

Jahresbericht, 30. September 2020

Bericht «Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2019/20»



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Manuel Prinzing, OST – Ostschweizer Fachhochschule

Matthias Berthold, OST – Ostschweizer Fachhochschule

Mick Eschmann, OST – Ostschweizer Fachhochschule

Stefan Bertsch, OST – Ostschweizer Fachhochschule

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Projekt: SI/401617-01 und SI/402027-01

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444, www.infoline.energieschweiz.ch

energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch, twitter.com/energieschweiz

Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	6
1 Projektziele	8
1.1 Objektbeschreibungen	8
1.2 Systemgrenzen und Kennzahlen	16
2 Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen	20
2.1 Vergleich der Energiekennziffern (JAZ, WNG, SNG)	20
2.2 Einfluss des Temperaturniveaus.....	21
2.3 Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung	24
2.4 Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage.....	26
2.5 Heizwärmebedarf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe im Jahresverlauf	29
2.6 Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb	32
2.7 Pumpstrombedarf der Erdwärmesonden	34
2.8 Temperaturverlauf der Erdwärmesonden	35
2.9 Kühlen mit Wärmepumpen	37
2.10 Vergleich der Trinkwarmwasser-Wärmepumpen.....	38
3 Optimierungen und Erkenntnisse	39
3.1 Einfluss von Optimierungsmassnahmen auf die Effizienz	40
3.2 Analyse und Bewertung von Einzelobjekten.....	40
4 Schlussfolgerung und Ausblick	44
5 Anhang	46
5.1 Methodik und Messequipment	46

Zusammenfassung

Per 1. September 2020 befinden sich 23 Wärmepumpenanlagen, mehrheitlich in Einfamilienhäuser, in der Feldmessung. 11 Anlagen beziehen die Umweltenergie aus Erdwärmesonden, 12 Anlagen aus der Umgebungsluft. Bei vier Objekten erfolgt die Aufladung des Trinkwarmwassers mit einer separaten Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler).

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

Die in die Feldmessungen aufgenommenen Wärmepumpen stehen in Gebäude an verschiedenen klimatischen Standorten. Die Gebäude unterscheiden sich sowohl bezüglich Gebäudehülle, Wärmeabgabesystem sowie Bewohneranzahl und deren Nutzerverhalten. Alle Wärmepumpen-Anlagen konnten bereits vor den Optimierungsmassnahmen eine Jahresarbeitszahl über 3 erreichen. Der tiefste Wärmenutzungsgrad lag bei 2.8. Bei keiner Anlage wurde ein Heizstab zum Heizen verwendet, auch nicht in der kältesten Periode im Winter 2018.

Der durchschnittlich Wärmenutzungsgrad (WNG) für Heizen und Trinkwarmwasser/Brauchwasser lag in der vergangenen Heizperiode 2019/2020 für Luft/Wasser-Wärmepumpen bei 3.3 (von 3.0 bis 4.1), Sole/Wasser-Wärmepumpen überbieten diese Werte mit durchschnittlich 4.2 (von 3.1 bis 5.1).

Nach über 4 Jahren Feldmessung von Wärmepumpen kann folgendes Zwischenfazit gezogen werden:

- Insgesamt arbeiten Kleinwärmepumpen in der Feldmessung gut
- Wärmepumpen können bei ordentlicher Planung, Installation und Inbetriebnahme fossile Heizungsanlagen auch im Gebäudebestand effizient ersetzen
- Es konnten keine grossen Installationsfehler entdeckt werden
- Sole/Wasser-Wärmepumpen sind bei mittleren Heizungs-Vorlauftemperaturen über 40 % effizienter als Luft/Wasser-Wärmepumpen bzw. die Elektrizitätskosten bei SWWP sind über 40 % geringer als bei LWWP. Der Heizungsregler sollte sorgfältig eingestellt und ggf. nachjustiert werden (Heizgrenze, Heizkurve, Legionellenprogramm mit Vorwärmung durch den Verdichter der Wärmepumpe, etc.)
- Bei der Aufladung und dem Legionellenprogramm für das Trinkwarmwasser ist eine genaue Betrachtung bei der Installation und Inbetriebnahme sowie der Wartung empfehlenswert
- Der Heizwärmebedarf der verschiedenen, von den Wärmepumpen-Anlagen versorgten Gebäude variiert in diesen Feldmessungen von 30 – 182 kWh/m². Der höchste Gesamtwärmebedarf lag bei 209 kWh/m². Trotz des hohen Gesamtwärmebedarfs konnte bei jenem Objekt ein Wärmenutzungsgrad von 3.18 erreicht werden.

Die Kühleffizienz ist beim passiven Kühlen mittels Erdwärmesonden erwartungsgemäss um ca. Faktor 3 grösser als beim aktiven Kühlen mit Verdichterbetrieb. Auch beim Kühlen spielen Kühlgrenzen und Kühlbetriebszeiten eine wichtige Rolle und sollten bei einer allfälligen Aktivierung besser berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Bericht wird sowohl die Effizienz (JAZ, WNG und SNG) als auch der absolute Primärenergiebedarf (E_{Tot}) diskutiert. Insbesondere zu hoch eingestellte Heizgrenzen und ein grosszügiger Warmwasserbezug können zu einer Effizienzverbesserung führen, obwohl sie eigentlich den Energiebedarf erhöhen und die Umweltbilanz verschlechtern. Für eine detaillierte Analyse ist daher immer eine Betrachtung der gesamten Anlage und des Nutzerverhaltens unerlässlich.

Beobachtungen aus der Feldmessung und die getätigten Optimierungsmassnahmen werden in Kapitel 3 dargestellt. Insbesondere die Einstellung der Heizungsregler bietet Potential zur Effi-

zizienzsteigerung. Durch die hochauflösende Datenaufzeichnung der Feldmessung konnten verschiedene Fehlfunktionen der Anlagen festgestellt werden, z.B. ein verkalkter Heizstab, eine permanent hohe Verlustleistung eines Verdichters mit Inverter im Standby und eine Wärmepumpe auf Störung.

Résumé

Au 1^{er} septembre 2020, 23 installations de pompes à chaleur faisaient l'objet d'un suivi in situ. Ces installations se trouvent majoritairement dans des maisons individuelles. Parmi ces 23 installations, onze sont équipées de pompes à chaleur sol/eau, et douze de pompes à chaleur air/eau. Pour quatre installations, la préparation de l'eau chaude sanitaire se fait grâce à une pompe à chaleur séparée (chauffe-eau avec pompe à chaleur intégrée).

Dans un premier temps, l'efficacité des installations durant au moins une saison de chauffage est mesurée. Suite à ça, le fonctionnement des installations est optimisé, puis l'effet de ces optimisations sur leur efficacité est évalué.

Les installations se trouvent dans des bâtiments situés dans des endroits bénéficiant de climats différents. En outre, ces bâtiments se distinguent aussi bien par rapport à la qualité de leur enveloppe, au système de distribution de la chaleur, au nombre d'habitants, qu'au comportement des habitants. Les installations présentaient des coefficients de performance annuels supérieurs à 3 déjà avant les mesures d'optimisation. Le taux d'utilisation de la chaleur le plus bas était de 2,8. Aucune des installations n'a nécessité le recours à une résistance électrique chauffante, même pas durant la période la plus froide de l'hiver 2018.

Le taux moyen d'utilisation de la chaleur (« Wärmenutzungsgrad » ou WNG en allemand), pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, pour les installations avec pompes à chaleur air/eau, se situait à 3,3 pour la saison de chauffage 2019/2020 (avec des valeurs variant de 3,0 à 4,1). Pour les installations avec pompes à chaleur sol/eau, ce taux moyen est nettement supérieur, puisqu'il atteint une valeur de 4,2 (avec des valeurs variant de 3,1 à 5,1).

Après 4 ans de mesures in situ, on peut tirer les conclusions intermédiaires suivantes :

- Dans l'ensemble, ces installations avec petites pompes à chaleur faisant l'objet du suivi in situ, fonctionnent bien.
- Lorsqu'elles sont correctement dimensionnées, installées et mises en service, les pompes à chaleur peuvent contribuer de manière efficace à remplacer les chauffages utilisant les énergies fossiles, dans les bâtiments.
- Aucune erreur majeure n'a pu être relevée au niveau des mises en service.
- Pour des températures aller de chauffage moyennes, les pompes à chaleur sol/eau sont plus de 40% plus efficace que les pompes à chaleur air/eau. En d'autres termes, les coûts d'électricité des pompes à chaleur sol/eau sont plus de 40% plus bas que pour les pompes à chaleur air/eau. La régulation du chauffage doit être correctement réglée, voire même réajustée si nécessaire (limite de chauffage, courbe de chauffe, programme anti-légionelle avec pré-chauffage par le compresseur de la pompe à chaleur, etc.).
- Il convient de bien tenir compte de la préparation de l'eau chaude sanitaire et du programme anti-légionelle, lors de l'installation, de la mise en service, et de l'entretien de l'installation.
- Les besoins de chauffage des différents bâtiments alimentés en chaleur par ces installations varient, dans le cadre de ces mesures in situ, entre 30 et 182 kWh/m². Le besoin de chaleur global (chauffage et ECS) le plus élevé, était de 209 kWh/m². Malgré ces besoins de chaleur globaux élevés, l'installation en question a atteint un taux d'utilisation de la chaleur de 3,18.

Pour les installations avec pompes à chaleur sol/eau, sans surprise, l'efficacité de rafraîchissement passif (par les sondes) est supérieure d'un facteur 3, à l'efficacité d'un rafraîchissement actif avec compresseur. Tout comme pour le chauffage, lors du rafraîchissement, la limite et la durée de rafraîchissement jouent un rôle important, et doivent mieux être prises en compte, le cas échéant.

Dans le cadre de la présente étude, l'efficacité de l'installation (COPa, taux d'utilisation de la chaleur, taux d'utilisation du système) aussi bien que le besoin, en valeur absolue, d'énergie primaire

(E_{Tot}) ont été analysés. En effet, une limite de chauffage trop haute et une importante consommation d'eau chaude sanitaire peuvent améliorer l'efficacité, alors même que ces comportements conduisent à des besoins énergétiques plus élevés et donc à un bilan environnemental plus mauvais. Il est par conséquent primordial de toujours considérer non seulement l'ensemble de l'installation, mais également le comportement des utilisateurs, lors de l'analyse détaillée d'une installation.

Les observations faites lors des mesures in situ, ainsi que les mesures d'optimisation réalisées, sont discutées au chapitre 3. Le réglage de la régulation du chauffage présente un potentiel important quant à l'amélioration de l'efficacité. Grâce à un enregistrement des données de mesure avec une résolution temporelle particulièrement fine, plusieurs dysfonctionnements des installations ont pu être mis en évidence, comme par exemple une résistance électrique chauffante dans un ballon d'eau chaude sanitaire recouverte de calcaire, des pertes permanentes sur un compresseur avec onduleur, en mode standby, ou encore une pompe à chaleur en dérangement (la chaleur était, de fait, produite par la résistance électrique chauffante).

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 Datenschatz besteht aus Handablesungen und einigen Datenlogger-Messungen. Viele der heute gültigen Design- und Installations-Richtlinien sind basierend auf diesen Auswertungen entstanden.

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

- Anlaufverhalten
- Abtauungen
- Taktverhalten
- Detaillierte Aufschlüsselung nach unterschiedlichen Nutzungsgraden
- Messung an den unterschiedlichen Systemgrenzen, örtlich wie auch zeitlich
- Aussagen über das Gebäude und das Nutzerverhalten
- Einfluss der Nebenaggregate auf die Effizienz (Umwälzpumpe, Heizstäbe, usw.)

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

Aufgenommen wurden nur neue Wärmepumpenanlagen, welche vorwiegend in einem Einfamilienhaus (Neubau oder Sanierung) installiert wurden. Bestandsanlagen können nicht teilnehmen, da die Wärmepumpen vor der Installation am Wärmepumpen-Testzentrum WPZ in Buchs SG ausgemessen und das Messequipment der Feldmessung entsprechend kalibriert wird.

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

Ab der Heizsaison 2020 wird die Feldmessung kontinuierlich auf kleinere Mehrfamilienhäuser ausgeweitet.

1.1 Objektbeschreibungen

Seit dem letzten Feldbericht sind die Anlagen 17 bis 24 neu in die Auswertung mit aufgenommen worden. Somit befinden sich per Ende August 2020 insgesamt 23 Anlagen in der Feldmessung. 12 Luft/Wasser-Wärmepumpen, davon acht drehzahlgeregelte Modelle, sowie elf Sole/Wasser-Wärmepumpen mit sieben drehzahlgeregelten Modellen. Bei vier Objekten wird das Trinkwarmwasser mittels separatem Wärmepumpenboiler erwärmt. Der Kühlbetrieb ist bei vier Objekten aktiviert. Die Anlagen 2, 10 und 13 kühlen passiv mittels Erdwärmesonde, die Luft/Wasser-Wärmepumpe 15 aktiv mit Verdichter.

Aktuell ist das Objekt 22 mit zehn gemeldeten Personen das einzige Mehrfamiliengebäude im Feldmessprogramm. Mit Objekt 19 ist nun die erste Wärmepumpenanlage mit reiner Wasserfüllung der Erdwärmesonde (EWS) in die Messkampagne aufgenommen worden. Zur besseren Übersicht wird dieses Objekt auch in die Kategorie Sole/Wasser-Wärmepumpen aufgenommen.

Die 23 vermessenen Anlagen werden in diesem Bericht dargestellt. Die Betrachtungsperiode ist identisch zum vorjährigen Bericht von September bis Ende August. Somit können nun je nach Anlage maximal vier Heizperioden (2016/17, 2017/18, 2018/19 und 2019/20) ausgewertet werden. Bei neu aufgenommenen Objekten wird baubedingt in der ersten Messperiode häufig noch keine vollständige Heizsaison mit 365 Tagen gemessen. Liegen weniger als 350 Messtage vor, wird diese Heizsaison mit einem Stern gekennzeichnet (Ein Vergleich mit anderen Perioden oder Anlagen ist durch den verkürzten Winterbetrieb nur bedingt möglich). Objekte mit weniger als 300 Messtage pro «Heizsaison» werden nicht dargestellt.

Tabelle 1 zeigt eine Kurzübersicht über die untersuchten Anlagen.

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Objekte

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / /Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
1	11.05.2017	X		X				<ul style="list-style-type: none"> • Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (über 20 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung) • Seit Servicewartung 24.09.2019 wöchentliches Legionellenprogramm aktiv • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 3.85 • SCOP₅₅ = 2.95
2	01.01.2017		X	X		X	X	<ul style="list-style-type: none"> • Objekt wurde im Dez. 2016 bezogen. • Heitzt und kühlt immer wieder am gleichen Tag • Heizstäbe: Nur TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 4.9 • SCOP₅₅ = n.a. – Energielabel A++
3	01.07.2016	X			X	X		<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 Kühlobetrieb mehr aufgetreten • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 4.78 • SCOP₅₅ = 3.68

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
4	01.07.2017		X		X	X		<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
5	25.10.2017 (Bewohnt seit 24.3.18)	X		X				<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
6	01.08.2017		X		X	X		<ul style="list-style-type: none"> • Solarthermie Unterstützung für Heizen und Trinkwassererwärmung • Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Samstag für 1 bis 2h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet. Auffallend ist, dass der Elektroein-satz 2mal hintereinander einschaltet) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 4.20
7	12.01.2017		X		X			<ul style="list-style-type: none"> • Heitzt jeden Tag (auch wenn Tagesmittel der Umgebungstemperatur über 28 °C war) • Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Samstag für 0.5 bis 1h in Betrieb (Der Elektroheizstab wird über eine Zeituhr eingeschaltet. Auffallend ist, dass der Elektroein-satz 2mal hintereinander einschaltet) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.43 • SCOP₅₅ = 4.03

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
8	12.01.2017	X			X			<ul style="list-style-type: none"> Wärmepumpenboiler mit Kellerluft (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden) 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.
9								<ul style="list-style-type: none"> Drittanlage, für welche die Messdatenbank dieser Feldmessung verwendet worden ist
10	10.11.2018		X		X		X	<ul style="list-style-type: none"> Gebäude war bis 1.7.20 wegen Umbau nur teilweise bewohnt Erdsonde mit 280 m zunächst mit Wasser geplant, WP-Hersteller schreibt jedoch Glykole Mischung vor. SCOP₃₅ = 5.6
11	01.08.2017	X			X		X	<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

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
12	25.01.2019	X			X	X		<ul style="list-style-type: none"> • Bis 24.1.2019 fehlte Temperatursensor im Trinkwarmwasserspeicher, daher erfolgte bis dahin die Aufladungen ausschliesslichen mit dem Elektroheizstab • 1/3 der Aufladeenergie für Legionellenprogramm mittels Elektroheizstab • SCOP₃₅ = 5.05 • SCOP₅₅ = 3.90
13	01.08.2017		X		X	X	X	<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 der EKZ¹) • Heizstäbe: WP und TWW-Speicher • SCOP₃₅ = 5.20 • SCOP₅₅ = 3.95
14	01.12.2017		X		X	X		<ul style="list-style-type: none"> • Wärmepumpenboiler mit Aussenluft(!) (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden) • 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

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

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
15	01.01.2018	X			X	X	X	<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
16	01.11.2017	X			X	X		<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++
17	06.11.2018 bewohnt ab 22.12.2018	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> • Anfänglich tägliches Legionellenprogramm mit Heizstab, erste Inbetriebnahme nicht vollständig, zweite IB am 21.01.2019: Nun wöchentliches Legionellenprogramm • SCOP₃₅ = 4.41 • SCOP₅₅ = 3.37

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
18	15.03.2019		x		x		x	<ul style="list-style-type: none"> Gebäude mit 3 Wohnungen (EBF: 400 m²) Frischwassermodule (FWM) mit Zirkulation Spezielle Hydraulik, Heizkreisverteiler für Radiatoren im Altbau und Fußbodenheizung, Rücklauf für Vorerwärmung Speicher FWM Daher ist eine Aufteilung der Kennziffern nach Betriebszielen («Heizen», «Aufladung») nicht möglich
19	09.05.2019		x		x			<ul style="list-style-type: none"> Wärmepumpenboiler im Keller (Waschküche) (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden) Wassergefüllte Erdwärmesonde Identische Wärmepumpe zu Anlage 7, jedoch TWW mittels Wärmepumpenboiler SCOP₃₅ = 5.43 SCOP₅₅ = 4.03
20	10.05.2019	x			x			<ul style="list-style-type: none"> Fußbodenheizung Ersatz für eine funktionstüchtigen Luft/Wasser-Wärmepumpe aus dem Jahr 1994
21	09.02.2020		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> Fußbodenheizung SCOP₃₅ = 5.2 SCOP₅₅ = 4.0
22	13.07.2019		x		x	x		<ul style="list-style-type: none"> Mehrfamilienhaus 500l Pufferspeicher, 1000l Trinkwasserspeicher

Objektnummer	Beginn der Messung	Luft / Wasser WP	Sole / Wasser WP	Neubau	Sanierung	Drehzahl-Regelung	Kühlung aktiviert	Anmerkungen:
23	27.07.2019	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> Wärmepumpenboiler in kleinem Heizungskeller (WP-Boiler nur bei Objekt 8, 14, 19 und 23 vorhanden) Kühlmöglichkeit am 18.08.2020 aktiviert Minergie-Holzbauweise aus den 1990igern
24	13.02.2020	x			x	x		<ul style="list-style-type: none"> Zirkulationspumpe Radiatorenheizung SCOP₃₅ = 4.5 SCOP₅₅ = 3.4

In Abbildung 1 ist die geografische Lage der Wärmepumpenanlagen dargestellt.

