sowie der relative grosse Sole-Temperaturbereich von ca. 8 Kelvin der etwas älteren Erdsondenanlage. Der Heizleistungsbedarf des Gebäudes ist wieder über die Aussentemperatur dargestellt.

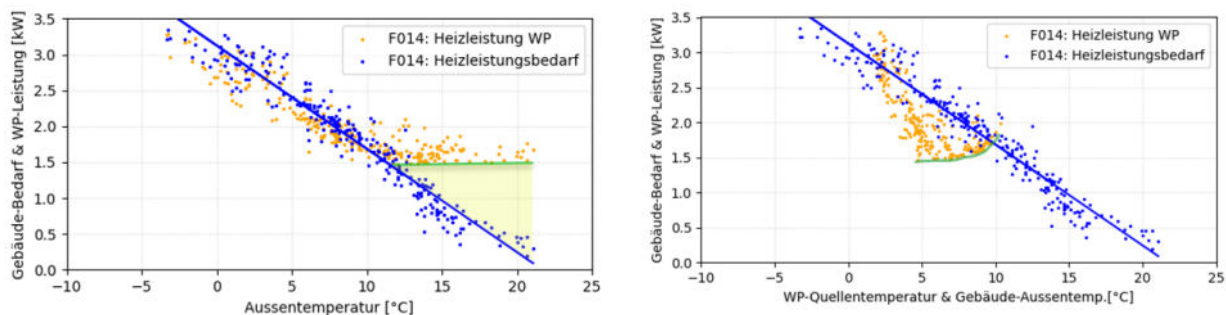


Abbildung 36: Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen besteht ein grosser Unterschied zwischen der Aussen- und der Quellentemperatur. In den beiden hier dargestellten Diagrammen ist dies ersichtlich. Im linken Diagramm wird die Leistung WP (rot/orange) anhand der Quellentemperatur und rechts anhand der Aussentemperatur geplottet. Die markante Differenz des Temperaturbereichs kommt durch die viel kleinere Schwankung der Quellentemperatur, was die Variabilität der Leistung im Vergleich zu Luft/Wasser-WP verbessert. Die minimale WP-Leistung ist gut zu erkennen (grün). Im gelben Bereich kann die Wärmepumpe die Leistung nicht mehr weiter senken und geht daher in einen Taktbetrieb über.

3.5.5 Vertiefte Analyse bei leistungsgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpen

Leistungsgeregelte Wärmepumpen können ihr Potential besonders dann ausspielen, wenn der variable WP-Leistungsbereich möglichst exakt den Heizleistungsbedarf des Gebäudes abdecken kann. Nur solange die Minimalleistung der Wärmepumpe kleiner als der Heizleistungsbedarf des Gebäudes ist, ist ein durchgehender, taktfreier Wärmepumpenbetrieb möglich.

Beispielhaft wurde dies bei drei leistungsgeregelten Luft-Wasser Wärmepumpenanlagen dargestellt (Abbildung 39 bis 42). Bei Anlage F017 wurde zusätzlich noch analysiert, wie das Zusammenspiel zwischen Wärmepumpe und Gebäude mit der nächstkleineren Wärmepumpe aus der gleichen Baureihe aussehen würde (Abbildung 43 & 44).

Der Heizleistungsbedarf von Gebäuden nimmt linear mit fallender Aussentemperatur zu, wie z.B. in Abbildung 37 gut ersichtlich (grün-strichlierte Linie). Hier wurde die lineare Regression des Gebäudewärmebedarfs dargestellt, welche messtechnisch erfasst und in Abbildung 32 dargestellt wurden.

Die gemessenen Stundenmittelwerte der thermischen WP-Heizleistungen werden als rote Punkte dargestellt. Diese wurden über die gemessenen Stundenmittelwerte der Quellenluft dargestellt, um sie mit den angegebenen Werten aus den Datenblättern besser vergleichen zu können. Generell kann davon ausgegangen werden, dass die Aussenluft- und Quellenluft-Temperatur übereinstimmen. Es treten allerdings lokale Unterschiede auf, da z.B. der Ansaugort der Quelle nicht der Messort der Aussentemperatur ist. Die Aussentemperatur wird am Ort des Aussentemperaturfühlers der Heizungsanlage gemessen. Die Quellentemperatur wird im Ansaugtrakt oder bei der Ausseneinheit gemessen, ausgewertet werden jene Zeitbereiche, in welchen der Verdichter in Betrieb ist.

Um Start- und Einschwingvorgänge bei der Darstellung zu vermeiden, wurden hier nur jene Stundenmittelwerte dargestellt, in welchen die Wärmepumpe die gesamte Stunde im Heizbetrieb war (Kriterium: «1h Heizbetrieb pro Kalenderstunde»). Um die gemessenen Leistungswerte mit den in den Hersteller-Datenblättern besser vergleichen zu können, wurde die genannte Minimal-Leistung (blau-strichlierte Linie) sowie Maximal-Leistung (orange-strichlierte Linie) ebenfalls in den folgenden Grafiken dargestellt.

Allgemein kann gesagt werden, dass der Leistungsbereich der Wärmepumpe umso besser mit dem Heizleistungsbedarf des Gebäudes übereinstimmt, je häufiger die gemessene «WP-Leistung» (rote Punkte) exakt den «Heizleistungsbedarf» des Gebäudes (grün-strichlierte Linie) treffen, da in diesem Fall ein taktfreier Betrieb möglich ist.