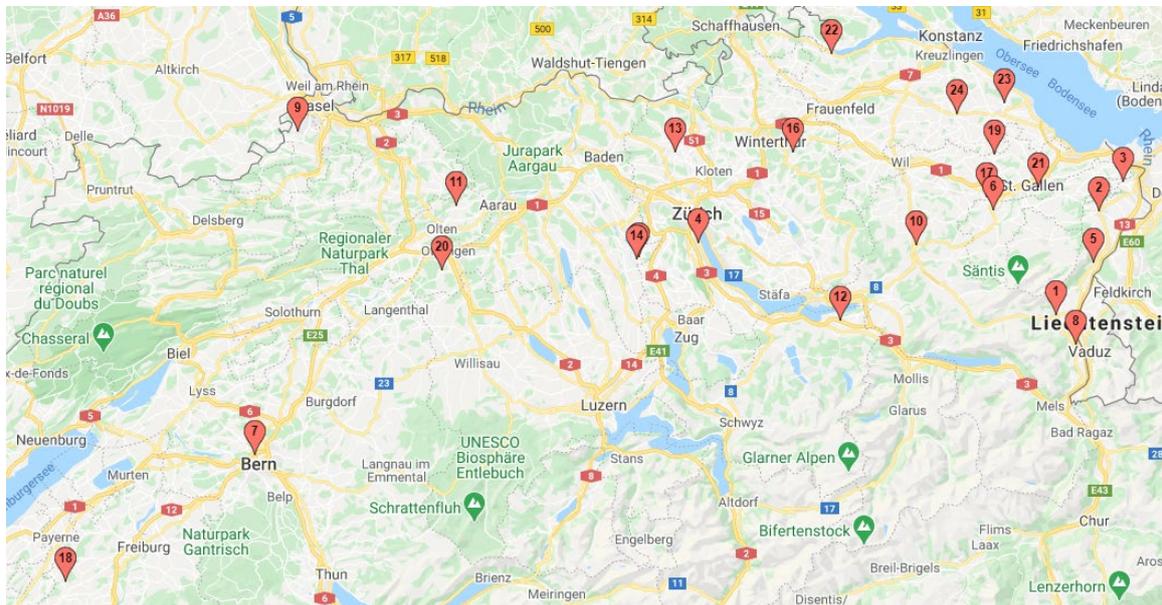


Abbildung 1: Standorte der Wärmepumpenanlagen (erstellt mit <http://batchgeo.com>)

In Tabelle 2 werden die Höhe des Gebäudestandortes, die Energiebezugsfläche (EBF), die Anzahl der gemeldeten Personen sowie Informationen zum Wärmeverteilsystem (Radiator, Fussbodenheizung, etc.) 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. Geo-

grafische Unterschiede führen auch zu beträchtlichen unterschiedlichen 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. Personentalter, Kind, Erwachsener, Senior), Berufstätigkeit, Besuchshäufigkeiten, etc.).

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

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

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	220	465	4	FBH
12	Glarus	120	427	unb.	FBH und RH
13	Zürich	190	419	4	FBH
14	Zürich	163	393	5	FBH
15	Zürich	224	402	5	FBH
16	Zürich	225	541	5	RH
17	St. Gallen	187	737	2	FBH
18	Payerne	450	755	unb.	RH und FBH
19	St. Gallen	195	600	unb.	RH
20	Wynau	140	458	unb.	FHB
21	St. Gallen	278	834	2	FBH
22	Schaffhausen	466	428	10	FBH
23	Güttingen	240	445	4	FBH

1.2 Systemgrenzen und Kennzahlen

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

Der allgemeine Begriff der Effizienz der Wärmepumpe wird mit der Jahresarbeitszahl JAZ+, die Effizienz der Wärmepumpen-Anlage mit dem Wärmenutzungsgrad WNG und die Effizienz in Verbindung mit dem Nutzerverhalten beim Warmwasser als Systemnutzungsgrad SNG_{TWW} beschrieben. Für die Messdatenauswertung werden folgende Formeln und Messgrößen verwendet:

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

$$WNG = (Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / E_{\text{Tot}}$$

$$SNG_{\text{TWW}} = Q_{\text{TWW}} / E_{\text{Aufladung}}$$

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

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

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

Der gesamte Bedarf an elektrischer Energie für die gesamte Wärmepumpen-Anlage, geläufig als Strombezug genannt, ist unter E_{Tot} aufgeführt.

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

$$QH_HWB = Q_{\text{Heizen}} / EBF \quad \text{Heizwärmebedarf [kWh/m}^2\text{]}$$

$$GWB = (Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / EBF \quad \text{Gesamtwärmebedarf [kWh/m}^2\text{]}$$

$$HGT_20_12 \text{ bzw. } HGT_20_16 \quad \text{Heizgradtage [}^\circ\text{C]} \text{ (20/12 für Neubau, 20/16 für Altbau)}$$

Mit:

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

$$TWWB = (Q_{\text{Aufladung}}) / EBF$$

Mit:

Q_{TWW}	Thermische Energie der Trinkwarmwassernutzung [kWh]
$E_{\text{Aufladung}}$	Elektrische Energie des gesamten Wärmepumpensystems während der Aufladung [kWh]
$TWWB$	Trinkwasserwärmebedarf [kWh/m ²]

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

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

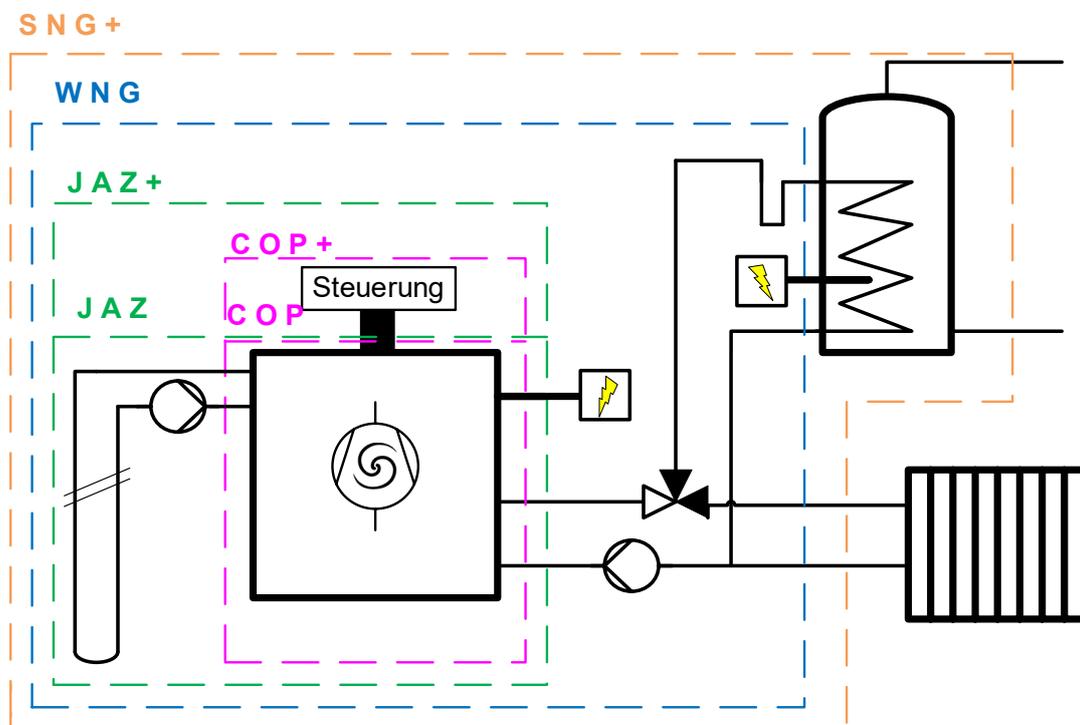


Abbildung 2: Vereinfacht dargestellte Systemgrenzen einer Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Direktkreisheizung und Trinkwassererwärmung mittels Speicher.

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

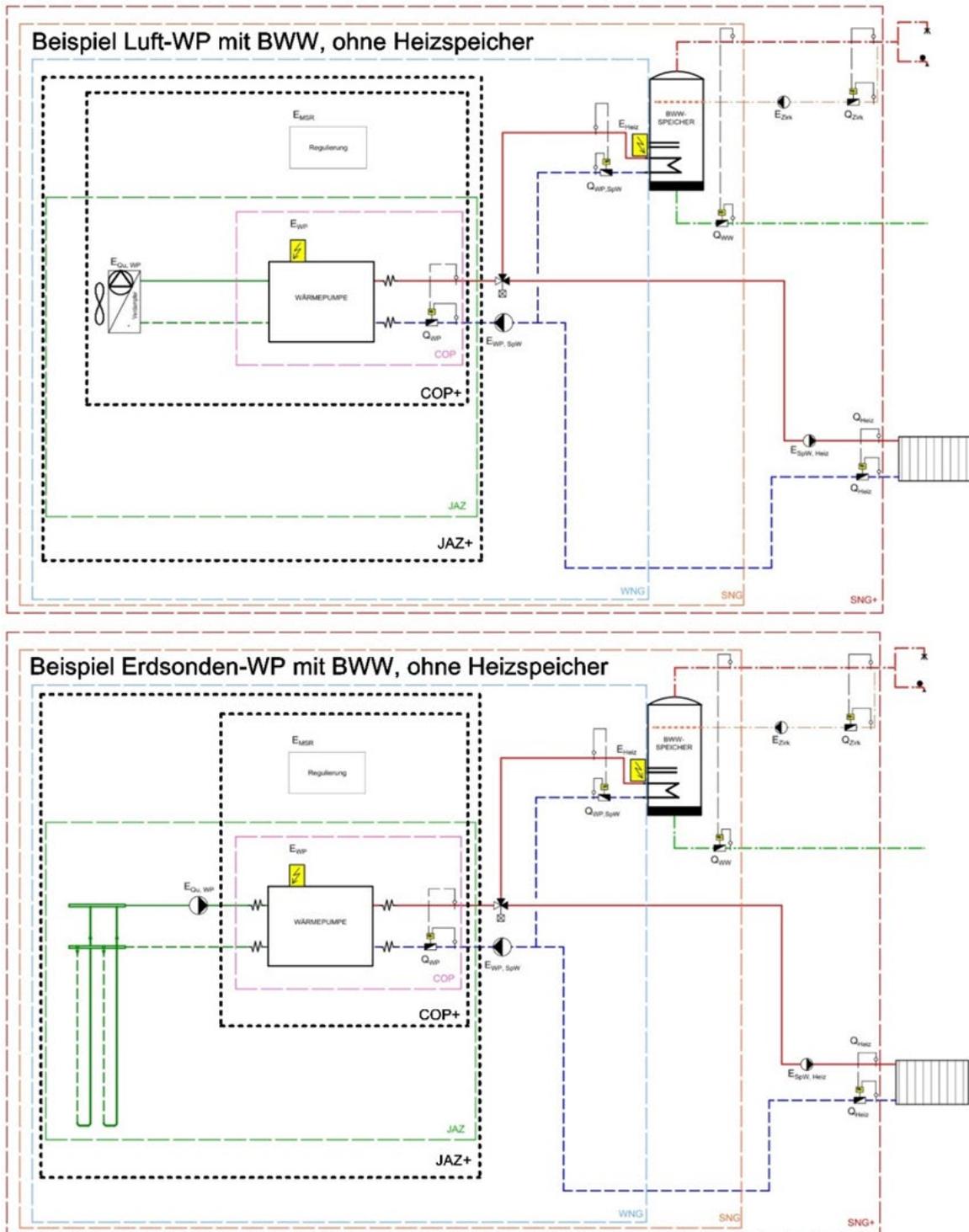


Abbildung 3: Systemgrenzen gemäss BFE für Luft- und Erdsonden-WP mit Trinkwasserspeicher, aber ohne Heizspeicher. Der Kennwert JAZ+ beinhaltet im Gegensatz zum COP+ den Energiebedarf der Quellen-Umwälzpumpe bei Sole/Wasser-Wärmepumpen.

2 Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpenanlagen

In diesem Kapitel werden die Wärmepumpen-Anlagen im Verlauf der maximal vier aufgezeichneten Heizperioden miteinander verglichen. Neben der allgemeinen Energieeffizienz wird auch auf den Einfluss der Quellen- bzw. Senkentemperatur eingegangen. Die ausgewerteten Daten beziehen sich auf die jeweilige Heizperiode vom 1. September bis zum 31. August. Liegen für ein Objekt nur 300 bis 350 von 365 möglichen Tagen vor (z.B. aufgrund späterer Inbetriebnahme), wird diese Heizperiode in den Grafiken mit einem Stern gekennzeichnet. Diese Werte sind jedoch dann nur begrenzt aussagekräftig und dürfen nicht ohne Weiteres mit den Folgeperioden verglichen werden. Liegen weniger als 300 Messtage vor, wird das Objekt in dieser Heizperiode nicht dargestellt. Insgesamt sind maximal vier Heizperioden für ein Objekt von September 2016 bis Ende August 2020 gemessen worden.

2.1 Vergleich der Energiekennziffern (JAZ, WNG, SNG)

In Abbildung 4 und Abbildung 5 werden die Jahresarbeitszahlen JAZ+ und die Wärmenutzungsgrade WNG kombiniert für Heizen und Aufladung der gemessenen Objekte dargestellt. Im Gegensatz zur Jahresarbeitszahl JAZ+ wird bei dem Wärmenutzungsgrad der elektrische Energiebedarf der Senkenumwälzpumpe, sowie die externen elektrischen Heizstäbe mitberücksichtigt. Dementsprechend spiegelt diese Kennziffer die Effizienz der Wärmeerzeugung aus Nutzersicht wider. Der Kennwert JAZ+ verdeutlicht hingegen die Effizienz der Wärmepumpe als einzelne Komponente.

Unterschiede ergeben sich durch den Einsatz des elektrischen Heizstabes im Trinkwarmwasserspeicher (z.B. aufgrund der «Legionellschaltungen») und der Umwälzpumpe, welche beim Wärmenutzungsgrad berücksichtigt werden. Der Einfluss der unterschiedlichen Quellen- und Senkentemperaturen in den jeweiligen Heizperioden wird im folgenden Kapitel betrachtet. Bei den Objekten 8, 14, 19 und 23 wird das Trinkwarmwasser mittels einer eigenen Trinkwarmwasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Dadurch können bei diesen vier Systemen nicht alle Kennziffern gebildet werden, die JAZ+ für diese Objekte bezieht sich deshalb nur auf den Heizbetrieb.

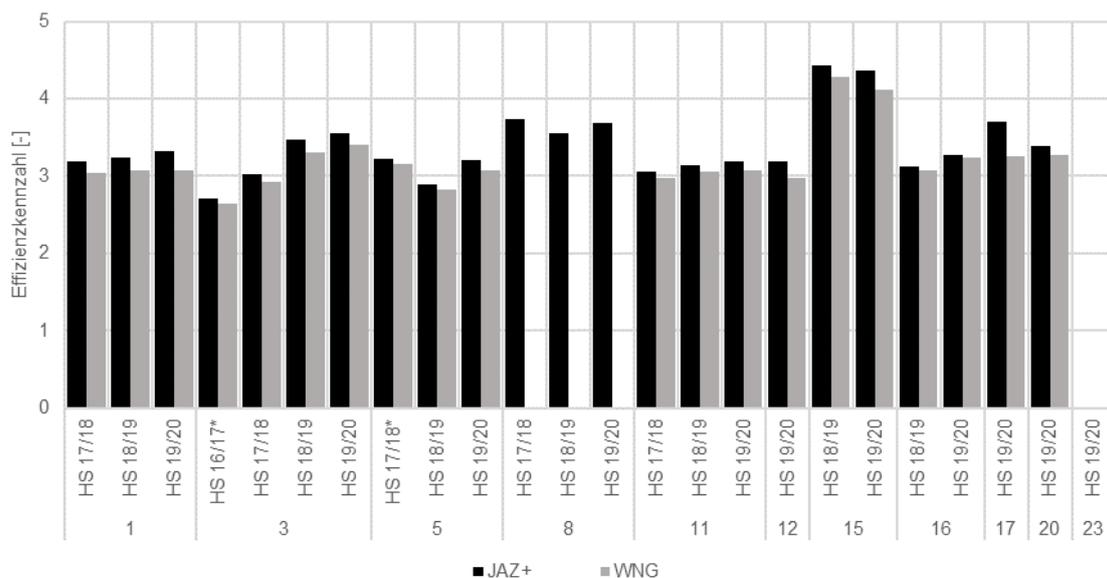


Abbildung 4: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Luft/Wasser-Wärmepumpensystemen

Den tiefsten WNG über eine gesamte Messperiode weist Anlage 5 mit 2.82 auf, den höchsten erreicht Anlage 15 mit 4.29.

Mit einer Historie von bis zu vier Messperioden können nun auch Veränderungen bei einzelnen Anlagen festgestellt werden. Die Effizienzen der Luft/Wasser-Wärmepumpensysteme 1, 3, 5, 11 und 16 sind dabei angestiegen. Die Gründe dafür sind nicht immer eindeutig bestimmbar, der milde Winter in der letzten Heizperiode hat sicherlich einen Anteil. Interessant ist der ausbleibende bzw. leichte Effizienzabfall bei Anlage 15, welcher auf die deutliche Anpassung der Heizgrenze zurückzuführen ist. Dadurch arbeitet die Wärmepumpe bei den höheren Aussen- und Quellentemperaturen nicht mehr, weshalb der Energiebedarf aber auch die Effizienz sinkt. Trotz dieser energetischen Optimierungsmaßnahme weist diese Anlage als einzige Jahreseffizienzwerte von über vier auf. Im letzten Jahresbericht ist der «intuitive» Widerspruch, dass eine Energieeinsparung zur Effizienzminderung führt, bereits im Kapitel 3.2 *Einfluss von Massnahmen* beschrieben worden. Bei Anlage 16 ist der sehr geringe Unterschied zwischen JAZ+ und WNG positiv hervorzuheben. Unberücksichtigt des geografischen Standortes, der Gebäudehülle und des Wärmeabgabesystems können die Luft/Wasser-Wärmepumpen aller Objekte eine bemerkenswerte Jahresarbeitszahl von über drei aufweisen.

In Abbildung 5 werden die gleichen Effizienzkenntzahlen für die Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen dargestellt. Auch hier kann bei vielen Anlagen eine leichte Effizienzsteigerung im Verlauf der gemessenen vollen Heizperioden beobachtet werden. Interessant sind die deutlichen Unterschiede zwischen JAZ+ und WNG der einzelnen Anlagen, exemplarisch der Vergleich zwischen Anlage 7 und 13. Der grösste Unterschied weist das MFH 22 auf. Dies ist auf den beträchtlichen Anteil des Heizstabes aufgrund des täglich durchgeführten Legionellenprogrammes zurückzuführen. Bei den Objekten mit mehreren vollen Heizperioden kann keine Abnahme der Effizienz in Folge einer abnehmenden Erdwärmesondentemperatur festgestellt werden. Diese Thematik wird in Kapitel 2.8 noch genauer betrachtet.

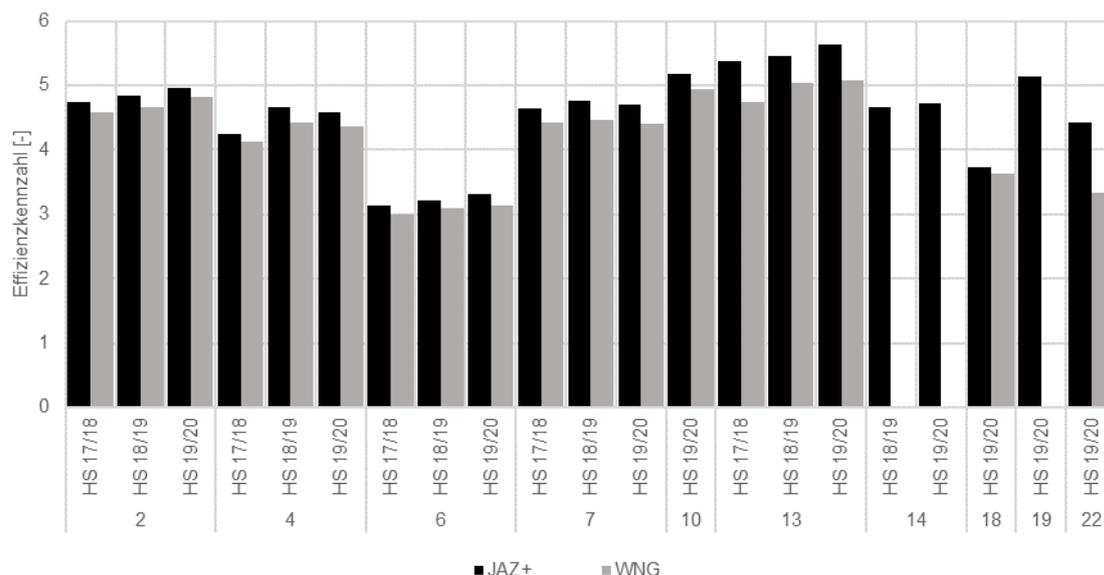


Abbildung 5: Jahresarbeitszahl (JAZ+) und Wärmenutzungsgrad (WNG) der Sole/Wasser-Wärmepumpensysteme

Mit der Auswertung der Sole/Wasser-Wärmepumpen wird die grosse Varianz der Jahresarbeitszahl von 3 bis fast 6 sichtbar, je nach Technologie der Wärmepumpe, der Quellentemperatur und des benötigten Temperaturniveau des Objektes. Bemerkenswert ist die hohe JAZ+ von über 5 bei den Anlagen 10, 13 und 19. Der tiefste WNG mit 3.0 weist Anlage 6 auf, den höchsten WNG von 5.07 Anlage 13.

2.2 Einfluss des Temperaturniveaus

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Temperaturniveaus der Wärmepumpen gegenübergestellt. Herangezogen werden dabei nur jene Zeitbereiche, in welchen die Wärmepumpen in Be-

trieb waren. Entsprechend dem Betriebsziel der Wärmepumpe («Heizbetrieb» oder «Aufladebetrieb») erfolgt die entsprechende Zuordnung.

In den Abbildungen werden dabei folgende Abkürzungen verwendet:

- T_{Qein_Heizen} : Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Heizbetriebes» der Wärmepumpe.
- T_{Qein_AL} : Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Aufladebetriebes» der Wärmepumpe.
- T_{VL_Heizen} : Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Heizbetriebes» der Wärmepumpe.
- T_{VL_AL} : Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Aufladebetriebes» der Wärmepumpe.

In Abbildung 6 sind die Temperaturniveaus der Luft/Wasser-Wärmepumpen und in Abbildung 7 die der Sole/Wasser-Wärmepumpen unterschieden nach Betriebsmodus Heizen und Aufladung dargestellt.

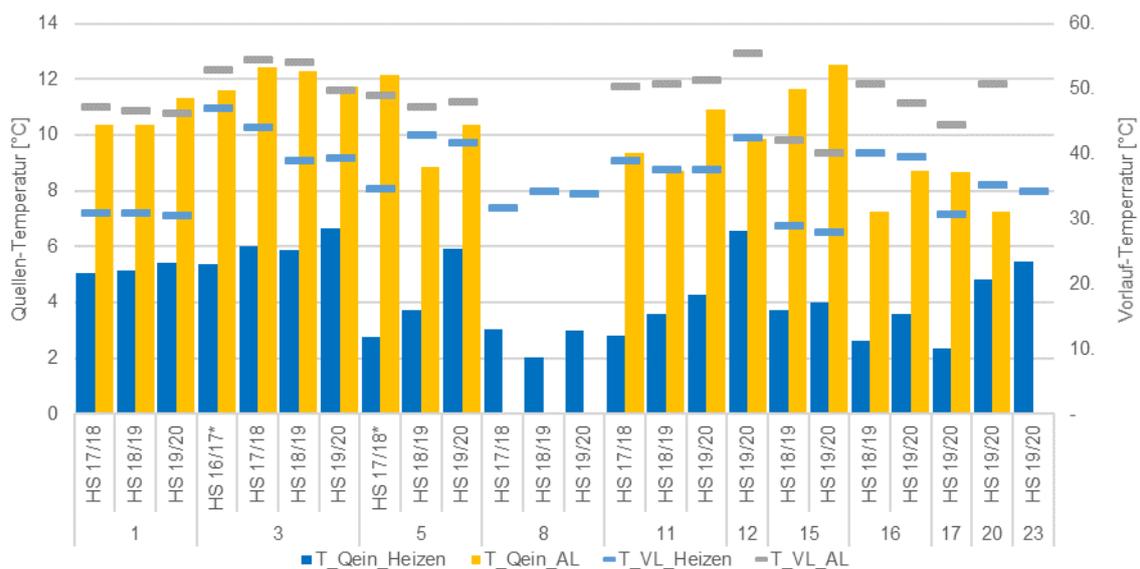


Abbildung 6: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Luftansaugung) und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsziele «Heizen» und «Aufladung» für Luft/Wasser Wärmepumpen. Das Objekt 8 und 23 verfügt über eine zusätzliche Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.

Gut erkennbar sind die meist zunehmend milderen Heizperioden und somit höheren Quellentemperaturen erkennbar. Bei Objekt 3 wurde die Heizkurve nach der Heizperiode 2017/18 geändert, da bis dahin eine Speicherüberhöhung von fast 10 Kelvin eingestellt war. Bei allen anderen Anlagen wurde die Heizkurve nicht geändert. Eine geringere Vorlauftemperatur im Heizbetrieb ist deshalb auf mildere Aussentemperaturen zurückzuführen.

Bei Objekt 3 und 16 wurde die Speicherhysterese vergrößert, wodurch es zu einer geringeren Aufladehäufigkeit kommt und der Trinkwarmwasserspeichers tiefer auskühlen kann. Daraus resultieren niedrigere Aufladetemperaturen mit höherer Effizienz zu Beginn der Ladung, was zu einer bemerkenswerten Abnahme der mittleren Aufladetemperatur « T_{VL_AL} » führt.

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

Abbildung 7 zeigt die Auswertungen für Sole-Wasser Wärmepumpen. Bei Objekt 6 muss die Sole/Wasser-Wärmepumpe den grössten Temperaturhub überwinden. Hier liegen niedrige Quellentemperaturen der Erdsonde mit sehr hohen Vorlauftemperaturen in der Senke für die Radiatoren vor. Bei Objekt 6 ist zudem eine Solarthermie-Anlage eingebunden. Dieser Wärmeeintrag wird nicht gemessen, weshalb die Energie- und Kennwerte nicht den gesamten Bedarf wiedergeben. Die Objekte 6 und 14 weisen die tiefsten Quellentemperaturen auf. Hier handelt es sich um Bestandserdwärmesonden. Diese waren mit der ersten Wärmepumpe schon knapp bemessen, die höhere Effizienz der neuen Wärmepumpen beansprucht die Sonde mit einem höheren Wärmeentzug zusätzlich. Je effizienter eine neue Wärmepumpe arbeitet, desto weniger elektrische Energie wird aus der Steckdose bezogen. Zum Bereitstellen derselben Heizwärme wird jedoch dann dem Erdreich mehr Wärme entzogen.

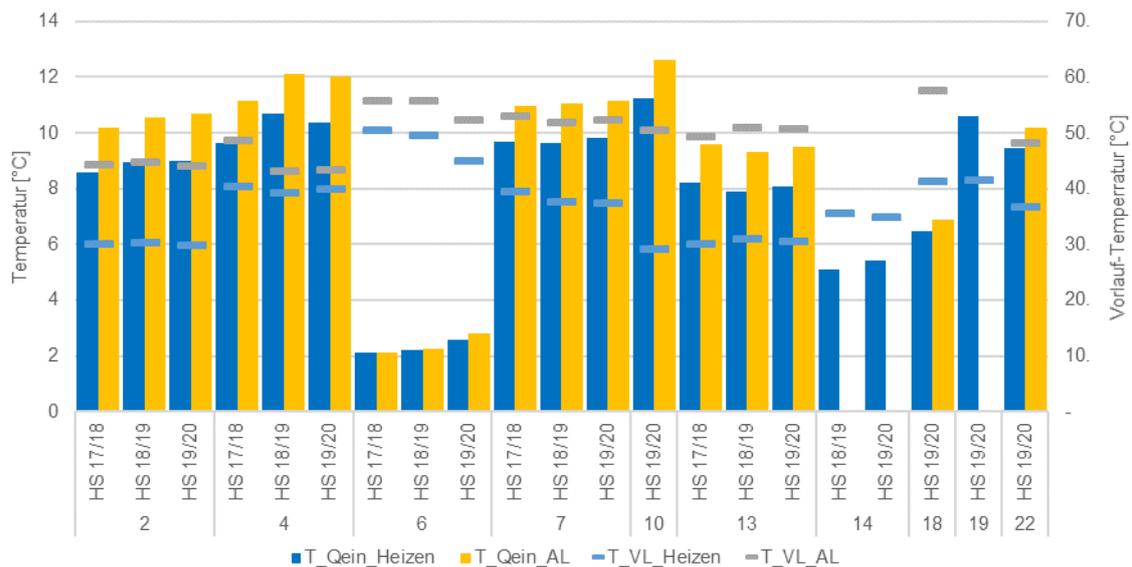


Abbildung 7: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges (Erdsondenvorlauf) und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsziele «Heizen» und «Aufladung» für Sole/Wasser Wärmepumpen. Das Objekt 14 und 19 verfügt über eine zusätzliche Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.

Eine detailliertere Darstellung der unterschiedlichen Quellentemperaturen zwischen Luft- und Sole/Wasser-Wärmepumpen zeigt Kapitel 2.6.

Abbildung 8 (Luft/Wasser-Wärmepumpen) und Abbildung 9 (Sole/Wasser-Wärmepumpen) zeigen den Einfluss der Temperaturniveaus von Quelle und Senke auf den Wärmenutzungsgrad. Dargestellt ist dies ausschliesslich im Heizbetrieb.

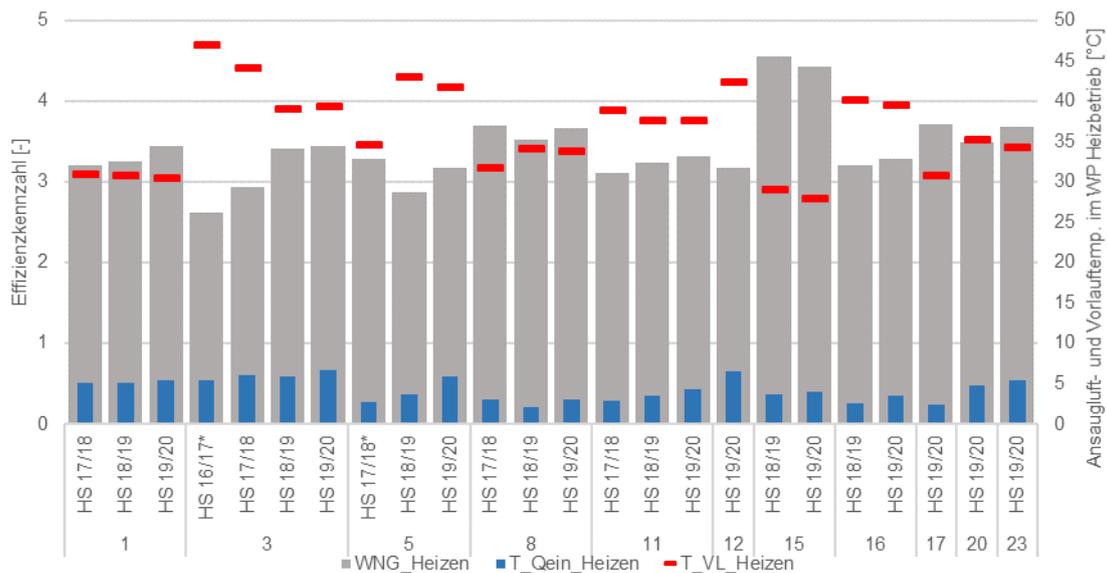


Abbildung 8: Wärmenutzungsgrad der Luft/Wasser Wärmepumpen und die Temperaturen der Ansaugluft sowie des Senkvorlaufs während des Heizbetriebs

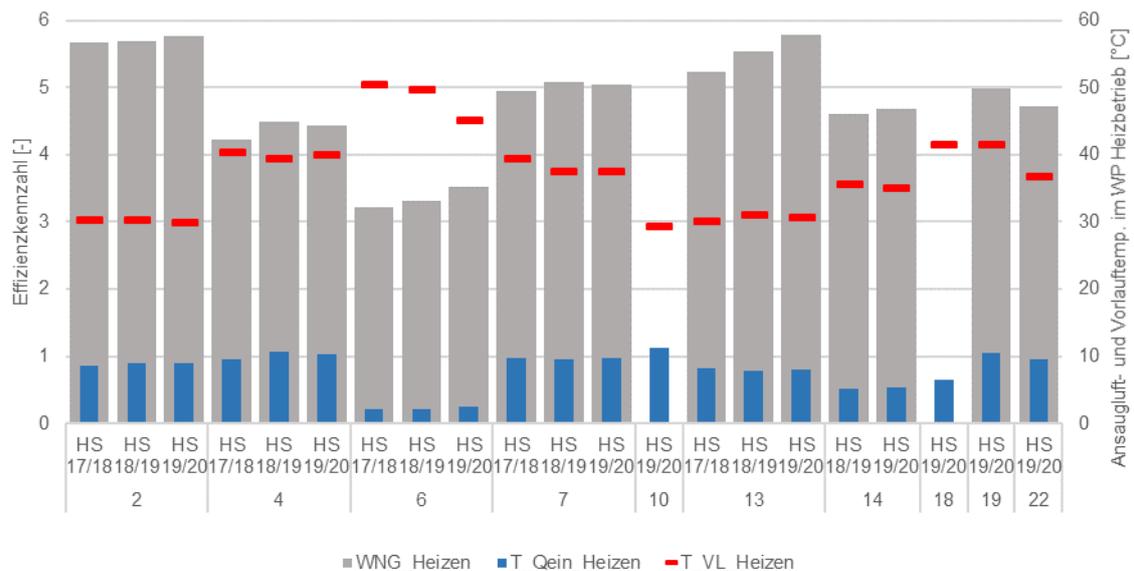


Abbildung 9: Wärmenutzungsgrad der Sole/Wasser Wärmepumpen und die Temperaturen der Erdsonde sowie des Senkvorlaufs während des Heizbetriebs

2.3 Vergleich der Effizienzkennzahlen bei der Trinkwassererwärmung

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

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

Die Jahresarbeitszahlen für die Trinkwassererwärmung mit Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen liegen zwischen 2.6 und 3.6 im Mittel über eine vollständig gemessene Heizperiode. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Systemgrenzen fällt auf, dass die Wärmenutzungsgrade $WNG_{\text{Aufladung}}$ im Schnitt 14 % niedriger liegen als die Jahresarbeitszahlen $JAZ_{\text{Aufladung}}$. Die maximale Abweichung von fast 40 % tritt bei Objekt 12 auf. Dieser Unterschied entsteht, da in der $JAZ_{\text{Aufladung}}$ der energetische Anteil des externen Heizstabes und der Senkenumwälzpumpe nicht berücksichtigt wird. Bei Objekt 12 wird ein tägliches Legionellenprogramm per Heizstab durchgeführt.

Die Effizienz des Nutzerverhaltens SNG_{TWW} variiert bei den Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen zwischen 0.9 und 2.7. Den höchsten Systemnutzungsgrad SNG_{TWW} weisen die Objekte 1 und 3 auf. Der tiefste SNG_{TWW} weist Objekt 12 aufgrund des genannten hohen Heizstabanteils in Verbindung mit einem geringen Trinkwarmwasserbezug auf.

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

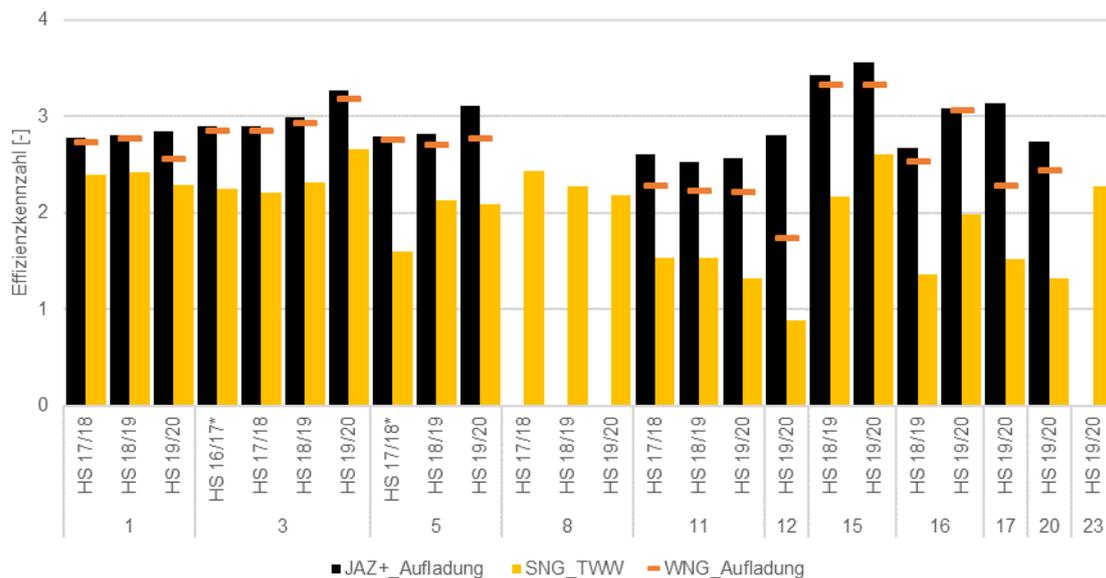


Abbildung 10: Jahresarbeitszahl $JAZ_{\text{Aufladung}}$, Wärmenutzungsgrad $WNG_{\text{Aufladung}}$ und Systemnutzungsgrad SNG der Trinkwassererwärmung der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen.

Die Effizienz der Trinkwassererwärmung bei den Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen zeigt Abbildung 11. Hier liegen die Jahresarbeitszahl $JAZ_{\text{Aufladung}}$ zwischen 1.6 und 4.3. Die Wärmenutzungsgrade WNG sind im Schnitt 17 % tiefer als die $JAZ_{\text{Aufladung}}$ und variieren zwischen 1.4 und 3.9. Auffallend ist, dass der Unterschied dieser beiden Kenngrößen bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen deutlich grösser ausfällt als bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen. Die Effizienz des Nutzerverhaltens SNG_{TWW} variiert bei den Anlagen zwischen 0.4 und 2.0. Bemerkenswert ist bei Objekt 4 die effizienteste Aufladung (WNG_{AL} bis zu 3.9), der Nutzungsgrad ist jedoch am ineffizientesten (SNG_{TWW} von 0.4). Dieser tiefe SNG_{TWW} beruht auf einen sehr sparsamen Warmwasserbedarf von 28 l/d im Jahr 2018, 13 l/d in 2019 und unter 10 l/d in 2020 aufgrund längerer Abwesenheit. Zusätzlich weist dieses Objekt noch eine vorhandene Schwerkraftzirkulation der Hydraulik auf.