Anlage F011

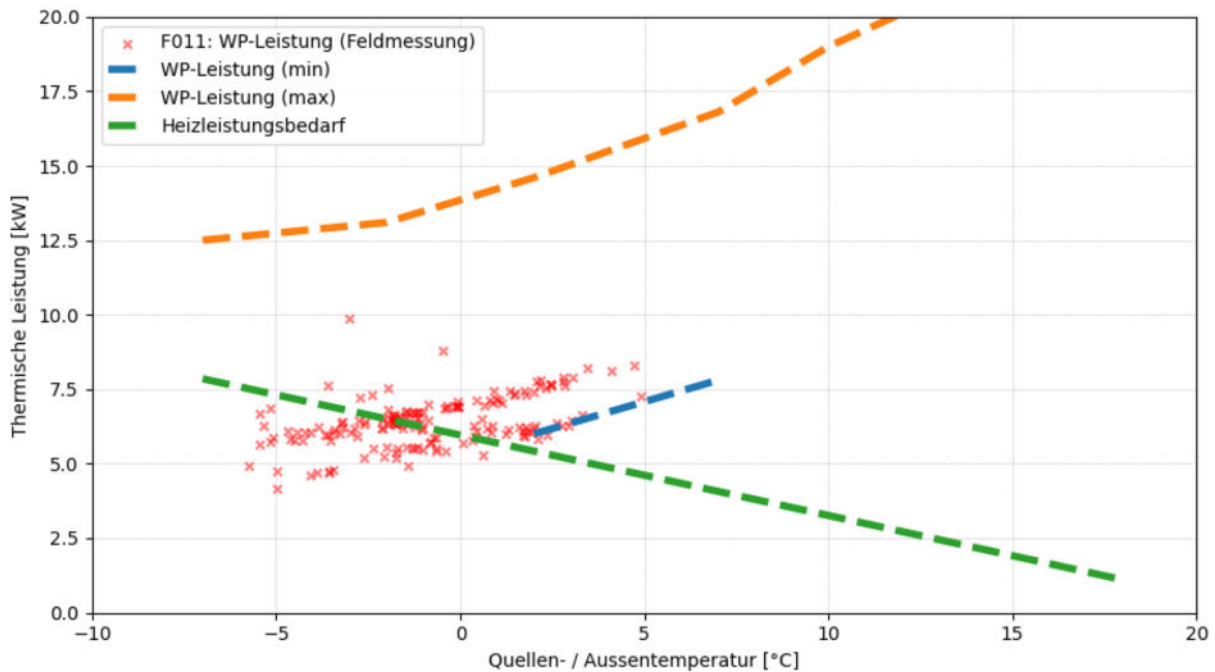


Abbildung 37: Zur detaillierteren Betrachtung des Betriebsverhaltens der Leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen wird die Heizleistung der Wärmepumpe in Funktion der Quellen-, bzw. Aussentemperatur als Stundenwerte (Kriterium: Betriebszeit WP = 1h/h) dargestellt. Zusätzlich dazu sind der Heizleistungsbedarf (grün) und Leistung der Wärmepumpe, minimal (blau) und maximal (rot), dargestellt. Bei dieser Anlage fallen die zwei Leistungsebenen auf. Bei Punkten der unteren Ebene war innerhalb des Stundenmittelwertes eine Abtauung enthalten (negative Leistung), weshalb die gemittelte Heizleistung tiefer wird. Bei dieser Wärmepumpe ist die Minimalleistung im Datenblatt nur für A2 und A7 angegeben. Am Auslegepunkt (linkes Ende der grünen Linie) wäre die Wärmepumpe nur zu 60% ausgelastet, also 66% überdimensioniert. Je mehr rote kreuze sichtbar sind, umso häufiger betrug die Laufzeit mind. eine Stunde am Stück in der Heizsaison 22/23.

In Abbildung 39 zur Anlage F011 wird die gemessene Leistung dem Leistungsbereich aus dem Datenblatt und dem Heizleistungsbedarf gegenübergestellt. Auf den ersten Blick ist erkennbar, dass die roten Punkte tendenziell am unteren Rand angesiedelt sind und praktisch gar nicht mit dem Heizleistungsbedarf übereinstimmen. Zusätzlich dazu sind zwei Leistungsebenen zu erkennen. Dies hat mit der Abtauung zu tun. Der Verdichter läuft beim Umschalten vom Heizbetrieb in den Abtaubetrieb weiter. Daher wird die Abtauleistung negativ mit der Heizleistung summiert. Somit ist bei Stunden mit Abtauung die Heizleistung kleiner («untere Linie»). Ansonsten wird diese Anlage häufig an ihrer minimalen Leistungsgrenze betrieben, was für die Effizienz nachteilig ist. Diese Anlage ist am Auslegepunkt 66% überdimensioniert.

Anlage F012

In Abbildung 40 zur Anlage F012 wird ebenfalls wie in Abbildung 39 die gemessene Leistung dem Leistungsbereich aus dem Datenblatt und dem Heizleistungsbedarf gegenübergestellt. Bei F012 sieht man, dass ein grösserer Teil der Betriebsstunden innerhalb des Regelbereichs der Wärmepumpen verteilt ist und besser mit dem Heizleistungsbedarf übereinstimmt. Der Regelbereich wird bei Anlage F012 somit besser genutzt. Auffällig ist hier jedoch die grosse Streuung. Dies hängt mit verhältnismässig häufigem Takten zusammen (regelungstechnisch bedingt), was bisher noch nicht weiter untersucht wurde. In Abbildung 39 ist dieses Taktverhalten anhand der farblich dargestellten Heizleistung über die Zeit eindeutig zu erkennen.

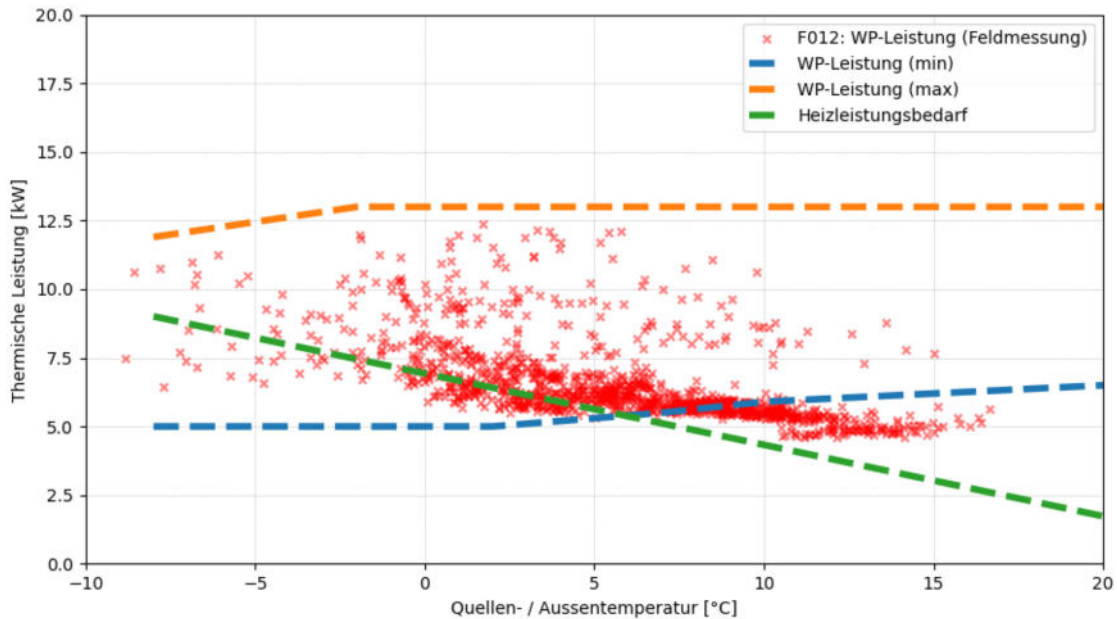


Abbildung 38: Zur detaillierteren Betrachtung des Betriebsverhaltens der Leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen wird die Heizleistung der Wärmepumpe in Funktion der Quellen-, bzw. Aussentemperatur als Stundenwerte (Kriterium: Betriebszeit WP ≥ 1 h/h) dargestellt. Zusätzlich dazu sind der Heizleistungsbedarf (grün) und Leistung der Wärmepumpe, minimal (blau) und maximal (rot), dargestellt. Bei dieser Anlage fallen die hohen, gestreuten Betriebspunkte auf. Dies hängt mit der Leistungsregelung zusammen (siehe Abbildung 41). Am Auslegepunkt (linkes Ende der grünen Linie) wäre die Wärmepumpe nur zu 75% ausgelastet, also 32% überdimensioniert. Je mehr rote kreuze sichtbar sind, umso häufiger betrug die Laufzeit mind. eine Stunde am Stück in der Heizsaison 22/23. Schön zu sehen ist die Verdichtung der Betriebsstunden um den Heizleistungsbedarf und um die Minimalleistung herum.