Klarzustellen bleibt jedoch, dass ein sparsamer Warmwasserverbrauch trotz geringerer Effizienz die grösste Energieeinsparung bewirkt.

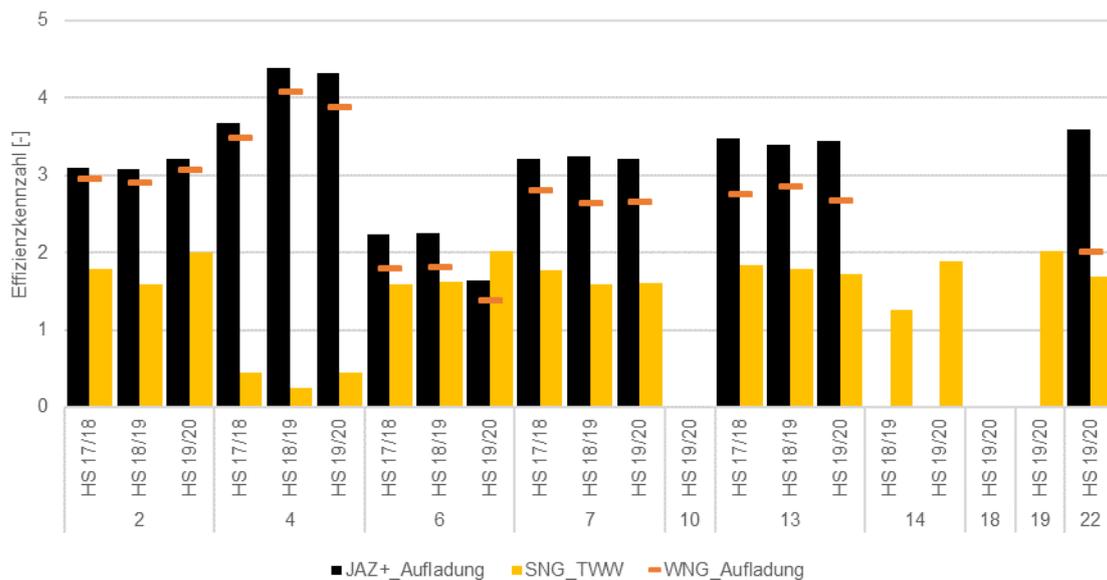


Abbildung 11: Jahresarbeitszahl JAZ_{Aufladung}, Wärmenutzungsgrad WNG_{Aufladung} und Systemnutzungsgrad SNG der Trinkwassererwärmung der Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen. Die grossen Unterschiede zwischen JAZ+ und WNG identifizieren ein energieintensives Legionellenprogramm.

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

- Vorhandene Zirkulationsleitung
- Trinkwarmwassernutzung: Die genutzte Menge hat grossen Einfluss auf den SNG_{TWW}. Hingegen hat die Effizienz der Trinkwassererwärmung (WNG_{Aufladung}) nur einen untergeordneten Einfluss auf den Systemnutzungsgrad.
- Legionellenthematik: Hier stellt sich die Frage, wie das Programm für eine erhöhte Erwärmung des Trinkwarmwassers geregelt ist. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass bei vielen Anlagen eine Zeituhr für den elektrischen Heizstab aktiviert ist. Spätestens mit der überarbeiteten SIA 385/1 wird eine grösstmögliche Vorerwärmung mittels Verdichter der Wärmepumpe gefordert. Hier ist somit eine bessere Abstimmung zwischen dem Elektriker und dem Wärmepumpentechniker gefordert.

2.4 Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage

Um den Einsatz der Wärmepumpensysteme näher beschreiben zu können, werden hier mit den Kenngrössen:

$$QH_{HWB} = Q_{Heizen} / EBF$$

Heizwärmebedarf [kWh/m²]

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

Gesamtwärmebedarf [kWh/m²]

$$HGT_{20_16}$$

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

$$HGT_{20_12}$$

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

noch eine Gebäude-, eine Verbrauchs- und eine Standortkenngrösse abgebildet.

Der Grenzwert des Gesamtwärmebedarfs für Minergie liegt bei 55 kWh/m²a und bei Minergie A bei 35 kWh/m²a. Bei dieser Bilanz sind bereits Heizwärmebedarf und Trinkwasserwärmebedarf miteinander aufsummiert. Bei den Sanierungen werden die Heizgradtage auf 20/16 und bei den Neubauten auf 20/12 bezogen. Die Verwendung der Heizgradtage als Kennziffer wurden in Kapitel 1.2 näher beschrieben.

Die Heizwärmebedarfe der einzelnen Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen variiert während der letzten Heizperiode zwischen 30 und 182 kWh/m² bei einer Betrachtung von ausschliesslich vollständig gemessenen Jahresperioden. Dieser Wert ist natürlich stark von der Bausubstanz abhängig. Der Trinkwarmwasserbedarf, abhängig je nach Nutzerverhalten, der Bewohnung sowie der Wärmeverluste der Hydraulik, weist eine Bandbreite von 9 bis 22 kWh/m² auf.

Abbildung 12 sagt nichts über die Effizienz der Heizungsanlage aus, sondern beschreibt den Energiebedarf des Gebäudes. Allgemein fällt der Unterschied zwischen Neubau und Altbau signifikant aus. Bei den Neubauten (bezieht sich nur auf dieses Feldmessprogramm) mit Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen ist der Bezug von Energie rund 3-mal kleiner als bei den Sanierungsobjekten. Daraus darf auf jeden Fall geschlossen werden, dass vor allem Wärmepumpen-Anlagen in Sanierungsobjekten möglichst effizient umgesetzt werden sollten, damit viel Energie eingespart werden kann. Mit Objekt 12 ist in der letzten Heizperiode das Gebäude mit dem höchsten spezifischen Gesamtwärmebedarf von 209 kWh/m² in die Feldmesskampagne aufgenommen worden. In Kombination mit einem Fussboden- und Radiatorensystem kann diese hohe Heizwärme nur durch hohe Vorlauftemperaturen (Mittelwert 42.4 °C) abgegeben werden. Dennoch kann ein bemerkenswerter Wärmenutzungsgrad im Heizbetrieb von 3.18 erreicht werden.

Abbildung 12 zeigt auch eindrücklich, wie sich das Verhältnis des Gesamtwärmebedarfs für Warmwasser (TWWB) und Wärme für Heizen (HWB) von lediglich 8 % bei Anlage 12 auf 35 % bei Anlage 1 erhöht.

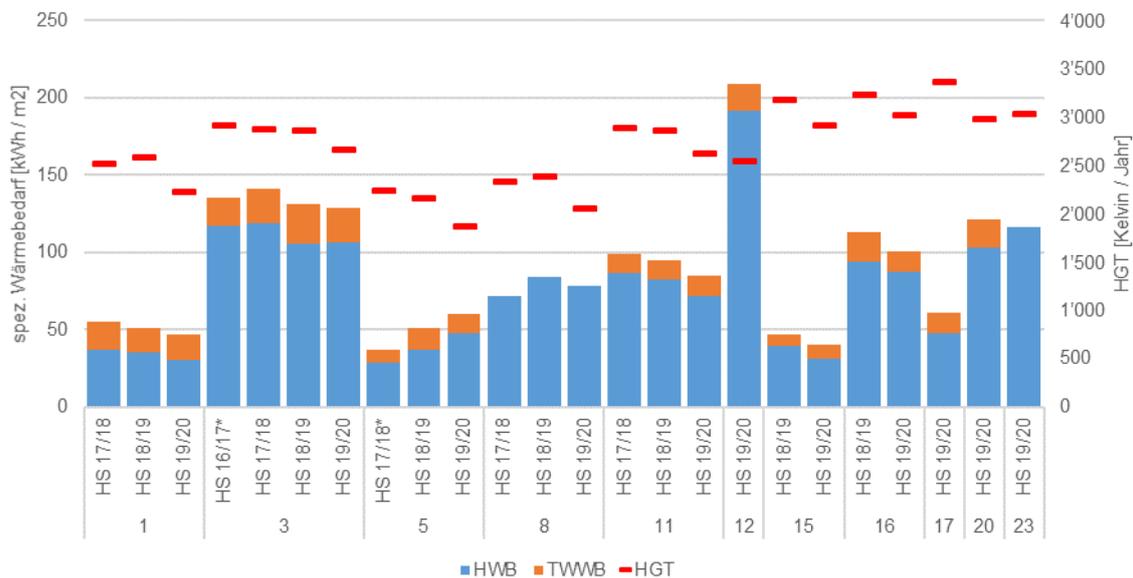


Abbildung 12: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfs (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Von Interesse ist natürlich auch, wie viel elektrische Energie das Gebäude für das Heizen und die Aufladung benötigt, weshalb in Abbildung 13 der spezifische elektrische Energiebezug für die Heizungs- und Trinkwarmwassererzeugung dargestellt werden.

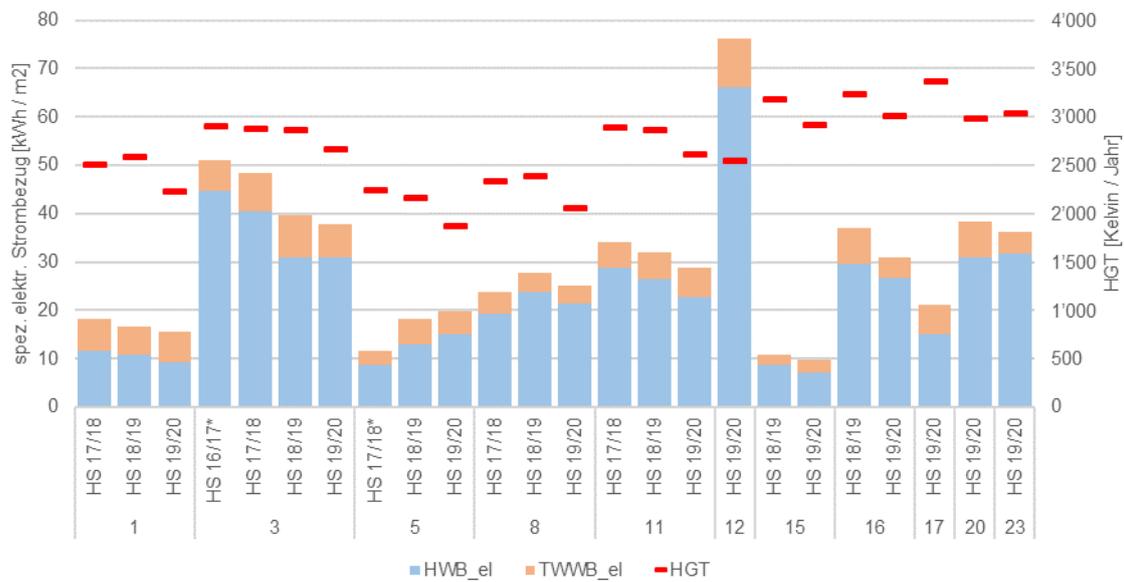


Abbildung 13: Darstellung des elektrischen Strombezugs für Heizen und Trinkwarmwassererzeugung pro m^2 , sowie der Heizgradtage aller Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Ab Abbildung 14 werden die Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen untersucht. Hier liegen die Heizwärmebedarfswerte zwischen 35 und 91 kWh/m^2 während der letzten, vollständig gemessenen Heizperiode. Der Trinkwarmwasserbedarf liegt im Bereich von 2.7 bis 29 kWh/m^2 . Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen wird nur ein Neubau gemessen, bei allen anderen handelt es sich um Bestandsgebäude. Auch hier zeigt sich, dass der Bedarf an Heizungswärme im Neubau um mindestens Faktor 2 geringer ist als bei den Bestandsgebäuden.

Objekt 2 hat in der vergangenen Heizsaison mit 34.5 kWh/m^2a die Grenzwerte von Minergie (38 kWh/m^2a) einhalten können. Der Grenzwert für Minergie-P liegt bei 30 kWh/m^2a . Alle anderen Objekte sind Sanierungen und benötigen einen wesentlich höheren Wärmebedarf. Die deutliche Energieeinsparung bei Objekt 4 dürfte auf den Abschluss der Sanierungsmassnahmen zurückzuführen sein. Von Seiten der Feldmessung wurden keine Optimierungen vorgenommen.

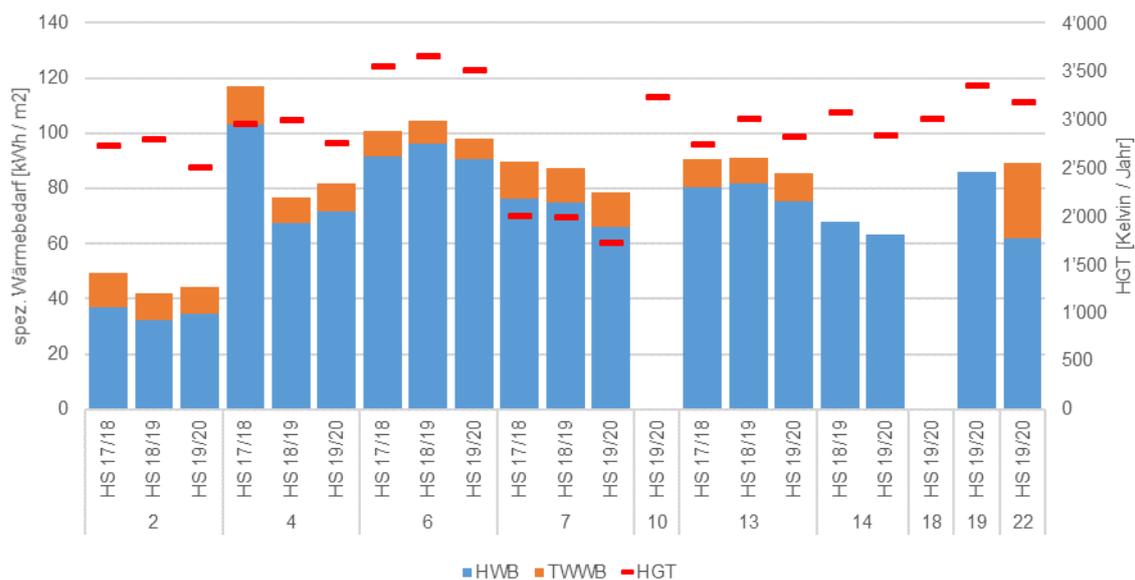


Abbildung 14: Darstellung des Heizwärmebedarfes (HWB), des Trinkwarmwasserbedarfes (TWWB) sowie der Heizgradtage aller Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen

Der Strombedarf der Gebäudeheizungsanlage ist in Abbildung 15 ersichtlich. Auffallend ist der hohe elektrische Energiebedarf der Trinkwassererwärmung bei Objekt 14 und 22. Bei ersterem Objekt wird eine Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit Aussenluft betrieben. Nach einem Verdichterschaden und einer Übergangszeit mit rein elektrischem Betrieb benötigt auch das Ersatzgerät eines anderen Herstellers viel elektrische Energie. Bei kalten Quellentemperaturen erfolgt die Erwärmung durch den Elektroheizstab, da der Wärmepumpenboiler nur bedingt Abtauungen durchführen kann. Das Objekt 22 als MFH führt täglich eine Legionellenschaltung durch, welche den gesamten Speicherinhalt auf über 55 °C erwärmt.



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

2.5 Heizwärmebedarf einer Luft/Wasser-Wärmepumpe im Jahresverlauf

Sehr aufschlussreich ist die detaillierte, objektspezifische Betrachtung des Heizwärmebedarfs über die Aussentemperatur. Für diesen Bericht wurde eine Luft/Wasser-Wärmepumpe auf ca. 540 müM (nächste Messstation Zürich) näher untersucht.

In Abbildung 16 ist die prozentuale Verteilung des jährlichen Heizwärmebedarfs dieser Wärmepumpe von Objekt 16 im Kalenderjahr 2018 anhand der mittleren Tagesaussentemperatur dargestellt. Das Kalenderjahr 2018 wurde herangezogen, da Ende Februar eine signifikante Kältewelle auftrat.

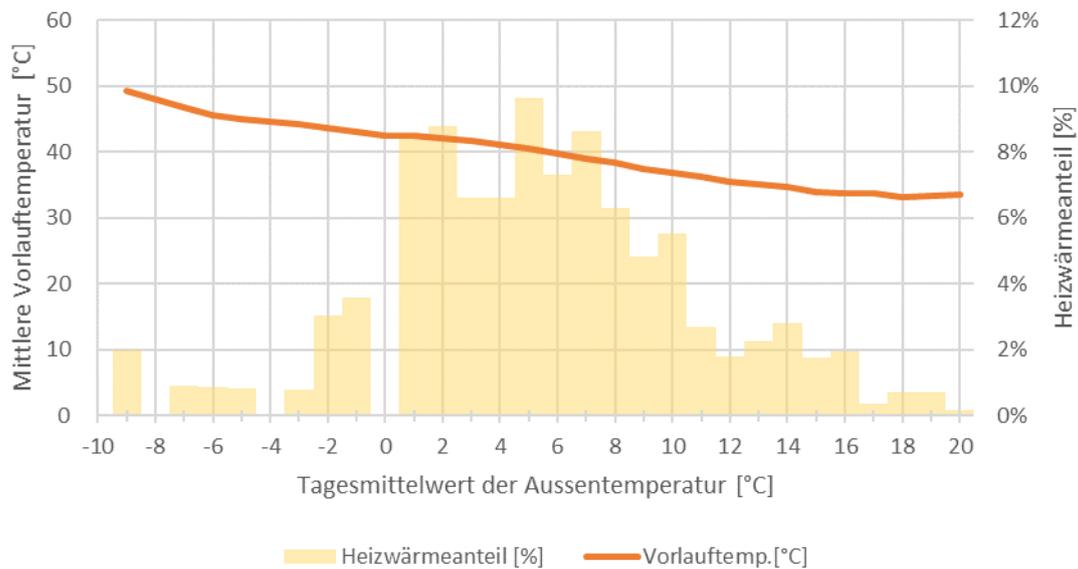


Abbildung 16: Darstellung Verteilung Heizwärme-Anteil der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage 16 mit Radiatoren im Mittel-land für das Kalenderjahr 2018 (wegen Kälteperiode im Feb. 2018)

Man erkennt, dass der grösste Anteil des Heizwärmebedarfes an den eher milden Wintertagen mit mittleren Aussentemperaturen im Bereich von 0 °C bis 10 °C auftreten. Beim betrachteten Gebäude beträgt der Anteil in diesem Temperaturbereich 70 % der gesamten Jahresheizenergie. Der Wärmeanteil für die Tage mit einem Tagesmittelwert unter 0 °C beträgt 15 %, der Anteil für die Tage in der Übergangszeit mit einem Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur über 10 °C beträgt ebenfalls 15 %. Den überwiegenden Heizwärme-Anteil verursachen somit nicht die sehr (wenigen) kalten Tage (wie man intuitiv vermuten könnte), sondern die relativ häufig auftretenden milderen Wintertage im Bereich von 0 bis 10 °C.

Abbildung 17 zeigt die identische Datenaufbereitung für das gleiche Objekt 16 in der letzten Heizperiode 2019/20, also vom 1.9.2019 bis 31.8.2020. Hier ist der deutlich mildere Winter mit sehr wenigen Frosttagen erkennbar.