Jedes Rechteck in Abbildung 39 stellt die thermische Leistung der Anlage F012 je Kalenderstunde im Januar 2023 dar. Die klaren Grenzen zwischen den einzelnen Stunden zeigen, dass die Wärmepumpe sehr unterschiedliche Leistungen liefert. Bei einem optimalen Betrieb würden die Farben der einzelnen Stunden ineinander übergehen.

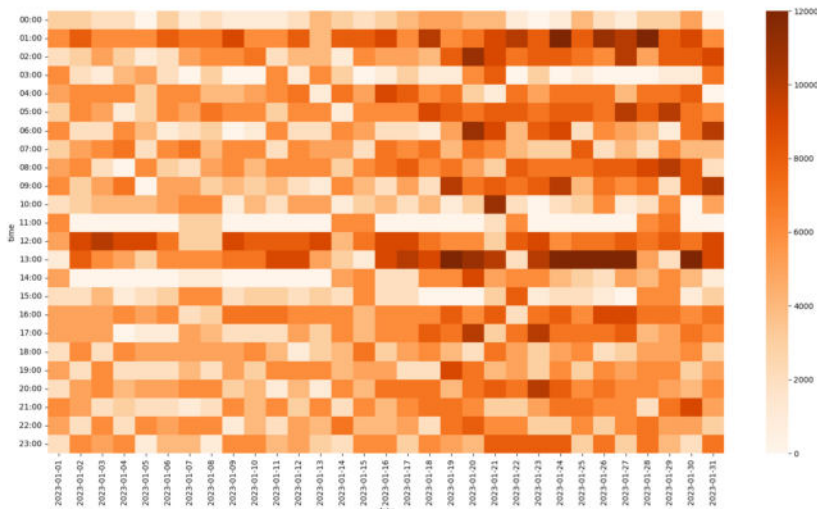


Abbildung 39: Heatmap der thermischen Leistung zur Anlage F012 im Januar 2023. Auf der Y-Achse ist die Tagesstunde und auf der X-Achse der Tag dargestellt. Je besser die Farben vertikal ineinanderfliessen, umso konstanter die Regelung. Hier zeigt sich eher das Gegenteil. Mit jeder Stunde ändert sich die Leistung (Mosaik-Bild).

Anlage F017

In Abbildung 42, Anlage F017, zeigen sich ebenfalls die zwei Leistungsebenen von «Heizbetrieb mit...», bzw. «...ohne Abtauung» (ähnlich zu Abbildung 39, Anlage F011). Bei F017 ist eindeutig zu sehen, dass bereits bei ca. -3°C die minimale Drehzahl der WP erreicht wird und sich bei höheren Aussentemperaturen ein Taktbetrieb einstellt. Dieser Schnittpunkt sollte zwischen 5 und 15°C liegen. Es stellt sich damit automatisch die Frage, ob seit dem Einbau der Wärmepumpe auch der Heizleistungsbedarf durch Sanierungen reduziert wurde, ob die Dimensionierung ausreichend seriös vorgenommen wurde, ob die Hilfestellungen und Normen nicht zum richtigen Ergebnis führen oder ob keine passendere Wärmepumpe vorhanden war. Diese Fragen können nicht direkt aus den Messdaten beantwortet werden. Dazu müsste mehr über die Planung bekannt sein. Diese Informationen liegen in diesem Projekt jedoch nicht vor.

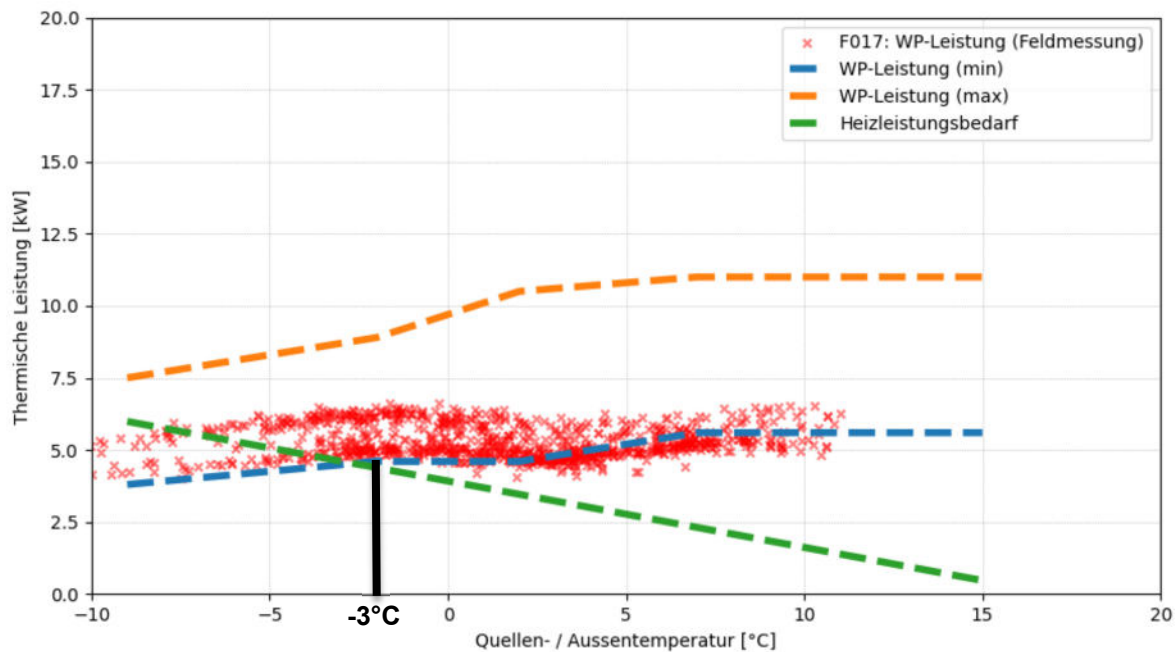


Abbildung 40: Zur detaillierteren Betrachtung des Betriebsverhaltens der Leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen wird die Heizleistung der Wärmepumpe in Funktion der Quellen-, bzw. Aussentemperatur als Stundenwerte (Kriterium: Betriebszeit WP $\geq 1\text{h/h}$) dargestellt. Zusätzlich dazu sind der Heizleistungsbedarf (grün) und Leistung der Wärmepumpe, minimal (blau) und maximal (rot), dargestellt. Bei dieser Anlage fallen die zwei Leistungsebenen auf. Bei der unteren Ebene ist auch hier die Abtauleistung negativ enthalten und die Heizleistung daher tiefer. Am Auslegepunkt (linkes Ende der grünen Linie) wäre die Wärmepumpe nur zu 80% ausgelastet, also 25% überdimensioniert. Je mehr rote kreuze sichtbar sind, umso häufiger betrug die Laufzeit mind. eine Stunde am Stück in der Heizsaison 22/23. Auch hier ist die Häufung um die Minimaleistung der WP markant. Ab einer Aussen- bzw. Quellentemperatur von über -3°C liefert die Wärmepumpe eine höhere Leistung als benötigt.

Da der Schnittpunkt zwischen Minimaleistung und Heizleistungsbedarf bei dieser Anlage bereits sehr früh erfolgt, schöpft diese Anlage ihr volles Potential bezüglich der Effizienz nicht aus. Wie gross jedoch die Effizienzeinbussen sind, kann aus den Messdaten nicht ermittelt werden. Für diese Anlage wurde in Abbildung 43 jedoch grafisch angeschaut, ob eine kleinere Wärmepumpe aus der gleichen Baureihe ausgereicht hätte. Diese ist mit den durgezogenen Linien in Abbildung 43 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die kleinere WP, genannt «alternative WP», hier sehr gut gepasst hätte und der Regelbereich besser genutzt werden könnte (Verschiebung des Regelbereichs von -3°C auf $+5^{\circ}\text{C}$ [Abbildung 43], was den Grossteil der Stunden abdeckt [Abbildung 44]).

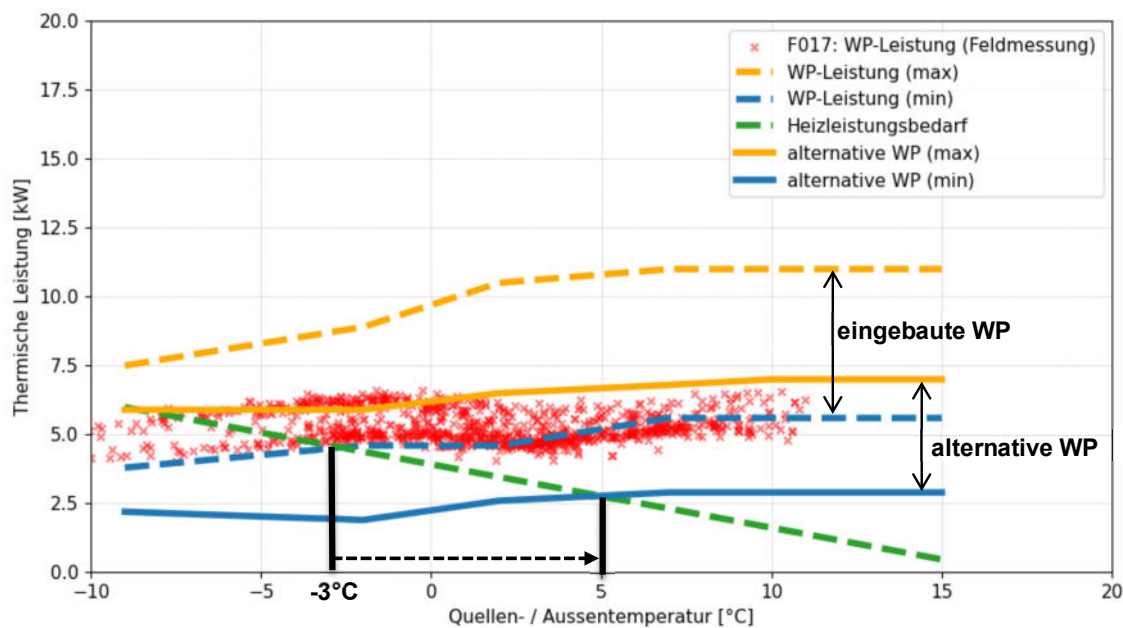


Abbildung 41: selbes Diagramm wie bei Abbildung 42. Zusätzlich dazu wurde der Leistungsbereich einer kleineren Wärmepumpe aus derselben Baureihe dargestellt, welche besser auf den Leistungsbedarf des Gebäudes passen würde. Mit der kleineren Wärmepumpe würden mehr Betriebsstunden im effizienteren Drehzahlbereich anfallen und dadurch die Effizienz steigen und der elektrische Energiebedarf sinken.

In Abbildung 44 werden die Anzahl Betriebsstunden unterhalb der jeweiligen Quellentemperatur aufsummiert dargestellt. Wie bereits erwähnt sind wenige Stunden unter einer Quelleneintrittstemperatur von -3°C . Im Durchschnitt sind es ca. 310h pro Jahr, also weniger als 15%. In gewissen Jahren gibt es sogar keine Stunden unterhalb dieser Temperatur. Diese Wärmepumpe befindet sich somit 85% der Zeit in einem Taktbetrieb. Die kleinere WP würde ca. 85% der Laufzeit innerhalb des Regelbereichs betrieben werden können. Mit einer kleineren WP wäre auch der Betrieb öfter im effizienteren Drehzahlbereich des Verdichters, was zu einer generellen Effizienzverbesserung und damit zu einem geringeren Strombedarf führen würde.

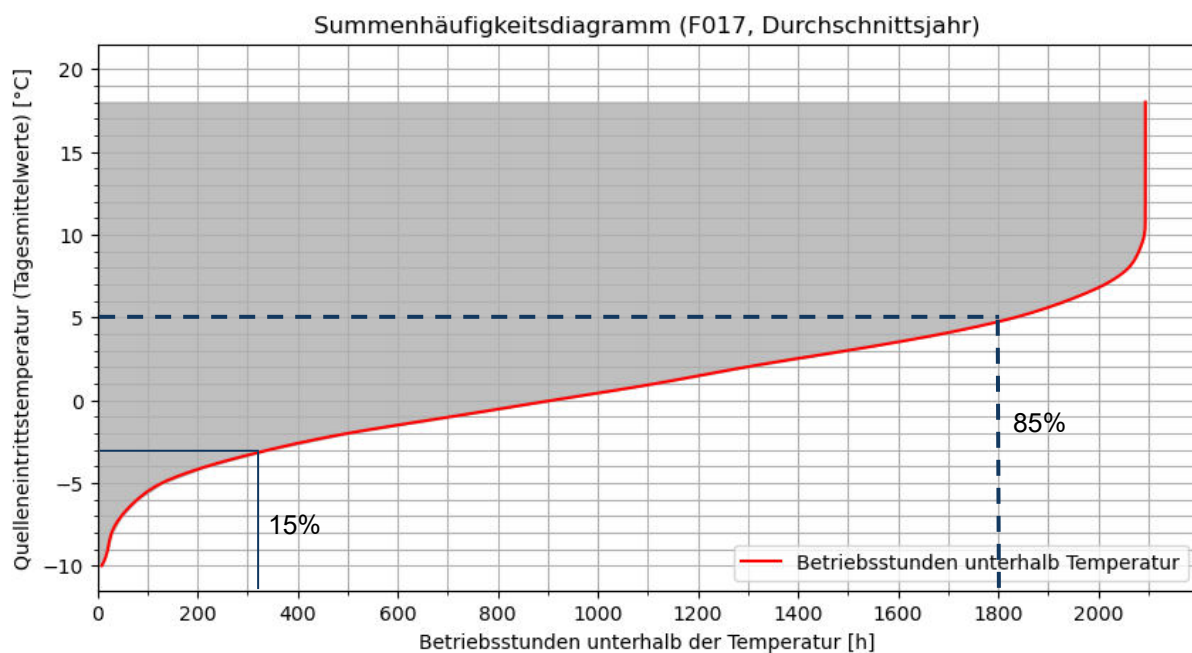


Abbildung 42: Mithilfe des Summenhäufigkeitsdiagramm können die Betriebsstunden unterhalb der jeweiligen Quelleneintrittstemperatur dargestellt werden. Die beiden eingezeichneten blauen Linien bilden das Erreichen der Minimalleistung die beiden in Abbildung 43 dargestellten Wärmepumpen ab. Die kleinere Wärmepumpe könnte 85% der Heizbetriebsstunden mit der Leistung innerhalb des Regelbereichs variieren. Die verbaute Wärmepumpe nur 15%.