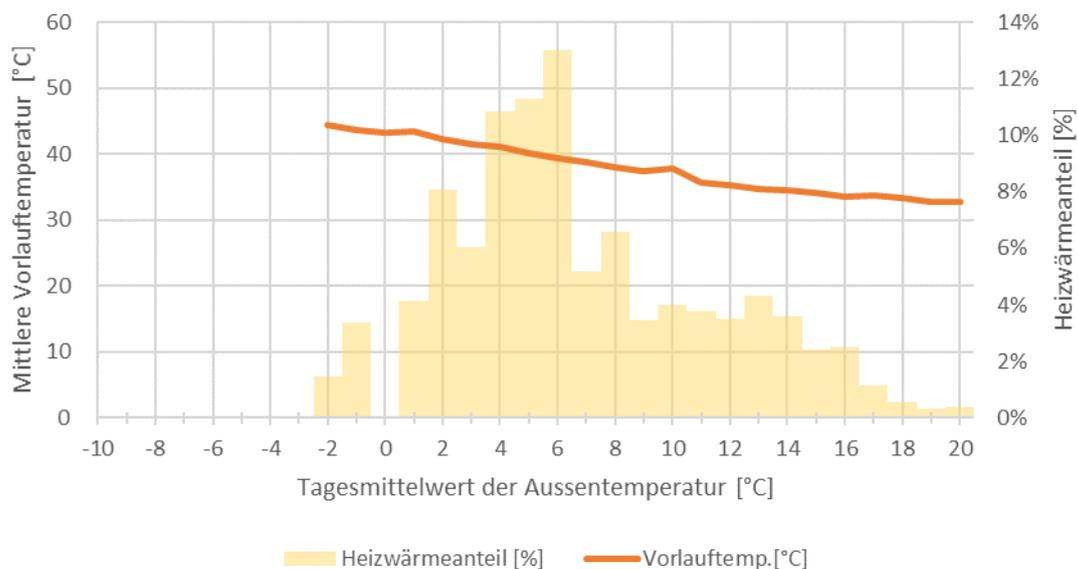


Abbildung 17: Darstellung Verteilung Heizwärme-Anteil der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage 16 mit Radiatoren im Mittel-land für die Heizperiode 2019/20

Bereits ab den milden Wintertagen ohne Dauerfrost weisen die gemessenen Luft/Wasser-Wärmepumpe, auch in Verbindung mit Radiatoren, hohe Jahresarbeitszahlen auf, da die benötigten Vorlauftemperaturen typischerweise nur noch bei rund 40 °C liegen. Das hier dargestellte Objekt befindet sich im Schweizer Mittelland, die Auslegetemperatur beträgt -8 °C. Für die Heizperiode 2018 beträgt der WNG im Heizbetrieb des Objektes 3.07 und 2019 leicht erhöht 3.25. Die Anlage wurde noch nicht im Rahmen der Feldmessungen optimiert. Gut zu erkennen ist, dass aktuell eine sehr hohe obere Heizgrenze eingestellt ist: Die Anlage heizt auch noch bei Tagesmitteltemperatur über 20 °C. Diese Einstellung offenbart im vorliegenden Fall ein Einsparpotential von ca. 2-3%.

Ein guter und effizienter Betrieb von Wärmepumpenanlage ist vor allem in der Übergangszeit von Bedeutung, da hier ein Grossteil der benötigten Wärmeenergie produziert wird. Der Betrieb an den (wenigen) sehr kalten Wintertagen ist für die Jahresenergiemenge und Gesamteffizienz meist nur von geringer Bedeutung (allenfalls jedoch für die Stromversorgung). Die hier abgebildeten, respektive effektiv gemessenen, hohen Arbeitszahlen von über 5 in der Übergangszeit resultieren bei der ausgewählten Luft/Wasser-Wärmepumpen-Anlage auch durch den Einsatz einer leistungsregulierten Wärmepumpe mit drehzahlvariablem Verdichter. Die WP zeigt vor allem im Teillastbetrieb ein sehr effizientes Verhalten.

Als weitere Darstellung zeigt Abbildung 18 den aufsummierten Heizwärmebedarf über die Aussen-temperatur für das Kalenderjahr 2018 bzw. Abbildung 19 die letzte Heizperiode 2019/20.

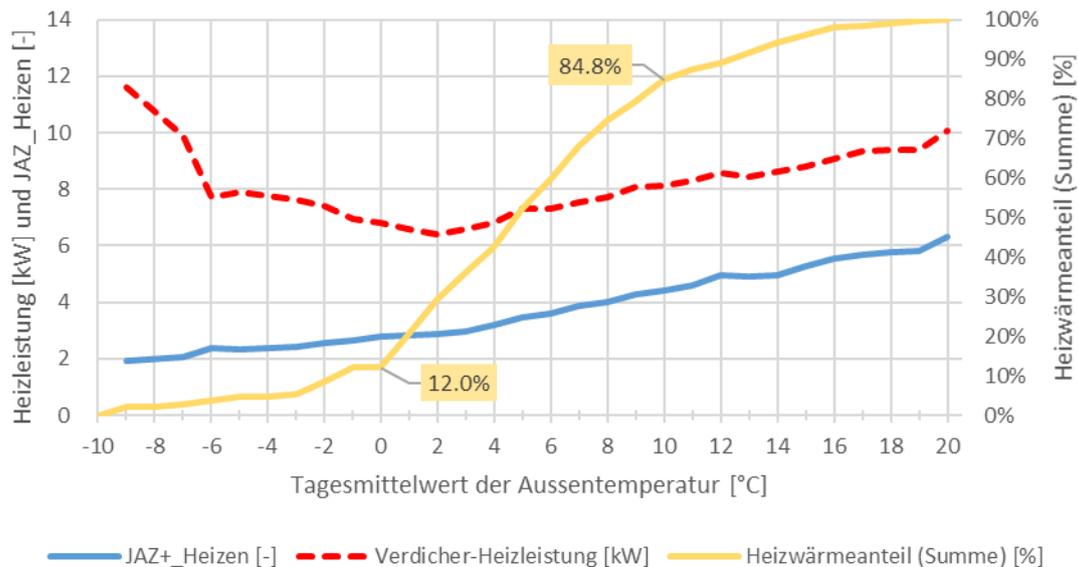


Abbildung 18: JAZ+ im Heizbetrieb, Verdichter-Heizleistung im Betrieb, und Heizwärme-Summenanteil für das Kalenderjahr 2018 von Objekt 16

Deutlich erkennbar ist die Modulationsgrenze der leistungsgeregelten Wärmepumpe bei 2 °C Aussen-temperatur. Bei höheren Aussen-temperaturen taktet diese überdimensionierte Wärmepumpe bereits. Durch die höheren Quellentemperaturen steigt zudem auch die Heizleistung bei gleicher Drehzahl.

Im letztjährigen warmen Winter sind unter 5 % des Gesamtwärmebedarfs bei Frosttagen benötigt worden und fast ein Viertel bei Tagesdurchschnittstemperaturen von über 10 °C.

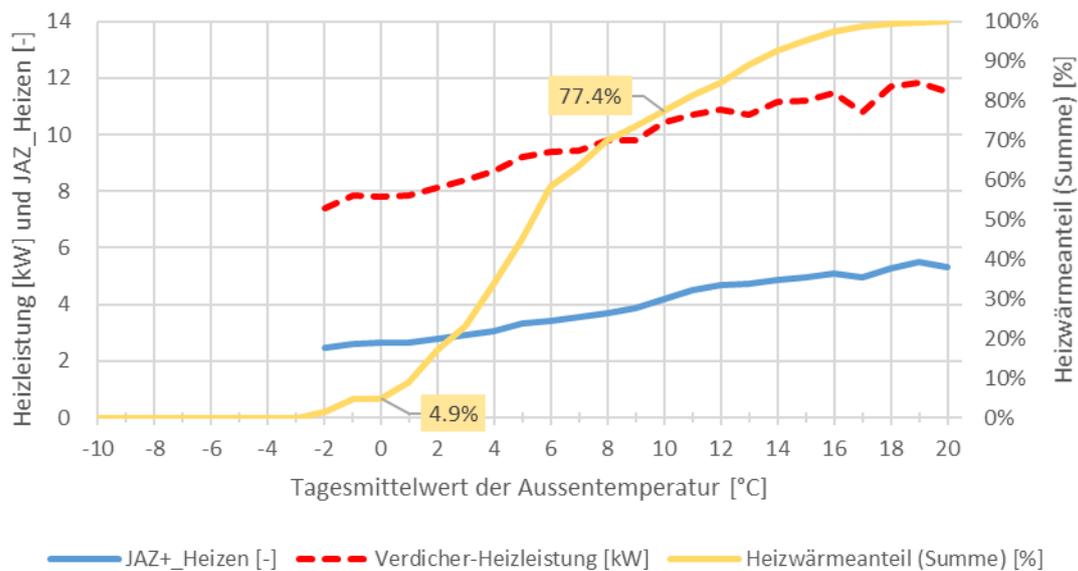


Abbildung 19: JAZ+ im Heizbetrieb, Verdichter-Heizleistung im Betrieb, und Heizwärme-Summenanteil für die Heizsaison 2019/2020 von Objekt 16

2.6 Vergleich der Quellentemperaturen im Heizbetrieb

Abbildung 20 zeigt den Vergleich des durchschnittlichen Temperaturniveaus der Energiequellen Aussenluft (LW) und Erdwärmesonde (SW) in den Betriebsmodi Heizen (gelb) und Heizen mit Aufladung (grün). Bei letzterem werden somit die Quellentemperaturen beim Verdichterbetrieb der gesamten Messperiode berücksichtigt. Daher ergibt sich bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen aufgrund der jahreszeitlich höheren Temperaturschwankungen ein grösserer Unterschied. Dennoch muss beachtet werden, dass der weitaus grösste Energiebedarf im Winter benötigt wird. Interessant sind die ähnlichen Werte der tiefsten Quellentemperaturen. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen müssen jedoch die zusätzlichen benötigten Abtauungen für eine Effizienzbetrachtung berücksichtigt werden. In der Feldmessung wird ausserdem der elektrische Pumpstrombedarf der Quellentemperaturen bei den Erdwärmesonden gemessen. Die Leistung der Ventilatoren der Luft/Wasser-Wärmepumpen werden nicht separat gemessen.

Bei der kältesten Erdwärmesonde handelt es sich um eine Bestandsbohrung. Neue Bohrungen mit einer konservativeren ausgelegten Wärmeentzugsleistung erzielen deutlich höhere Quellentemperaturen gegenüber der Aussenluft. Daher sind insbesondere bei gering sanierten Bestandsgebäude, in Verbindung mit einer benötigten hohen Radiatoren-Vorlauftemperatur, Wärmepumpen mit einer Erdwärmesonde zu bevorzugen. Diese liefern im Heizbetrieb inkl. der tiefen Werte von Anlage 6 eine gesamt um 3.6 Kelvin höhere Quellentemperatur. Bei Anlage 15 ist der Unterschied der beiden Betriebsmodi deutlich höher, da bei dieser Anlage die Aufladung am frühen Nachmittag und somit während der höchsten Tagestemperatur durchgeführt wird. Bei Anlage 1 ist der grosse Unterschied auf den relativ hohen Trinkwarmwasserbedarf des Neubaus und der Belegung zurückzuführen.

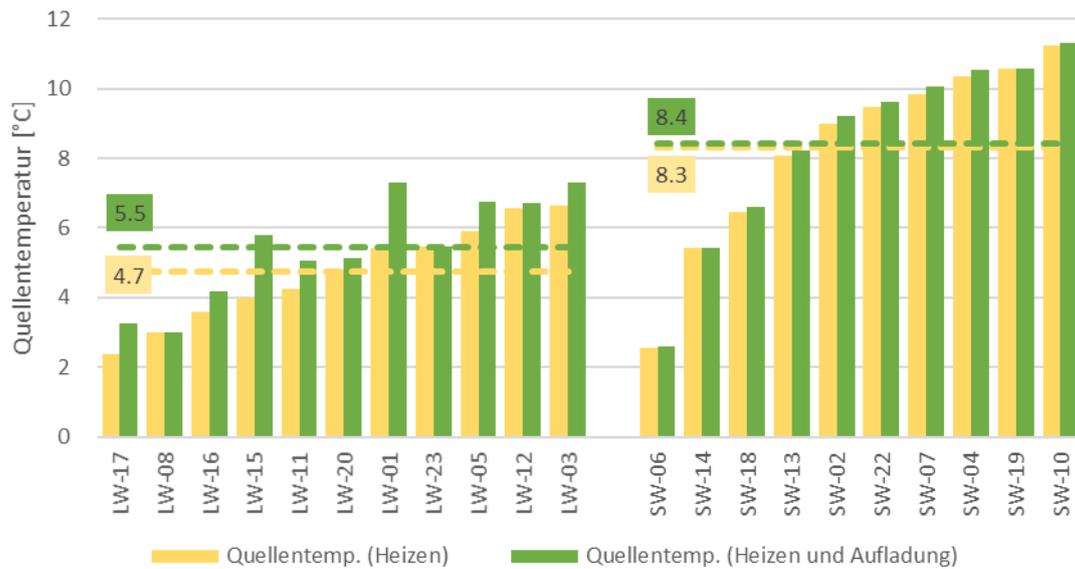


Abbildung 20: Quellentemperaturen im Heizbetrieb und gesamt, getrennt nach Luft/Wasser- (LW) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (SW), aufsteigend sortiert

Mit der folgenden Abbildung 21 werden die Aussentemperaturen der Luft/Wasser-Wärmepumpen im Detail betrachtet. Mit Hilfe der zwei Temperatursensoren, ein Aussentemperaturfühler an der Hausfassade in Nähe des Heizungsfühlers und ein Quellentemperatursensor direkt am Verdampfereintritt kann ein möglicher Luftkurzschluss der Wärmepumpe sowie sog. «Kaltluftseen» auffindig gemacht werden. Um mögliche Fehler aufgrund der Sonneneinstrahlung und Erwärmung der Fassade zu vermeiden, wird in dieser Auswertung nur der Heizbetrieb während der Nacht (22 bis 7 Uhr) berücksichtigt. Deutlich zu erkennen ist der Luftkurzschluss bei Anlage 8, welcher bereits im Feldmessbericht 2018, Kapitel 4.4 thematisiert worden ist. Die hohen Aussentemperaturen resultieren aufgrund der Lage im Föhn geprägten Rheintal sowie der hohen Heizgrenze. Bei Anlage 11 wird die Fortluft ebenfalls senkrecht nach oben ausgeblasen. Diese abgekühlte Luft fällt dann wieder zum Lufteintritt des Verdampfers zurück. Anlage 24 weist noch keine vollständige Heizperiode auf. Anlage 1 (Innenaufstellung im Keller) ist die einzige Anlage, bei welcher die Quellentemperatur höher ist als die gemessene Umgebungstemperatur. Die Ursache hierfür ist unklar, ein Anströmen von kalter Fortluft der Wärmepumpe an den Aussenwandfühler konnte ausgeschlossen werden. Solch ein Effekt verdeutlicht jedoch einmal mehr die Komplexität der Feldmessung und die herausfordernde Interpretation der Messwerte.

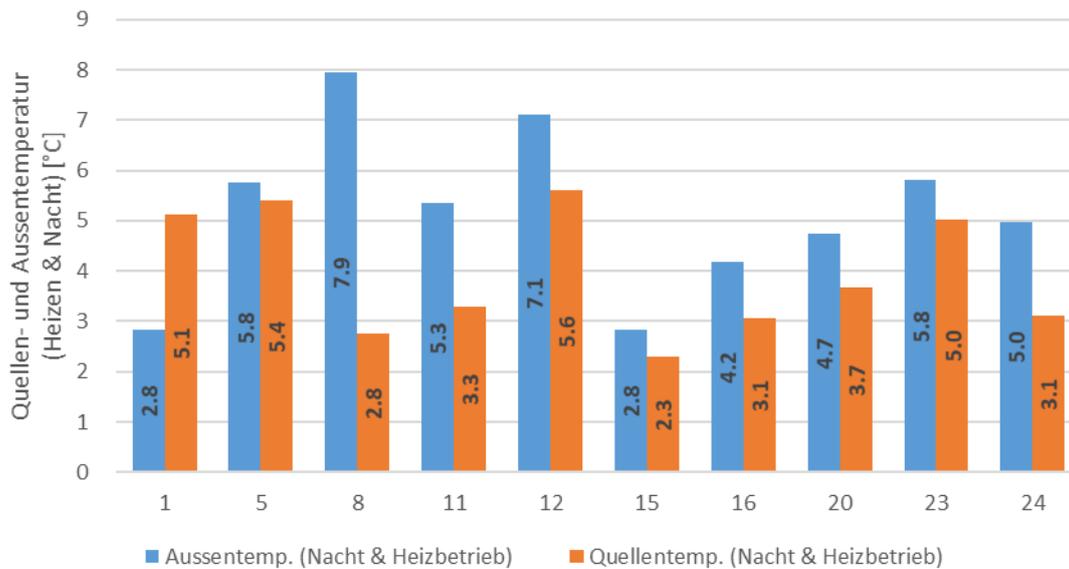


Abbildung 21: Aussentemperaturen und Quelltemperaturen während der Nacht (22 bis 7 Uhr) und im Heizbetrieb der unterschiedlichen Luft/Wärmepumpen in der Heizsaison 2019/2020

2.7 Pumpstrombedarf der Erdwärmesonden

Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen gibt es einen Optimierungskonflikt zwischen einer möglichst kleinen Temperaturspreizung in der Erdwärmesonde zum Erreichen einer höchstmöglichen Verdampfungstemperatur und andererseits dem damit höheren Pumpstrombedarf für den grösseren Volumenstrom. Nach gängiger Praxis und den genormten Prüfstandsmessungen wird eine Temperaturspreizung, also die Temperaturdifferenz zwischen Quelleneintritt und -austritt, von drei Kelvin angestrebt. Je nach spezifischem Druckverlust der Erdwärmesonde, welcher hauptsächlich vom Rohrdurchmesser, der Einzellänge jeder Bohrung und dem Fluid (Glykol oder Wasser) abhängig ist, wird ein unterschiedlicher Pumpstrombedarf bei gleichem Volumenstrom benötigt. Deutlich ist der Unterschied zwischen der wassergefüllten Erdwärmesonde (blau) und die für Wasser geplante tiefe Erdwärmesonde, welche dann jedoch wegen fehlender Freigabe des Wärmepumpenherstellers doch mit Glykol gefüllt worden ist (hellblau). Die Kombination aus hoher Fluidviskosität und tiefer Sondenlänge von 278 m führt bei dieser Anlage zu einem hohen Druckverlust und damit zu einem hohen Pumpstrombedarf. In der Feldmessung ist mit Abbildung 22 der physikalische Zusammenhang dargestellt. Je tiefer die Temperaturspreizung und damit je höher der Volumenstrom, desto grösser ist der elektrische Anteil des Pumpstrombedarfs am Gesamtstrombedarf. Unterschiede resultieren aus der Effizienz der Wärmepumpe, insbesondere der hier nicht berücksichtigten Vorlauftemperaturen.

Insbesondere bei leistungsgeregelten Wärmepumpen ist daher die Anpassung des benötigten Volumenstrom in der Erdwärmesonde (sowie auch auf der Heizkreisseite) durch drehzahlregulierte Umwälzpumpen von grosser Bedeutung. Andernfalls würde der Anteil des elektrischen Strombedarfs für die Pumpen deutlich ansteigen und damit die Effizienz im Teillastbereich deutlich verschlechtern.