3.6 Dimensionierungsanalyse am Auslegepunkt

Für die meisten Anlagen konnte die WP-Leistung nur im Auslegepunkt (SIA2028) aus den Datenblättern ermittelt werden. Für nicht leistungsgeregelte WPs ist diese Betrachtung ausreichend. Die Analyse der vier Luft/Wasser Inverter-Anlagen mit ausführlichen Datenblättern zeigt, dass auch dort eine Betrachtung am Auslegepunkt eine Aussage zur Dimensionierung zulässt, da der Regelbereich kleiner ist als die Variation des Leistungsbedarfs. Bei leistungsgeregelten Sole/Wasser-Wärmepumpen variiert die Wärmequellentemperatur nur wenig und der Regelbereich des Verdichters kann besser ausgenutzt werden. Daher ist bei diesen Anlagen eine Betrachtung nur beim Auslegepunkt teilweise nicht aussagekräftig genug. Daher wurde noch die minimale Leistung (bei TQ) dem jeweiligen Datenblatt entnommen.

In der Übersichtstabelle auf der nächsten Seite sind alle Anlagen nach Typ sortiert. Die relevanten Temperaturen und Leistungen, sowie die ermittelte Abweichung der WP-Leistung zum Leistungsbedarf (absolut und relativ) werden dargestellt.

Tabelle 5: Übersichtstabelle zur Dimensionierungsanalyse

Anlage	Kategorie	Sanierung	T _{AP} [°C]	T _Q [°C]	T _{VL} (AP) [°C]	Leistung WP max (TVL, TAP, TQ) [kW]	Leistung WP min (TVL, TAP, TQ) [kW]	Leistungsbedarf* H+WW (AP) [kW]	Überdim. in Prozent [Bedarf vs. WP] (f _ü)	Stunden pro Start [h/1]	Mittelwert
F008	LW fix	SA	-8	-8	38	6.60	6.60	8	-18%	0.4	34%
F005	LW fix	NB	-8	-8	39	6.70	6.70	5.2	29%	0.6	
F001	LW fix	NB	-8	-8	35	7.00	7.00	5.4	30%	0.6	
F020	LW fix	SA	-7	-7	38	9.90	9.90	5.1	94%	0.3	
F015	LW inv	SA	-7	-7	30	4.50		3.9	15%	1.2	56%
F023	LW inv	SA	-7	-7	38	12.00		10.3	17%	3.7	
F017	LW inv	SA	-9	-9	34	7.50	3.50	6	25%	0.5	
F012	LW inv	SA	-8	-8	55	11.90	5.70	9	32%	1.4	
F016	LW inv	SA	-8	-8	47	14.00	5.50	9.2	52%	1.0	
F011	LW inv	SA	-7	-7	43	12.70	5.10	7.8	63%	0.4	
F003	LW inv	SA	-8	-8	45	13.80	6.10	8.3	66%	1.3	
F025	LW inv	NB	-8	-8	37	10.50	2.50	5.3	98%	0.5	
F024	LW inv	SA	-7	-7	43	9.70	4.10	4.1	137%	0.8	
F007	SW fix	SA	-7	5	47	11.50	11.50	9.2	25%	0.9	55%
F010	SW fix	SA	-8	6	34	11.50	11.50	7	64%	0.4	
F019	SW fix	SA	-8	6	50	11.50	11.50	6.6	74%	0.7	
F013	SW inv	SA	-7	3	35	6.50	1.40	7	-7%	11.2	34%
F021	SW inv	SA	-9	3	34	6.10	2.10	5.8	5%	7.3	
F006	SW inv	SA	-9	-3	59	12.00	2.00	10.3	17%	3.0	
F014	SW inv	SA	-7	0	41	5.70	1.30	4.2	36%	12.5	
F004	SW inv	SA	-8	5	46	14.90	3.00	10.3	45%	4.1	
F022	SW inv	SA	-8	5	41	22.00	11.30	14.5	52%	0.6	
F002	SW inv	NB	-8	4	34	16.00	2.50	8.4	90%	1.1	

Legende

- gute Datenblätter (sehr viele Informationen)
- normale Datenblätter (genügende Informationen)
- ungenügende Datenblätter (zu wenig Informationen)



$$f_{\bar{u}} = \frac{P_{th,WP} - P_{th,Bedarf}}{P_{th,Bedarf}}$$

$$\text{Überdimensionierung in Prozent} = f_{\bar{u}} = \frac{P_{th,WP} - P_{th,Bedarf}}{P_{th,Bedarf}} = \frac{P_{th,WP}}{P_{th,Bedarf}} - 1$$

Die Dimensionierung von Wärmepumpen für Mehrfamilienhäuser und Gewerbebauten wurde in der Studie OptiPower (Bosshard, et al., 2023) bereits weitreichend untersucht. Bei den untersuchten Mehrfamilienhäusern liegt die Überdimensionierung im Median bei 40%. Bei den Einfamilienhäusern in den Feldmessungen liegt der Median bei 36% und der Mittelwert bei 45%. Die statistische Relevanz ist jedoch nicht sehr gross, da die Stichprobe mit 22 Anlagen eher klein ist. In den Untersuchungen der FAWA (Ehrbar, Hubacher, & Erb, 2004) wurde ebenfalls eine Überdimensionierung von rund 40% festgestellt. Gemäss dem Suissetec Merkblatt für Inverter-Wärmepumpen (Suissetec, Technische Kommission Heizung, 2022) soll eine minimale Auslastung der Inverter-WP von 75% (am Auslegepunkt) nicht unterschritten werden, was einer Überdimensionierung von 33% entspricht.

Anlage	Kategorie	Sanierun	T _{AP} [°C]	T _Q [°C]	T _{VL} (AP) [°C]	Leistung WP max (TVL, TAP, TQ) [kW]	Leistung WP min (TVL, TAP, TQ) [kW]	Leistungsbedarf* H+WW (AP) [kW]	Überdim. in Prozent [Bedarf vs. WP] (f _ü)	Stunden pro Start [h/1]	Mittelwert
		g									
		Neuba									
F008	LW fix	SA	-8	-8	38	6.60	6.60	8	-18%	0.4	
F005	LW fix	NB	-8	-8	39	6.70	6.70	5.2	29%	0.6	34%
F001	LW fix	NB	-8	-8	35	7.00	7.00	5.4	30%	0.6	
F020	LW fix	SA	-7	-7	38	9.90	9.90	5.1	94%	0.3	
F015	LW inv	SA	-7	-7	30	4.50	4.50	3.9	15%	1.2	
F023	LW inv	SA	-7	-7	38	12.00	12.00	10.3	17%	3.7	
F017	LW inv	SA	-9	-9	34	7.50	3.50	6	25%	0.5	
F012	LW inv	SA	-8	-8	55	11.90	5.70	9	32%	1.4	
F016	LW inv	SA	-8	-8	47	14.00	5.50	9.2	52%	1.0	56%
F011	LW inv	SA	-7	-7	43	12.70	5.10	7.8	63%	0.4	
F003	LW inv	SA	-8	-8	45	13.80	6.10	8.3	66%	1.3	
F025	LW inv	NB	-8	-8	37	10.50	2.50	5.3	98%	0.5	
F024	LW inv	SA	-7	-7	43	9.70	4.10	4.1	137%	0.8	
F007	SW fix	SA	-7	5	47	11.50	11.50	9.2	25%	0.9	55%
F010	SW fix	SA	-8	6	34	11.50	11.50	7	64%	0.4	
F019	SW fix	SA	-8	6	50	11.50	11.50	6.6	74%	0.7	
F013	SW inv	SA	-7	3	35	6.50	1.40	7	-7%	11.2	
F021	SW inv	SA	-9	3	34	6.10	2.10	5.8	5%	7.3	
F006	SW inv	SA	-9	-3	59	12.00	2.00	10.3	17%	3.0	
F014	SW inv	SA	-7	0	41	5.70	1.30	4.2	36%	12.5	34%
F004	SW inv	SA	-8	5	46	14.90	3.00	10.3	45%	4.1	
F022	SW inv	SA	-8	5	41	22.00	11.30	14.5	52%	0.6	
F002	SW inv	NB	-8	4	34	16.00	2.50	8.4	90%	1.1	

Legende

- gute Datenblätter (sehr viele Informationen)
- normale Datenblätter (genügende Informationen)
- ungenügende Datenblätter (zu wenig Informationen)

$$f_u = \frac{P_{th,WP} - P_{th,Bedarf}}{P_{th,Bedarf}}$$



3.7 Dimensionierungstools

Es stellt sich generell die Frage, ob bei der Planung überhaupt zu erkennen ist, dass eine mögliche Überdimensionierung und damit verbundene Mehrkosten drohen. Dazu müsste man die Berechnungsunterlagen und den Informationsstand bei der Dimensionierung kennen, was im Nachhinein schwierig ist, da die betreffenden Unterlagen oftmals nicht verfügbar oder teilweise nicht vorhanden sind.

Wie in OptiPower angemerkt wird, führt die Auslegung nach Norm SIA384.201 bei Neubauten schon zu einer deutlichen Überdimensionierung. Bei Sanierungen wird der Leistungsbedarf meist anhand des Energiebedarfs, bzw. Brennstoffbedarfs berechnet. Suissetec stellt in Zusammenarbeit mit der FWS ein Berechnungstool zur Verfügung (). Im Feldmessprojekt sind der Energiebedarf, die Heizgradtage (HGT) sowie der Leistungsbedarf gemessen, bzw. für den Auslegepunkt ermittelt. Daher kann die Dimensionierung der Anlagen nachträglich nochmals berechnet werden. Dazu wurde dieselbe Berechnungsmethode verwendet wie im Berechnungstool der FWS/Suissetec (Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz).

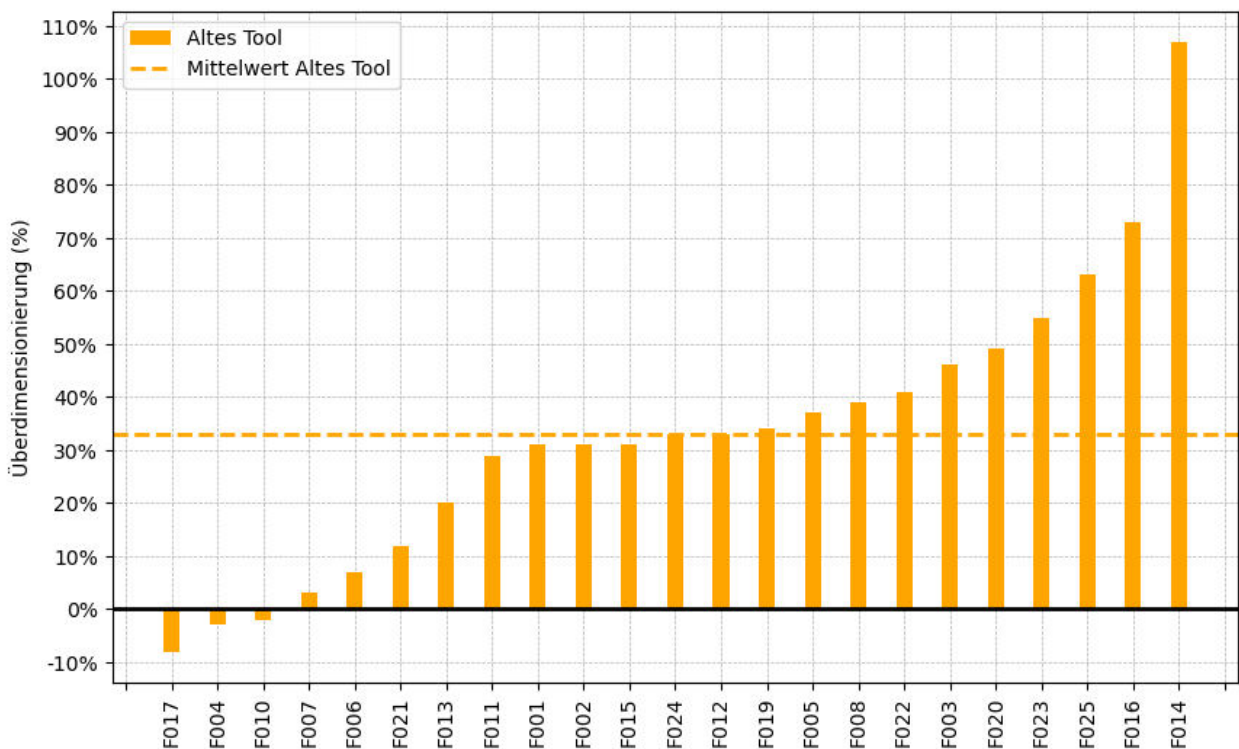


Abbildung 43: Mit den zur Verfügung stehenden Berechnungstools und Berechnungshilfen wurde die Dimensionierung der Wärmepumpen anhand des im Feldmessprogramm gemessenen Energiebedarfs mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Das bestehende Berechnungstool (FWS/Suissetec) führt bei 20 Anlagen zu einer Überdimensionierung. Die mittlere Überdimensionierung liegt bei 33% (gestrichelte Linie).

Die Auslegung mit dem Berechnungstool führt teilweise zu Überdimensionierungen und in drei Fällen auch zu geringen Unterdimensionierungen. Im Mittel beträgt die Überdimensionierung im Anlagensample 33%. Die betrachteten Anlagen sind nicht zwingend repräsentativ für den Gebäudepark der Schweiz.

Eine andere Berechnungsmethode wird im Anhang C der 2022 erneuerten SIA-Norm 384-1 beschrieben. Aktuell wird die Angleichung des Berechnungstools Suissetec/FWS an die neue Norm geprüft. Gemäss Figur 11 im Anhang C der SIA-Norm 384-1, ist immer mit Abweichungen zu rechnen, daher ist das Ergebnis der Analyse des Berechnungstools nicht überraschend.