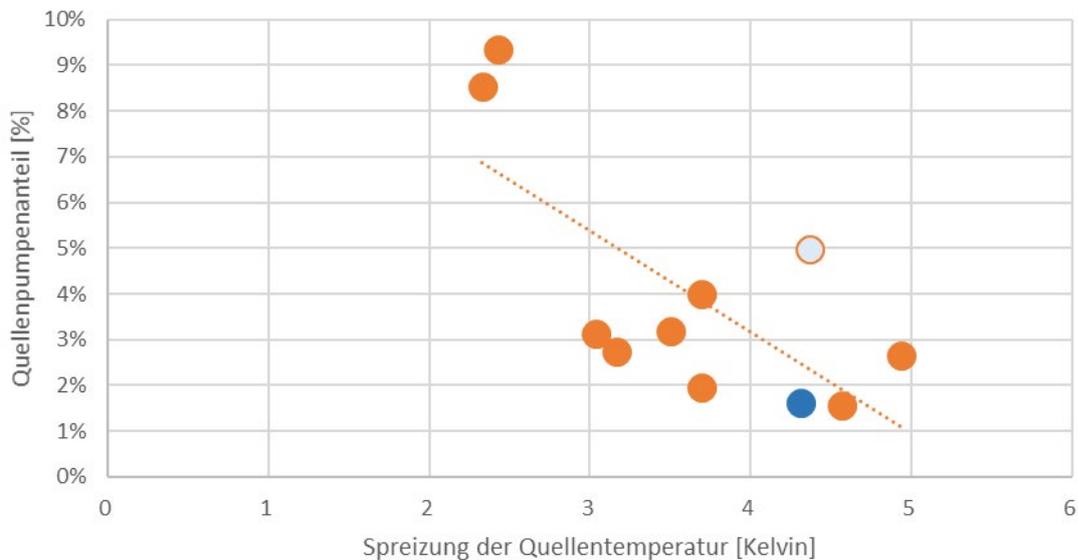


Abbildung 22: Relativer Anteil der Quellenpumpe am gesamten elektrischen Energiebedarf während des Heizbetriebes über die Temperaturspreizung der Quelle bei Erdwärmesonden aufgetragen (Orange Kreise mit Glykol betriebene Anlagen, der dunkelblaue Kreis ist die Wasser-Erdwärmesonde von Anlage 19, der hellblaue Kreis ist die mit Wasser geplante aber mit Glykol umgesetzte Anlage 10).

2.8 Temperaturverlauf der Erdwärmesonden

Bei neu erstellten Erdwärmesonden wird häufig in der Praxis ein deutlicher Temperaturabfall nach den ersten Betriebsjahren angenommen, jeweils abhängig von der Geologie und der Auslegung der Wärmeentzugsleistung und -menge. Mit der Feldmessung können die ersten Anlagen über eine Betriebsdauer von 3 Jahren analysiert werden. Bisher konnte noch bei keiner Erdwärmesonde ein Temperaturabfall festgestellt werden.

Die Erdwärmesonde von Objekt 7 mit einer on/off-Wärmepumpe liefert über einen Jahresmittelwert von 365 Tagen (rote Kurve) eine Quellenvorlauftemperaturen von 11 °C (Abbildung 23). Jeden Sommer erreicht die Erdwärmesonde im Wärmepumpenbetrieb für die Aufladung die 13 °C Maximaltemperatur. Bei diesen Werten handelt es sich um Tagesdurchschnittswerte bei Verdichterbetrieb. Beim Verdichterstart ist die Temperatur aufgrund des Aufstellungsraumes wesentlich höher (bis 20 °C) und stellt nicht die Erdwärmesondentemperatur im Betrieb dar. Aus diesem Grund werden die durchschnittliche Betriebstemperatur und kein Maximalwert ausgewertet. Interessant sind auch die Tagestiefstwerte, typischerweise am Ende einer längeren Kältewelle bei hoher Wärmeentzugsleistung. Hier besteht ein Zusammenhang zur Jahreswärmemenge (oranger Balken). Ein kühlerer Winter wie in der Heizperiode 2017/18 führt zu tieferen Quellentemperaturen.

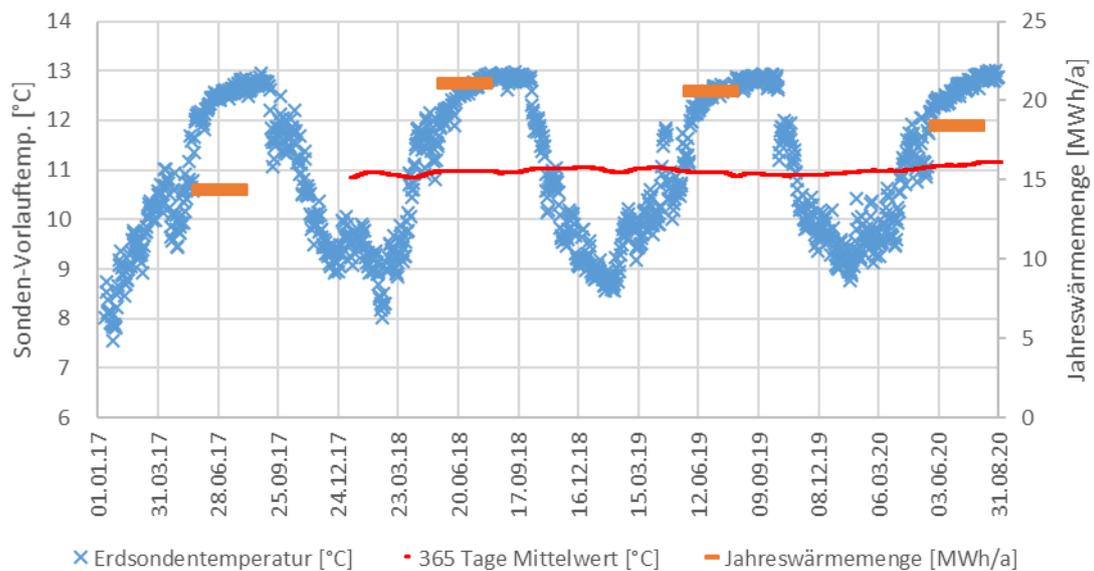


Abbildung 23: Anlage 7 ohne Kühlung bzw. Regeneration der Erdwärmesonde, on/off Wärmepumpe

Bei Objekt 2 in Abbildung 24 ist im Sommer eine passive Kühlung aktiv (eine messtechnische Erfassung der eingebrachten Wärmemenge ist aufgrund der Hydraulik nicht umgesetzt). Somit wird der Erdwärmesonde ausserhalb der Heizperiode nur durch die Aufladung des Trinkwassers Wärme entzogen und gleichzeitig findet eine Regeneration der Erdwärmesonde während des Kühlbetriebs statt. Dadurch sind die hohen Temperaturspitzen im Sommer von fast 15 °C erklärbar. Dieser jahreszeitliche Verlauf spiegelt sich auch im Jahresnutzungsgrad auf Monatsbasis bei der Aufladung des Trinkwarmwassers wieder. Die $JAZ_{\text{Aufladung}}$ ist im Winter bei ca. 2.8 und in den Sommermonaten bei 3.4. Dieser Effizienzunterschied von 20 % spiegelt gut die variierende Quelltemperatur von 6 K wider. Ob die höheren Temperaturschwankungen durch die sommerliche Regeneration bedingt ist oder ob die Erdwärmesonde knapp dimensioniert ist und daher sensitiv auf die hohe Wärmeentzugsmenge im Winter reagiert, kann nicht beurteilt werden. Die Anlage 7 liefert im Vergleich dazu Effizienzwerte für $JAZ_{\text{Aufladung}}$ mit geringerer Varianz im Jahresverlauf von 3.1 bis 3.3.

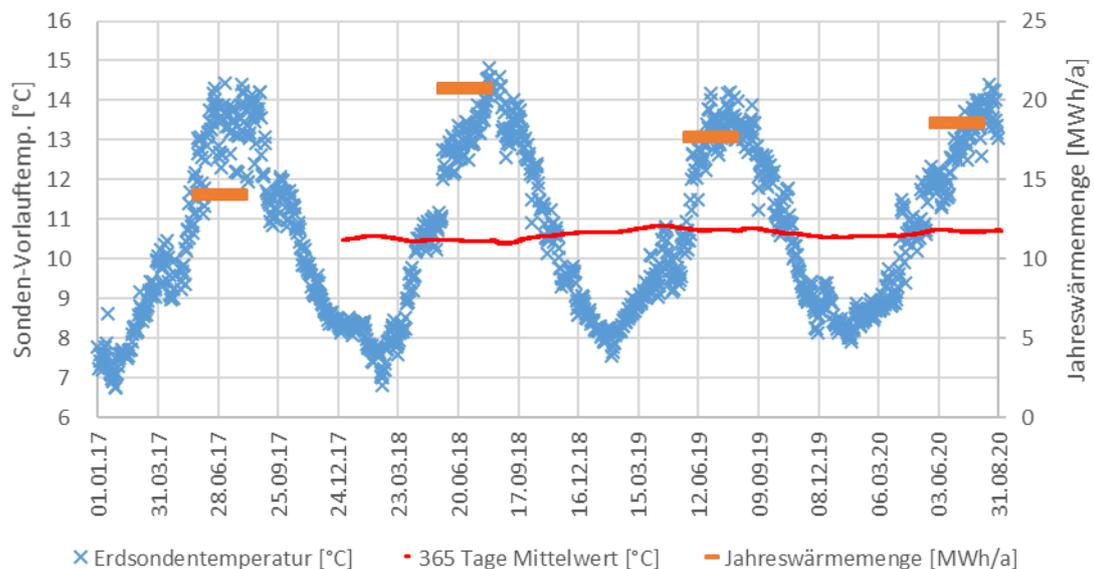


Abbildung 24: Anlage 2 mit passiver Kühlung, leistungsgeregelte Wärmepumpe

2.9 Kühlen mit Wärmepumpen

In der Feldmessung haben die Sole/Wasser-Wärmepumpen 2, 10 und 13 einen passiven Kühlbetrieb mittels Erdwärmesonde. Bei Objekt 2 kann jedoch aufgrund der Hydraulik die Kälteleistung und somit auch die Kühleffizienz nicht bestimmt werden. Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen kühlt nur Anlage 15 aktiv mit Verdichter. Auffällig ist insbesondere bei Anlage 2 der grosse Unterschied zwischen dem Strombedarf der Pumpen und dem Gesamtstrombedarf. Die Differenz benötigt der Verdichter, welcher im passiven Kühlbetrieb zwar nicht in Betrieb ist, aber vermutlich per Kurbelgehäuseheizung oder Inverterfunktion mit gemessen 85 Watt gewärmt wird. Bei Anlage 15 hat der Verdichter für das aktive Kühlen den grössten Strombedarf (nicht in Abbildung 25 dargestellt)

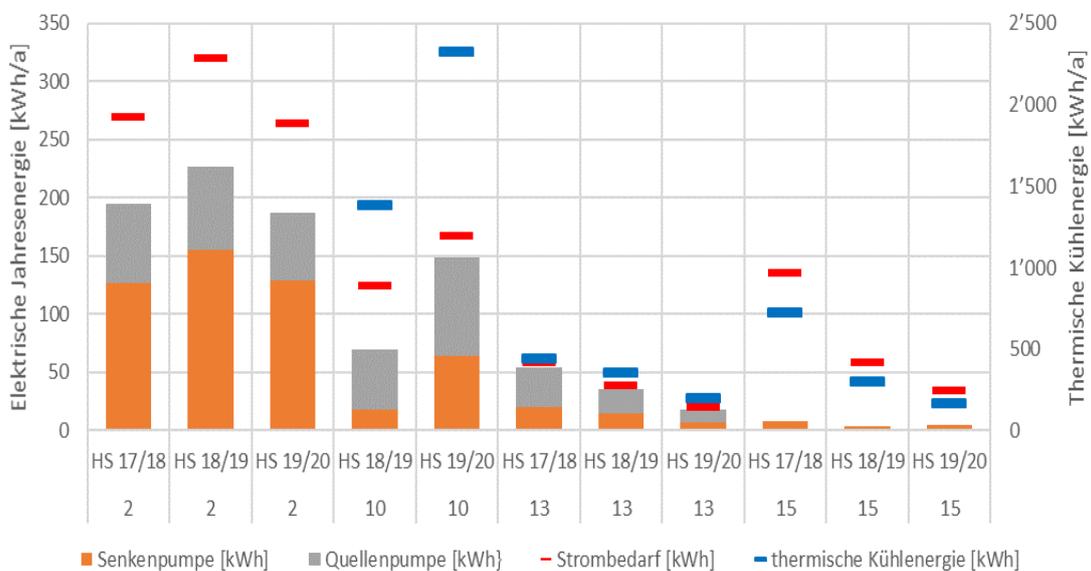


Abbildung 25: Wärmepumpen mit passivem (Erdwärmesonde) und aktivem Kühlbetrieb (Luft/Wasser-Wärmepumpe)

Beim Aktivkühlen der Anlage 15 mittels Verdichter sind die Effizienzwerte um fast Faktor 3, wie in

Abbildung 26 ersichtlich, tiefer. Durch Anpassung der Quellenpumpe bei Objekt 10 konnte die Kühleffizienz ($WNG_{\text{Kühlen}}$) von 11.07 auf 13.91 gesteigert werden.

Bei den Anlagen 13 und 15 konnten durch eine Anpassung der Kühlgrenze die Kühlbetriebszeiten und damit auch thermische Kühlenergie reduziert werden (blaue Balken). Die bemerkenswerte Einsparung erklärt die leichte Abnahme der Kühleffizienz bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe 15, da nun der Verdichter nur bei sehr hohen Aussentemperaturen in Betrieb ist. Interessant bei dieser Anlage ist auch die hohe Kühlleistung, welche annähernd identisch mit der Heizleistung ist. Die Betriebszeiten beziehen sich hier nur auf den aktiven Verdichterbetrieb.

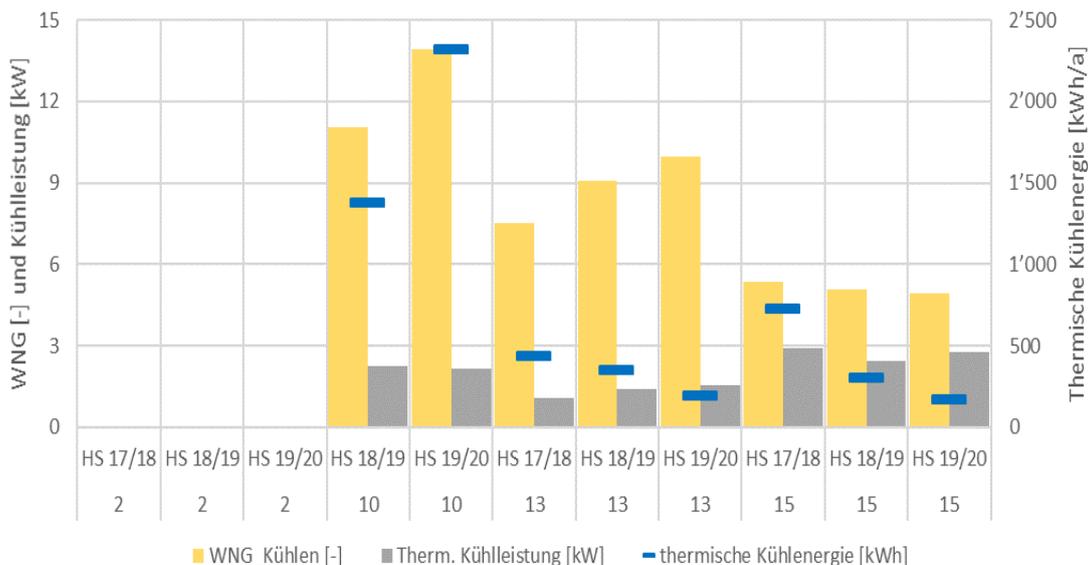


Abbildung 26: Wärmepumpen mit passivem (Erdwärmesonde) und aktivem Kühlbetrieb (Luft/Wasser-Wärmepumpe)

2.10 Vergleich der Trinkwarmwasser-Wärmepumpen

In diesem Unterkapitel werden die Trinkwarmwasser-Wärmepumpen, wie in Abbildung 27 dargestellt, betrachtet. Ein detaillierter Vergleich ist aufgrund der Unterschiede in der Aufstellung und des Benutzerverhaltens nur begrenzt möglich. Anlage 14 bezieht direkt Aussenluft über einen Ansaugkanal. Bei Frosttemperaturen taktet der Verdichter sehr stark: Die Warmwasser-Wärmepumpe kann nur bedingt abtauen, weshalb hier nur noch der Heizstab in Betrieb ist. Bei ausgeschaltener Wärmepumpe erwärmt sich die Luft im Ansaugtrakt, weshalb es zu einem neuerlichen Startversuch des Verdichters kommt. Wenn anschliessend wieder kalte Aussenluft angesaugt wird, schaltet der Verdichter nach nur wenigen Minuten erneut ab. In der vergangenen Heizperiode erfolgten insgesamt knapp 3900 Startvorgänge. Hieraus resultieren die sehr kurzen Aufladezeiten je Start! Wegen des höchsten Wasserbezuges erreicht aber selbst diese Anlage noch einen guten SNG von fast 2. Bei Anlage 23 ist der Aufstellungsraum im Keller sehr klein, sodass dort ebenfalls viel Frischluft verwendet wird. Klassische Kelleraufstellung liegt bei den Objekten 8 und 19 vor, wobei Anlage 19 durch die Entfeuchtung der häufig genutzten Waschküche nach Angaben des Besitzers die Verwendung des Tumblers deutlich reduziert.

Ein Vergleich der Trinkwarmwasser-Wärmepumpen mit den anderen Heizungswärmepumpen und separatem Trinkwasserspeicher ist schwierig, da im SNG das Benutzerverhalten mit dem gezapften Wasservolumen einen grossen Einfluss hat. Prinzipiell weisen die Trinkwarmwasser-Wärmepumpen eine hohe Effizienz auf (durchschnittlicher SNG 2.07) und können insbesondere im Zeitraum ausserhalb der Heizperiode ihr Potential aufgrund fehlender Hydraulik (im Vergleich zur Heizungswärmepumpe) und der wärmeren Quellentemperatur ausspielen. Bei einem kombinierten System besteht zudem die Gefahr einer ungewollten Zirkulation (fehlender Wärmesiphon,

undichte Rückschlagventile) in der Hydraulik, welche die Wärmeverluste stark erhöhen. Bei diesen Systemen mit klassischer Wärmepumpe und separatem Speicher variiert der SNG von 0.35 bis 2.66.

Andererseits kann es bei in Kellern betriebenen Trinkwarmwasser-Wärmepumpe zu einem möglichen «Wärmeklau» kommen, welcher evtl. von der Heizwärmepumpe ausgeglichen wird.

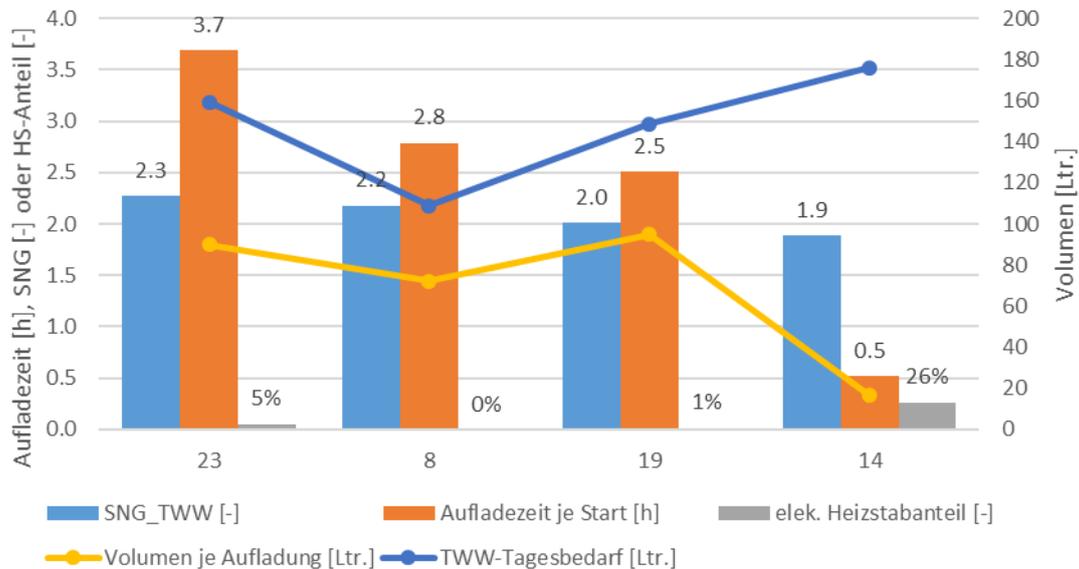


Abbildung 27: Trinkwasser-Wärmepumpen im Überblick, Heizperiode 2019/20

3 Optimierungen und Erkenntnisse

Die Beobachtungen bei den neu aufgenommenen Anlagen decken sich mit der bisherigen Erfahrung aus über 4 Jahren Feldmessung. In vielen Fällen fehlt den Bewohnern oder Anlagebetreibern ein Grundlagenverständnis zum Betrieb der Heizungsanlage, insbesondere bei der Umstellung von einem fossil betriebenen Heizkessel auf Wärmepumpentechnologie. In den seltensten Fällen findet ein vertieftes Einarbeiten in den Regler der Wärmepumpe statt und solange der Komfort nicht eingeschränkt ist, wird die Anlage häufig nicht optimiert. Störungen werden z.B. erst bei einer Komforteinbusse bemerkt, wenn der Heizstab als Ersatzwärmeerzeuger nicht genügend Leistung liefert (siehe Kapitel 3.2, Anlage 24). Die Bewohner in Objekt 23 sind bei der Inbetriebnahme der Wärmepumpe nicht über die Bedienung des Raumbediengerätes und der Heizungsanlage instruiert worden.

Nach über einer Messperiode konnten bei den folgenden Anlagen einige Optimierungen durchgeführt werden: Bei Anlage 20 ist das tägliche Aufladefenster für das Trinkwarmwasser von nachts auf den frühen Abend zu Beginn des Niedertarifs bei höheren Aussenlufttemperaturen verschoben worden. Zusätzlich hat der Installateur den fehlenden Siphon am Speicherabgang nachgerüstet. Ebenfalls konnte bei Anlage 22 das Legionellenprogramm und der Heizstab für die Aufladung angepasst werden (Kapitel 3.2). Bei Anlage 23 konnte deutlich die Heizgrenze angepasst werden. Die Wärmepumpe wird nun nach der Instruktion der Bewohner bedarfsgerecht händisch in den Winterbetrieb ein- bzw. ausgeschaltet. Zusätzlich konnte durch eine Umparametrierung die Leistungsmodulation des Verdichters erst aktiviert werden, zuvor lief die Wärmepumpe im starken taktbetrieb.

In den folgenden Unterkapiteln sollen die getätigten Optimierungsmassnahmen aus dem Vorjahr analysiert werden. Als grosse Herausforderung stellt sich dabei der reale Feldbetrieb mit vielen unbekanntenen Veränderungen und gegenseitigen Einflussfaktoren heraus. So gibt es Veränderun-

gen in der Belegung der Objekte, auch Anpassungen am Heizungsregler werden häufig nicht rückgemeldet. Eine gesamthafte Nachverfolgung jeglicher Änderungen bei allen Anlagen ist aufgrund des hohen Aufwandes leider nicht möglich.

3.1 Einfluss von Optimierungsmassnahmen auf die Effizienz

Die Anlagen der Feldmessung werden im ersten Jahr ohne Veränderungen von unserer Seite ausgemessen. Ausnahmen betreffen nur grobe Fehler bei der Inbetriebnahme oder Störungen (stark erhöhter oder ausschliesslicher Betrieb per Heizstab). Anhand der Datenauswertung aus dem ersten Betriebsjahr werden verschiedene mögliche Optimierungsmassnahmen eruiert. Diese werden dann den Eigentümern vorgestellt und nach Möglichkeit umgesetzt. Die Massnahmen betreffen angepasste Einstellungen im Wärmepumpenregler oder andere Fühlerpositionen. Die messtechnisch erfassten Auswirkungen der Optimierungsmassnahmen der Wärmepumpenanlage werden nach Abschluss einer gesamten Heizperiode in einem nächsten Bericht betrachtet. Bereits jetzt kann angemerkt werden, dass einige Massnahmen den Energiebedarf verringern, aber aufgrund der dann ungünstigeren Betriebspunkte die Effizienzkennwerte verschlechtern. Kann z. B. insbesondere bei Luft/Wasserwärmepumpen die Stromaufnahme durch eine tiefere Heizgrenze in der Übergangszeit reduziert werden, verschlechtert sich die Jahres-Effizienz im Heizbetrieb, da der Heizanteil bei hohen Aussentemperaturen und niedrigen Senkentemperaturen abnimmt. Ähnlich kann beim Trinkwarmwasser durch einen sparsamen Wasserverbrauch oder eine tiefere Belegung der Wohnung der Systemnutzungsgrad SNG deutlich sinken, da die konstant auftretenden Wärmeverluste prozentual stärker ins Gewicht fallen. Trotzdem sind solche Massnahmen eindeutig sinnvoll und sparen Primärenergie.

3.2 Analyse und Bewertung von Einzelobjekten

Aussagen zum Erfolg einer getätigten Optimierungsmassnahme sind häufig nur eingeschränkt möglich, da sich verschiedene Einflussfaktoren im Feld gegenseitig beeinflussen und somit die Messresultate nicht eindeutig interpretierbar sind. Bei manchen Anlagen ist z.B. das Legionellenprogramm nachträglich aktiviert worden, andere Objekte weisen einen stark reduzierten Trinkwarmwasserbedarf während der Optimierungsbetrachtung auf (verringerte Personenbelegung). Diese und weitere Effekte beeinflussen die Effizienzwerte, sodass die Optimierungsmassnahmen oft nur theoretisch belegt werden können. Z. B.: eine gemessene verringerte Anzahl an Aufladevorgängen für das gleiche Trinkwarmwasservolumen /-energie senkt die Wärmeverluste in der Rohrhydraulik von der Wärmepumpe und ein tieferes Auskühlen des Speichers bringt niedrigere Vorlaufemperaturen zu Beginn der Aufladung, siehe Anlage 1.

Im Folgenden werden einzelne durchgeführte Optimierungsmassnahmen genauer betrachtet und bewertet:

Bei Anlage 1 konnte durch eine höhere Platzierung des Fühlers im Trinkwarmwasserspeicher die Aufladeanzahl deutlich verringert werden. Von nur 84.5 l gezapften Trinkwarmwasser je Aufladung auf 119 l oder von täglich drei auf nur noch zwei Ladevorgänge. Ab September 2019, nach einem Servicetechnikerbesuch, wurde jedoch das wöchentliche Legionellenprogramm aktiviert. Diese Thematik wurde während der ersten zwei Jahre nie mit den Bewohnern angesprochen. Der elektrische Energieanteil des Heizstabes für die Warmwasserladung beträgt nun ca. 12 %. Auch bei anderen Anlagen ist die Unsicherheit der Legionellenthematik spürbar und es können häufige Änderungen in dieser Programmeinstellung bemerkt werden.

Durch eine spätere Aktivierung des wöchentlichen Legionellenprogramms ist eine Bewertung der Effizienzverbesserung durch die vergrösserte Fühlerhysterese und die geringere Aufladehäufigkeit nur bedingt möglich. Die JAZ+ hat sich bei gleicher mittlerer Aussenluft- und Zapfwassertemperatur um 3.5 % verbessert. Dennoch profitiert die Wärmepumpe durch das stärkere Abkühlen des Speichers von anfangs tieferen Kondensationstemperaturen. Zusätzlich werden die Wärmeverluste in der Rohrhydraulik durch die geringere Aufladeanzahl reduziert.

Die durchgeführte Reduzierung der Heizgrenze von 18 auf 16 °C hat leider keine merkliche Reduzierung des Heizwärmebedarfs in der Übergangszeit bewirkt (Tabelle 3). Hier wäre zu prüfen, ob diese nicht wieder auf die Standardeinstellung angehoben worden ist, da sich die Einschalthäufigkeit bei hohen Aussentemperaturen nicht verändert hat.

Tabelle 3: Vergleich Heizwärmebedarf in der Übergangszeit, Veränderung von 2017/18 auf 2019/20 mit leichter Optimierung der Heizgrenze

HS 2019/20		> 12 °C	> 13°C	>14 °C	> 15°C	> 16 °C	> 17 °C	> 18 °C
Heizwärmebedarf [kWh]	8444	811	563	388	214	115	69	26
Anteil [%]	100%	10%	7%	5%	3%	1%	1%	0%
HS 2017/18		> 12 °C	> 13°C	>14 °C	> 15°C	> 16 °C	> 17 °C	> 18 °C
Heizwärmebedarf [kWh]	10340	1248	936	551	299	174	76	19
Anteil [%]	100%	12%	9%	5%	3%	2%	1%	0%

Bei diesem Neubauobjekt beträgt der projektierte Heizwärmebedarf 45.5 kWh/m², gemessen worden sind in den 3 Heizsaisons tiefere Werte von 37.3 bis 30.5 kWh/m². Wie bei den anderen Neubauten ist auch hier noch der vorhandene Wärmebedarf von ca. 10 % des Gesamtbedarfs in der Übergangszeit bei Tagesmitteltemperaturen von über 12 °C feststellbar. Da Luft/Wasser-Wärmepumpen in dieser Übergangszeit eine sehr hohe Effizienz aufweisen, ist das Einsparpotential an Primärenergie aber deutlich geringer.

Bei der Betrachtung verschiedener Wärmepumpenhersteller konnte keine einfache, effiziente und komfortoptimierte Regelung der Heizgrenze beobachtet werden. Einige Modelle verfügen über eine leichte Dämpfung der Aussentemperatur, andere verwenden die tatsächliche Temperatur und heizen auch morgens an kühlen Sommertagen. Insbesondere bei den einfachsten Regelungen ist eine händische Umschaltung vom Winter- / Sommerbetrieb sinnvoll. Dabei sollte jedoch insbesondere die Abschaltung im Frühjahr nicht vergessen werden, im Herbst hingegen spürt jeder Bewohner den Komfortverlust und schaltet dann die Heizung nach Bedarf ein. Bei Mehrfamilienhäusern müsste diese Arbeit von einem Hauswart übernommen werden. Eine zuverlässige Automatisierung in der Software-Steuerung wäre wünschenswert.

Bei Anlage 5 konnte, wie im Bericht 2019 bereits erwähnt, keine Optimierung der Heizkurve durchgeführt werden. Der Heizungsfühler für die Aussentemperatur war zu Beginn an der Ostfassade mit Sonneneinstrahlung montiert. Eine gesenkte Heizkurve konnte jedoch den Komfortansprüchen der Bewohner in der Übergangszeit nicht gerecht werden. Dies resultierte in zu geringen Raumtemperaturen in der Übergangszeit und beendete das Optimierungsvorhaben. Bemerkenswert ist hier der Vergleich zu Objekt 1 (siehe Tabelle 4). Bei beiden Objekten handelt es sich um Neubauten in der gleichen Region mit der gleichen on/off Luft/Wasser-Wärmepumpentechnologie und Hersteller, Objekt 5 hat jedoch einen grossen Heizungsspeicher und einen gemischten Heizkreis. Die hohen Vorlauftemperaturen sind ab der Wärmepumpe in den Speicher gemessen.

Tabelle 4: Vergleich ähnlicher Objekte 1 und 5 mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe im Rheintal

Kennziffer	Objekt 1	Objekt 5
Vorlauftemperatur WP	30.50 °C	39.29 °C
Quellentemperatur WP Heizbetrieb	5.44 °C	5.92 °C
JAZ Heizen	3.70	3.30
WNG Heizen	3.44	3.07

HWB	30.48 kWh/m ²	47.45 kWh/m ²
-----	--------------------------	--------------------------

Ob der deutlich höhere Heizwärmebedarf bei Objekt 5 gebäudetechnisch bedingt ist oder durch ein anderes Benutzerverhalten mit höhere Wohnraumtemperatur und Lüftungsverhalten, kann mit der Feldmessung der Wärmepumpen nicht bestimmt werden.

Bei Anlage 8 konnte der bereits im Jahresbericht 2018 (Kapitel 4.4) festgestellte Luftkurzschluss im Vergleich zu den anderen Anlagen durch eine weitere Auswertung nochmals bestätigt werden. Dies verursacht eine verminderte Effizienz von abgeschätzten 10 %. In Abbildung 21 (Kapitel 2.6) erkennt man die höchste Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Lufteintritt in den Verdampfer während des Heizbetriebes in der Nacht.

Bei der neu aufgenommenen Anlage 12 kann durch die hochauflösende Messtechnik im 10s Speicherintervall

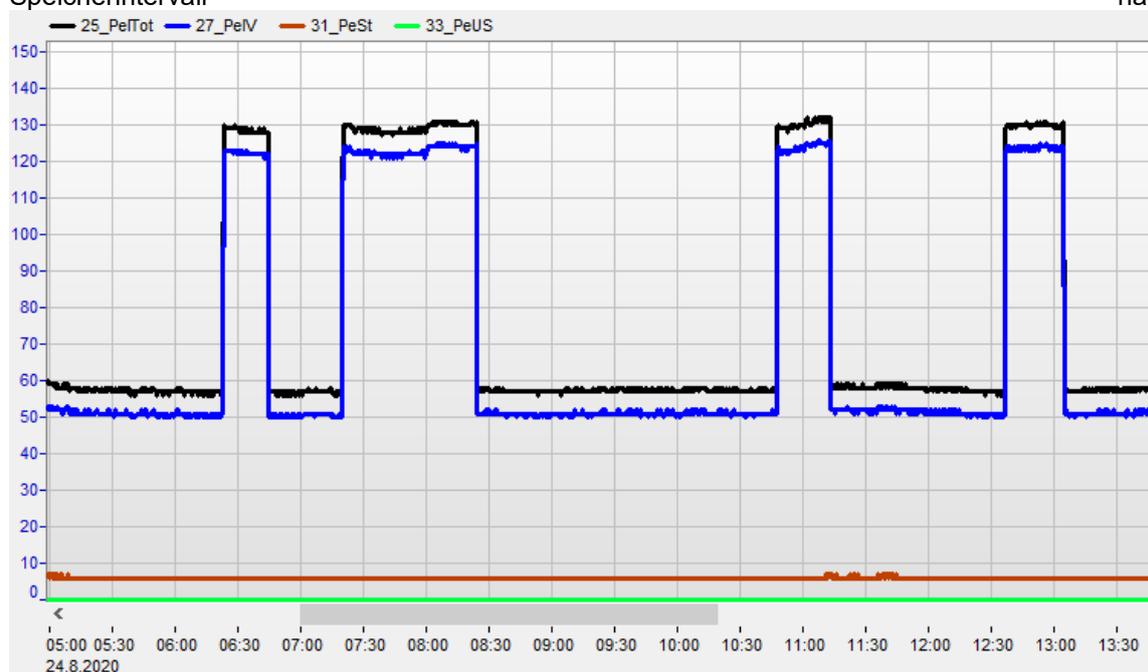


Abbildung 28 ein sehr hoher Standbystrom, selbst im Sommer ohne Verdichterbetrieb, festgestellt werden. Bei der Wärmepumpe handelt es sich um eine leistungsmodulierende Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Aussenauftstellung. Welche Ursache die permanent hohe Verlustleistung von 50 Watt und periodisch von über 120 Watt beim Inverter oder Verdichter hat, ist derzeit noch in Abklärung mit dem Hersteller und wird im Folgebericht erklärt.

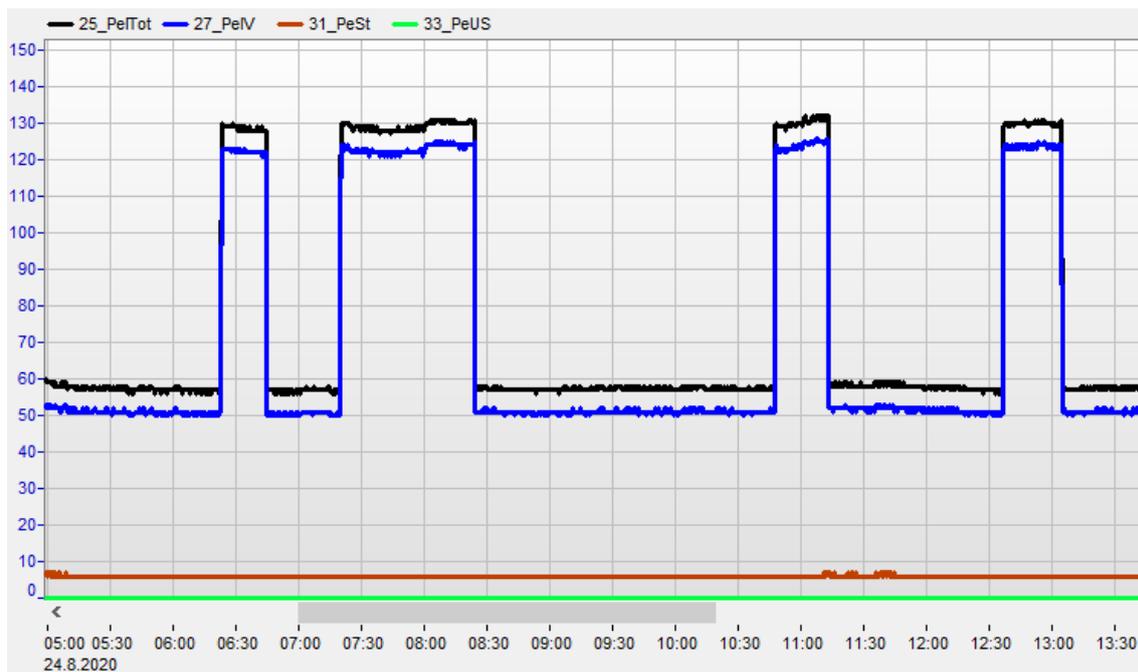


Abbildung 28: Elektrischer Leistungsbezug von Steuerung (PeSt), Verdichter mit Inverter (PeIV) und gesamt (PeTot), Darstellung mit Green Eye – Writer Standard

Zur Konkretisierung, im Juli 2020 hat die Wärmepumpe $142 \text{ kWh}_{\text{el}}$ Energie während den 31 Tagen bezogen. Im gleichen Zeitraum sind jedoch nur 56.3 kWh an thermischer Energie für das Trinkwarmwasser ab Speicherabgang bezogen worden. Somit beträgt der wahre SNG inklusive diesem hohen Standbystromverbrauch nur 0.4 und ist damit eindeutig schlechter als ein elektrischer Durchlauferhitzer. Als Hinweis zur angewendeten Systemgrenze: Findet keine Aufladung statt, werden die elektrischen Stromverbräuche dem Betriebsziel Heizen zugeordnet, siehe Kapitel 1.2. In den gesamten Jahreseffizienzkennzahlen JAZ+ und WNG sind diese Standbyverluste berücksichtigt.