Die Berechnung anhand der in SIA 384-1 beschriebenen Methode führt je nach gewähltem Faktor ebenfalls zu Über- bzw. Unterdimensionierungen. Die Faktoren m50% und m90% geben Aufschluss darüber, bei wie vielen Anlagen eine Über- bzw. Unterdimensionierung zu erwarten ist. Beispielsweise bedeutet der Faktor m50%, dass bei dessen Verwendung etwa die Hälfte der Anlagen überdimensioniert und die andere Hälfte unterdimensioniert wären. Bei m90% wären dann 90% der Anlagen überdimensioniert. In nachfolgendem Diagramm sind die Dimensionierungsergebnisse der alten und der neuen Berechnungsmethode dargestellt.

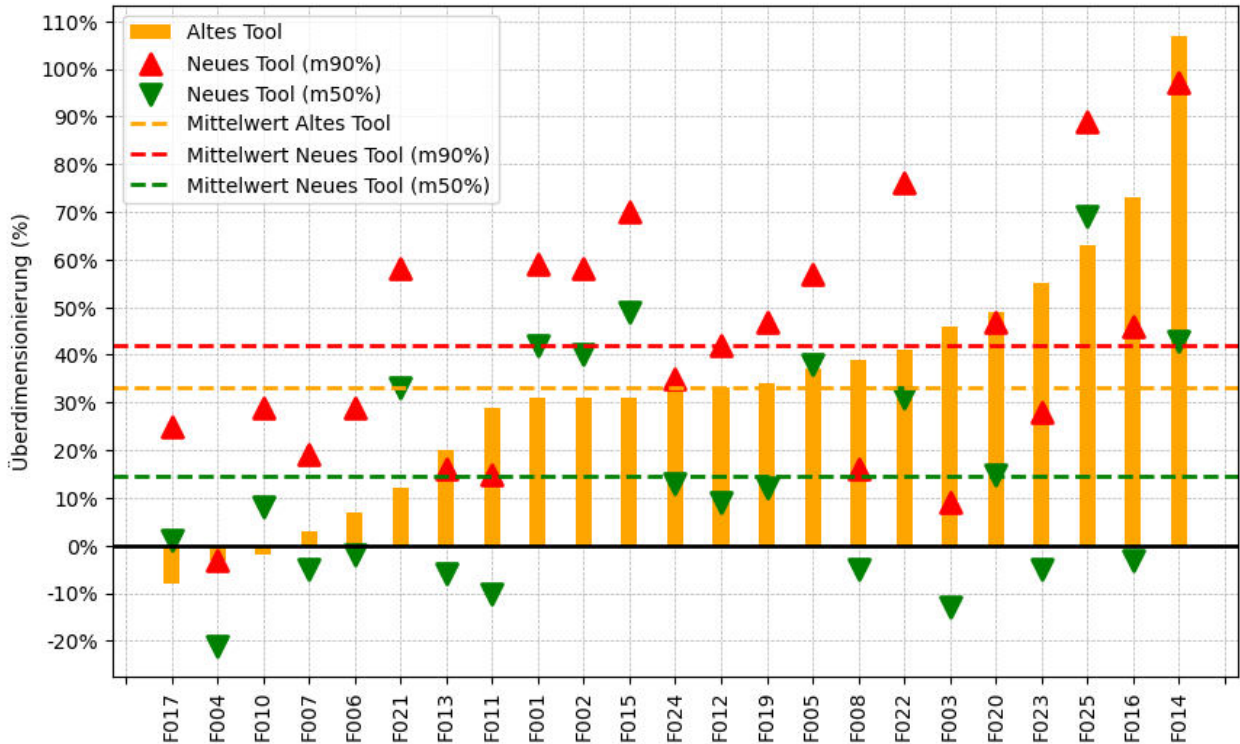


Abbildung 44: Mit den zur Verfügung stehenden Berechnungstools und Berechnungshilfen wurde die Dimensionierung der Wärmepumpen anhand des im Feldmessprogramm gemessenen Energiebedarfs mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Als Vergleich zum aktuell gängigen Berechnungstool wird eine in der SIA 384-1, Anhang C beschriebene Berechnungsmethode verwendet. Mit dem Faktor m90% (rot) liegt die Überdimensionierung wesentlich höher als mit dem gängigen Auslegetool, mit m50% wesentlich tiefer. Wobei die Unterdimensionierten Anlagen ebenfalls betrachtet werden müssen.

In obigem Diagramm werden die verschiedenen Ansätze einander gegenübergestellt. Die neue Methode mit dem Faktor m50% (grüne Dreiecke) führt beim betrachteten Anlagensample im Mittel zu einer geringeren Überdimensionierung (14%). Mit dem Faktor m90% (rote Dreiecke) aber zu einer grösseren Überdimensionierung (42%). Der Faktor m90% führt nicht nur zu mehr überdimensionierten Anlagen, sondern im Mittel auch zu einer grösseren Überdimensionierung. Keine der Berechnungsmethoden führt aktuell zu einer korrekten Dimensionierung aller untersuchten Anlagen. Inwiefern die Dimensionierung durch Einbezug weiterer Gebäudeinformationen verbessert werden kann, sollte geprüft und wenn möglich daraus eine verbesserte Methodik vorgeschlagen werden.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

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

Die Feldmessungen erfolgen durch eine SPS mit einem Abtastintervall von 100ms. Die Auswertung erfolgt über die gespeicherten 10s-Mittelwerte.

Durch die Auswertungen in dieser Studie wurde folgende Optimierungspotentiale auf Seiten der Regel- und Steuerungstechnik identifiziert:

- Heiz-Vorlauftemperaturen optimieren (Heizkennlinie optimieren)
 - *Vorlauftemperatur kann in den meisten Fällen reduziert werden*
- Heizen an Sommertagen vermeiden (zum Teil auch an Tagen mit $T_{AVG} > 25\text{ °C}$)
 - *Heizgrenzen korrekt einstellen*
- Heizen und Kühlen am gleichen Tag, etc. verhindern
 - *Heiz- sowie Kühlgrenzen korrekt einstellen*
- TWW-Aufbereitung: WP-Vorerwärmung bei Legionellenschaltungen
 - *Vorerwärmung mittels WP und nur soweit nötig mit Heizstab*
- TWW-Aufbereitung: Auflade-Zeitpunkt bei LWWP bei hoher Umgebungstemperatur
 - *Nachmittagsstunden bieten die höchste mittlere Aussentemperatur*

Obwohl die Heizsaison 2022/23 etwas milder als die vorherige Heizsaison ist, blieb die Effizienz bzw. Wärmenutzungsgrade (WNG) der Wärmepumpenanlagen praktisch unverändert. Bei einigen Anlagen konnten jeweils einzelne Verbesserungen festgestellt werden, welche in Kapitel 2 dokumentiert sind. Bei zwei Anlagen konnte durch Senkung der Vorlauftemperatur die Effizienz um über 10% gesteigert werden, ohne dabei den Komfort zu verändern. Ein Wärmepumpen-Einsatz im Altbau erweist sich als gut möglich und effizient. Sowohl mit Luft/Wasser- als auch mit Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Die JAZ+, also die Gesamtbetriebseffizienz, liegt bei LWWP zwischen 3.1 und 4.2, mit einem Mittelwert von 3.4. Bei SWWP bewegt sich die JAZ+ zwischen 2.9 und 5.9 und der Mittelwert liegt bei 4.6. Die Effizienz der Trinkwarmwasseraufbereitung hat sich im Vergleich zum Vorjahr ebenfalls kaum geändert. Die JAZ+_Aufladung bei LWWP liegt zwischen 2.5 und 3.9, wobei der Mittelwert 2.9 beträgt. Bei SWWP bewegt sich die JAZ+_Aufladung zwischen 1.8 und 4.4 und der Mittelwert liegt bei 3.4. Generell sind SWWP durch die höhere durchschnittliche Quelltemperatur Effizienter als LWWP.

Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen lag in dieser Heizsaison die mittlere Quelltemperatur im WP-Betrieb bei 5.1°C, im Heizbetrieb bei 4.4 °C. Die Jahresmittelwerte der Quelltemperaturen im Heizbetrieb schwanken zwischen 1.9 °C bei Objekt F017 und 7.1°C bei Objekt F003.

Demgegenüber liegt der Mittelwert im WP-Betrieb bei Erdwärmesonden-Wärmepumpen bei 8.7°C, im Heizbetrieb bei 8.5°C. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die Bandbreite der mittleren Quelltemperatur höher: Diese liegt zwischen 2.3 °C bei Objekt F006 und 11.0 °C bei Objekt F028.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen kann eine saisonale Abkühlung, bzw. Regeneration der Solemitteltemperatur im Jahresverlauf wie erwartet gemessen werden. Eine irreversible Abkühlung (Permafrost um die EWS) kann bisher bei keiner Anlage festgestellt werden. Eine Anlage befindet sich jedoch im «unterkühlten» Zustand. Bei dieser Anlage (Baujahr 1994) wird eine Regeneration der Erdwärmesonde empfohlen, um ein Einfrieren auszuschliessen. Eine weitere Anlage aus den 90er Jahren befindet sich an der Grenze zum «unterkühlten» Zustand und sollte daher überwacht werden. Alle neueren Erdwärmesonden sind in einem «normalen» oder «langzeitstabilen» Zustand. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der spezifischen Belastung der Erdwärmesonden (EWS) und der minimalen Quellenmitteltemperatur anhand von Messdaten aufgezeigt werden.

Durch vertiefte Analyse der WP-Leistung und dem Heizleistungsbedarf konnte die Dimensionierung der gemessenen Anlagen überprüft werden. Die Anlagen des Feldmessprogramms sind im Median 36% überdimensioniert. Wobei nach Kategorie der Wärmepumpe unterschieden werden muss. Leistungsgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen mit einem Mittelwert von 56% (Median 52%) die grösste Überdimensionierung aus. Teilweise werden diese leistungsgeregelten Wärmepumpen beinahe ausschliesslich an der Minimalleistung betrieben, was die Effizienz negativ beeinflusst.

Mögliche Gründe für die Überdimensionierung sind:

- "keine" passende WP im Katalog des Lieferanten verfügbar
 - o Mögliche Lösung: mehrere Lieferanten vergleichen
- Fehlerhafte Bestimmung des Leistungsbedarfs durch...
 - o unzureichende Berechnungsgrundlagen (fehlerhafte Angaben)
 - o unsachgemässe Berechnung
 - o normative Vorgaben ungenügend
 - o unnötige Sicherheitszuschläge
- Ungenügende Genauigkeit der Dimensionierungsgrundlagen

In den Analysen der Berechnungstools für die Ermittlung der Heizleistung bei Sanierungen hat sich gezeigt, dass diese teilweise zu wesentlichen Überdimensionierungen (Mittelwert 33%) und teilweise aber auch zu Unterdimensionierungen führen können. Sowohl mit der Methode gemäss FWS/Suissetec als auch mit der Methode nach SIA, wobei bei der SIA-Methode zwei verschiedene Berechnungsfunktionen vorgeschlagen werden die zu unterschiedlichen Resultaten führen (Mittelwert 14%, bzw. 42% überdimensioniert).

4.1 Veröffentlichungen / Seminare / Weiterbildung

Im vergangenen Jahr wurden mehrere Vorträge und Weiterbildungen gehalten:

- «Wärmepumpen - praktische Erfahrungen», Vortragsreihe FASZINATION ENERGIE (10.11.2022)
- «Update Feldmessungen», Wärmepumpen-Fachkolloquium an der FH OST Buchs (03.10.2023)
- «Felderfahrungen mit Wärmepumpen in der Schweiz: Verbesserungspotentiale und zukünftige Entwicklungen», Energieforschungsgespräche Disentis (27.01.2023)
- «Felderfahrungen mit Wärmepumpen», bulletin.ch (27.10.2023)

Seit 2020 werden vorwiegend kleinere Mehrfamilienhäuser mit einer Heizlast von ca. 20-30 kW in die Messkampagne aufgenommen. Objekt F026 ist mit 44 Bewohnern und einer Energiebezugsfläche von 4270 m² ein sehr grosses Objekt, welches seit der Heizperiode 2021/22 gemessen wurde und bildet die Ausnahme.

5. Literaturverzeichnis

Autor, A. (Jahr). *Titel*. Ort: Verleger.

- BFE, Bundesamt für Energie. (2022). *Betriebsoptimierung Heizung: Heizkurve einstellen*. Bern: BFE, Bundesamt für Energie.
- Bosshard, I., Troxler, M., Guliyeva, A., Klevitz, K., Haller, M., Meier, C., Hollmüller, P. (2023). *OptiPower*. Bern: Bundesamt für Energie BFE.
- Bundesamt für Statistik. (30. 10 2023). *Eidg. Gebäude- und Wohnungsregister (GWR)*. Von <https://www.housing-stat.ch/de/query/adrtogid.html> abgerufen
- Ehrbar, M., Hubacher, P., & Erb, M. (2004). *FAWA-Schlussbericht BFE: Feldanalysen von Wärmepumpenanlagen FAWA, 1996-2003*. Bern: Bundesamt für Energie.
- EnergieSchweiz. (2022). *Photovoltaik Eigenverbrauch*. Von https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/spf/forschung/projekte/solenev-ech-merkblatt-pv-eigenverbrauch-de.pdf abgerufen
- Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz. (kein Datum). Heizungsersatz mit Wärmepumpen, Beschreibung zur Berechnung des Heizleistungsbedarfs. Abgerufen am 31. 10 2023 von <https://www.wp-systemmodul.ch/files/Downloads%20DE/Installateure-2021/Tool-Beschrieb-zur-Berechnung-des-Heizleistungsbedarfs-20160113.pdf>
- Kriesi, R. (2017). *Analyse von Erdwärmesondenanlagen*. Bern: EnergieSchweiz.
- Suissetec, Technische Kommission Heizung. (2022). *Wärmepumpen mit Invertern, Merkblatt 8*. Zürich: Suissetec. Abgerufen am 30. 10 2023 von https://suissetec.ch/files/PDFs/Merkblaetter/Heizung/Deutsch/2022_08_MB_Waermepumpen_mit_Invertern_DE_editierbar.pdf

6. Anhang

6.1 Methodik und Messequipment

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