Bei Anlage 16 konnten trotz eines geringeren Warmwasserbedarfs durch verschiedene Anpassungen die Effizienz der Aufladung sowie der SNG gesteigert werden. Durch eine grössere Fühlerhysterese werden nun durchschnittlich je Aufladung 116 l anstatt zuvor nur 75 l des 476 l grossen Speichers nachgeladen. Hier wäre sicherlich noch eine weitere Optimierung möglich, doch die Gefahr einer Komforteinschränkung bei einem grossem Zapfbedarf stellt ein gewisses Risiko dar. Unter Berücksichtigung der höheren Quellentemperaturen (1.5K) konnte die JAZ_Aufladung, bedingt durch die tiefere mittlere Aufladetemperatur der Wärmepumpe (Senkenvorlauftemperatur während der Aufladung), von 3 K um insgesamt 15 % gesteigert werden. Durch Anpassungen des Installateurs an der Zirkulationsleitung konnte der SNG von niedrigen 1.4 auf 2 gesteigert werden.

Bei Anlage 22 verhalf die genaue Messtechnik einen Fehler im Betrieb des Heizstabs im Trinkwarmwasserspeicher festzustellen. Beim täglich durchgeführten Legionellenprogramm konnten immer häufigere Taktungen des Heizstabs festgestellt werden. Schlussendlich konnte das zeitbegrenzte Legionellenprogramm nicht mehr vollständig durchgeführt werden, die Zapftemperaturen war deutlich tiefer also vor dem ordnungsgemässen Betrieb. Der Servicefachmann konnte eine komplette Verkalkung des Heizstabs feststellen. Hierbei stellt sich wieder die Frage und Problematik mit dem Umgang der Legionellenthematik. Nur das reine Einstellen eines Legionellenprogrammes garantiert keine dauerhafte Ausführung mit dem gewünschten Temperaturniveau.



Abbildung 29: Komplett verkalkter Heizstab nach keiner kompletten Heizperiode

Ergänzend ist auch die Ungenauigkeit des manuell einzustellenden Thermostaten am Heizstab zu erwähnen. Nach Aussagen des Servicetechnikers war die eingestellte Temperatur 5 K höher als die tatsächlich gemessene Zapftemperatur. Des Weiteren ist eine allgemein vorherrschende Schwierigkeit der Ansteuerung des externen Heizstabes durch die Wärmepumpe zu nennen. Obwohl viele Wärmepumpensteuerungen ein Legionellenprogramm mit Vorheizen des Verdichters und erst danach die Ansteuerung des Heizstabes vorsehen, werden im Feld viele Heizstäbe nach Zeitkriterien oder im Niedertarif freigeschaltet (ohne Vorheizung durch die Wärmepumpe). Durch die tiefe Platzierung des Heizstabes wird häufig der gesamte Speicherinhalt erwärmt und bei geringem Trinkwarmwasserbezug erfolgt bis zum nächsten Legionellenprogramm am Folgetag nur selten eine Aufladung mit der Wärmepumpe. Dadurch erfolgt fast die gesamte Aufladung durch den Heizstab. Bei dieser Problematik fehlt häufig ein Zusammenspiel von Elektroinstallateur, Heizungsfachmann und Wärmepumpenservice.

Bei Objekt 23 war die Heizgrenze sehr hoch eingestellt, wodurch die Wärmepumpe auch an kühlen Sommertagen geheizt hat. Die Hausbewohner hatten sich nicht eigenständig mit dem Heizungsregler befasst, es erfolgte zudem keine Instruktion bei der Inbetriebnahme für das Raumbediengerät. Dieses Objekt wird nach Abschluss dieser Heizperiode optimiert und könnte ein hohes Optimierungspotential aufweisen. Bemerkenswert ist auch der sehr hohe Heizwärmebedarf von 117 kWh/m², obwohl hier eine Bauweise von 1995 nach Minergiestandard vorliegt.

Bei der Wärmepumpenanlage 24 ist am 16.05.2020 eine Störung mit Blockierung der Anlage aufgetreten. Obwohl diese in der Waschküche platziert ist und die Fehlfunktion durch eine rote LED signalisiert wird, ist die Störung den Bewohnern nicht aufgefallen. Erst aufgrund unserer Intervention wurde am 09.06.2020 die Störung durch einen Reset der Wärmepumpe behoben. Die Aufladung des Trinkwarmwassers erfolgte in dieser Zeit ohne Komforteinschränkungen per Heizstab. Eine automatische Fehlermitteilung mittels App oder SMS wäre bei diesem Wärmepumpenmodell möglich, ist jedoch nur als kostenpflichtige Option bestellbar.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die häufigsten und einfachsten Möglichkeiten für eine Energieeinsparung entstehen bei der Inbetriebnahme mit der Einstellung der Regelung der Wärmepumpenanlage. Des Weiteren wird im folgenden Betrieb durch mangelndes Wissen oder Interesse der Betreiber bzw. Bewohner mögliches Einsparpotential nicht genutzt. Insbesondere der Kontakt mit Anlagenbetreibern hat das Verständnis sowie das Bewusstsein für Optimierungsmaßnahmen gestärkt. Oft ist den Benutzern der Zu-

sammenhang der Reglereinstellungen und deren Auswirkung auf die Energieeffizienz und den Energieverbrauch nicht klar.

Obwohl ein Interesse zum Energieeinsparen vorhanden ist, haben sich nur wenige Personen vor der Optimierung mit der Wärmepumpe und den Reglereinstellungen eigenständig befasst. Im Alltag gerät die Wärmeerzeugung im Gebäude in Vergessenheit oder wird als Selbstverständlichkeit wahrgenommen. Häufig wird die Anlage mit den Standardeinstellungen betrieben, insbesondere gilt dies für die Heizgrenze und die Einstellungen für die Aufladung des Trinkwarmwassers, welche herstellerseitig stets auf höchstem Komfort (sofortige und leistungsstarke Nachladung nach geringen Zapfmengen) ausgelegt ist. Fehlerhafte Einstellungen oder Installationen bleiben nach der Inbetriebnahme ohne ein Monitoring unentdeckt, sofern die Behaglichkeit für die Bewohner nicht beeinträchtigt wird.

Insbesondere die Betrachtungen in Kapitel 3 sollen jedoch zu keinem falschen Eindruck bzw. Verallgemeinerung führen. Der Grossteil der Anlagen ist ordentlich installiert und arbeitet störungsfrei mit hoher Energieeffizienz.

Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen ist in der letzten Heizperiode ein durchschnittlicher WNG für Heizen und Aufladung von beachtlichen 3.3 (von 3.0 bis 4.1) gemessen worden, Sole/Wasser-Wärmepumpen überbieten diese Werte mit durchschnittlich 4.2 (von 3.1 bis 5.1). Bei der Anlage mit der geringsten Effizienz handelt es sich um Objekt 12 mit einer leistungsvariablen Luft/Wasser-Wärmepumpe, welche die höchste durchschnittlich gemessene Vorlauftemperatur in der Feldmessung von 42.4 °C bereitstellen musste. Die Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt beträgt 55 °C. Zusätzlich ist der WNG von 1.7 für die Aufladung durch den sehr hohen Anteil des Elektroheizstabes für das Legionellenprogramm der tiefste ermittelte Wert. Das Objekt befindet sich in der ersten Messperiode und ist daher noch nicht optimiert worden. Dennoch soll nochmals die generelle effiziente Austauschbarkeit von bestehenden fossilen Heizungsanlagen durch eine Wärmepumpe hervorgehoben werden. Voraussetzungen sind jedoch stets eine gute Planung, fachmännische Installation und ausführliche Instruktion der Bewohner.

Mittels der hochauflösenden und genauen Messtechnik konnte bei einigen Anlagen eine Fehlfunktion oder ungenutztes Energieeinsparpotential erkannt werden. So zeigen auch später durchgeführte Softwareupdates manchmal unerwünschte Veränderungen des Anlagenverhaltens, die dem Bewohner nicht auffallen (können).

Seit dem letzten Bericht zur Feldmessung vom 12. Dezember 2019 konnten 8 weitere Wärmepumpen-Anlagen (Objekte 17 bis 24) in die Feldmessung aufgenommen werden. Alle bisher bestehenden Wärmepumpen-Anlagen werden weiterhin ausgemessen. Die ständig wachsende Datenbank mit nun bis zu 4 Heizperioden von den ersten Anlagen bietet immer umfangreichere Auswertungsmöglichkeiten über einen längeren Zeitraum, sodass u.a. auch Klimaeffekte, wie ein wärmerer Winter oder das Langzeitverhalten von Erdwärmesonden analysiert werden können. Dank der Zugänglichkeit der erstellten Datenbank verwenden vermehrt auch andere Hochschulen und Forschungsinstitutionen die umfangreichen Messdaten für weitere Projekte. Somit bietet diese Feldmessung ein weit grösseres Forschungspotential und beschränkt sich nicht nur auf die Bestimmung der Effizienz von Wärmepumpen im Feld.

An der 26. Tagung des Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik des Bundesamtes für Energie in Burgdorf sowie am 21. Brenet Status-Seminar in Aarau konnte die Feldmessung vorgestellt und Ergebnisse präsentiert werden. Die bereits Ende 2019 geplanten zusätzlichen Publikationen über Erkenntnisse der Feldmessungen haben sich auf Grund von Covid19 verschoben. Zeitnah wird eine Artikelserie in der Fachzeitschrift «Planer & Installateur» erscheinen.

Ab 2020 sollen jährlich nur noch kleinere Mehrfamilienhäuser mit einer Heizlast von bis zu 100 kW in die Messkampagne aufgenommen werden. Die derzeitige Akquise gestaltet sich jedoch schwierig, nicht nur wegen der anhaltenden Covid19-Lage. Im Gegensatz zu den aufgenommenen Einfamilienhäusern, bei denen die Eigentümer zumeist die Bewohner sind und ein Eigeninteresse an der Beurteilung sowie möglichen Verbesserungsmassnahmen haben, sind die Interessen bei MFH anders ausgeprägt.

Mögliche Interessenten für solch eine Feldmessung werden gerne gebeten, sich beim Leiter des Wärmepumpentestzentrums, Mick Eschmann mick.eschmann@ost.ch / www.wpz.ch, für weitere Informationen zu melden.

5 Anhang

5.1 Methodik und Messequipment

Die Messausrüstung für die 23 bisher umgesetzten Anlagen in der Feldmessung ist bis auf wenige Details identisch. Bei jeder Wärmepumpenanlage wird ein Schaltschrank verbaut, der u.a. eine SPS (Speicherprogrammierte Steuerung) und Stromwandler für die Messung der Aufnahmeleistungen eingebaut hat. Die Abbildung 30 zeigt beispielhaft den Aufbau des Schaltschranks der WP-Anlage F019_2019_SW.

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

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

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

Darin sind:

- Q Heizleistung (Aufladeleistung) [kW]
- T_{VL} Vorlauftemperatur (Austrittstemperatur für Aufladung) [°C]
- T_{RL} Rücklauftemperatur (Eintrittstemperatur für Aufladung) [°C]
- c_p spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg K)], bzw. 4.181 kJ/(kg K)
- $\rho_{(T_{RL})}$ Dichte des Trägermediums beim Rücklauf [kg/m³]
- V Volumenstrom [m³/s]

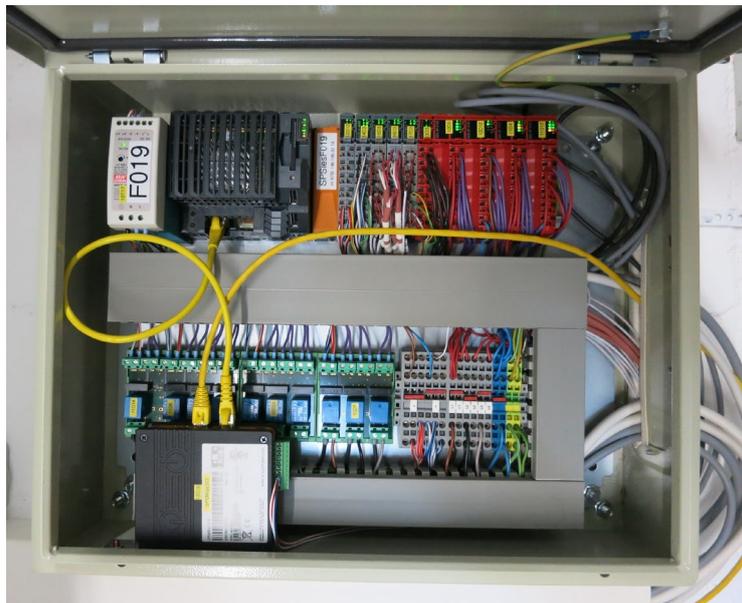


Abbildung 30: Schaltschrank der Messanlage F004_2017_SW

Je nach Situation wird der Volumenstromzähler im Rücklauf bzw. im Vorlauf montiert. Sofern es möglich ist, wird für das Heizen und die Aufladung derselbe Zähler verwendet. Bei einer Anlage (F002_SW_2016) mussten für beide Hydraulikkreise je ein Zähler eingebaut werden. Die Temperaturen werden mithilfe eines PT-100 (4-Leiter-Technik) direkt gemessen. Dabei werden verschiedene Temperaturpositionen doppelt ermittelt, um die Redundanz zu gewährleisten. Ein Volumenstromzähler und die Temperaturmessung (Laboraufbau) sind in Abb. 31 ersichtlich.

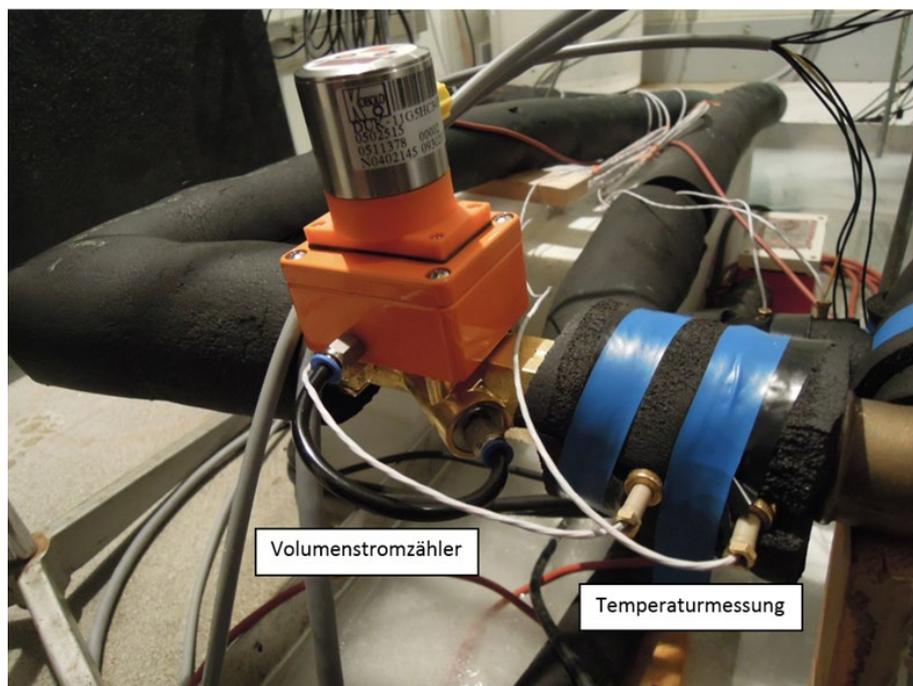


Abbildung 31: Volumenstromzähler und Temperaturmessung (Laboraufbau)

Die gesamten Daten werden auf einem Server in der Schweiz auf 5 Datenbanken gespeichert (mySQL 5.5.40). Der Aufbau ist relational, d.h. jede Information ist nur einmal in einer der fünf Datenbanken bzw. deren Tabellen enthalten. Dadurch können die Daten sehr einfach aktuell und konsistent gehalten werden. Veränderbare Stammdaten enthalten noch zusätzlich eine Kennzeichnung, ab wann Sie jeweils gültig sind (z.B. "Anzahl Personen im Haushalt = x" - „Valid Since: dd.mm.yyyy“). Aus Datenschutzgründen erfolgt die Verlinkung zu den personenbezogenen Daten über eigens generierte IDs, wodurch die personenbezogenen Daten in den anderen Datenbanken nicht im Klartext ersichtlich sind (siehe beispielhaft Abbildung 32).

objectId	objectypeld	buildingId	ownerId	operatorId
2	1	cb8f24e9-fc9d-11e5-9e4e-e83935bf2820	cb8f24e9-fc9d-11e5-9e4e-e83935bf2820	cb8f24e9-fc9d-11e5-9e4e-e83935bf2820
3	1	72c04fe3-56e3-11e5-aa50-002564bce6f0	72c04fe3-56e3-11e5-aa50-002564bce6f0	72c04fe3-56e3-11e5-aa50-002564bce6f0
1205	1	1a9e0570-696d-46e1-9676-749fb57b339c	4b375b0f-b0cc-422f-b026-606f7226ee70	4b375b0f-b0cc-422f-b026-606f7226ee70
1206	1	4bf7ed88-14f6-4ed8-a03c-e882b6f9bdd2	e7735508-e761-4c48-acd4-48a609acb478	e7735508-e761-4c48-acd4-48a609acb478

Abbildung 32: Ausschnitt aus der Objekt-Datenbank „wpfeldme_obj“. Personendaten erscheinen nicht im Klartext und können somit nicht direkt zugeordnet werden

Folgende 5 Datenbanken sind vorhanden:

- „wpfeldme_persons“ enthält alle personenbezogenen Daten (Name, Anschrift, Tel., etc.)
- „wpfeldme_obj“ enthält alle objektbezogenen Daten (Gebäude-Anschrift, Besitzer, WP-Typ, EBF, etc.)
- „wpfeldme_users“ enthält alle userbezogenen Daten inklusive der Berechtigungen (z.B. Rolle „Admin“, „Beobachter“, etc.)
- „wpfeldme_rohdata“ enthält alle gemessenen Sensordaten im Rohdatenformat. Hier erfolgen keine Anpassungen bzw. Adaptierungen (z.B. Umrechnungen mit den Sensorfaktoren auf die tatsächlichen Temperaturwerte lt. angegebener Einheit – Diese Umrechnung erfolgt in den Calcdaten – sowie bei der Ausgabe auf der wp-feldmessung.ch Homepage)
- „wpfeldme_calcddata“ enthält alle berechneten Werte. Berechnungsvorschriften können hier in eigenen „Features“ vom User angelegt und anschliessend mit den jeweiligen Objekten und Sensor-IDs verlinkt werden. Hierfür stehen fixe Bausteine sowie allgemeine Funktionen zur Verfügung, welche je nach zugewiesenen Sensorwerten unterschiedliche Grössen berechnen können. Hierfür muss der Programmcode nicht geändert werden(!).

In Tabelle 5 werden zwei Beispiele angeführt: Die allgemeine Funktion „mean_B7oB6_1“ ermittelt die Mittelwerte gemässe der verlinkten Sensor-IDs S1 und S2, in den Zeitabschnitten, in welchen Bit 7 oder Bit 6 des digitalen Signales „47_Dig“ gleich „1“ ist.

Tabelle 5: Beispiel von Funktionsnamen und Berechnungsvorschriften in der Datenbank „wpfeldme_calcddata“

Funktion:	Berechnungsvorschrift:
mean_B7oB6_1	Mittelwert von (S1 und S2) jenes Zeitbereiches, wo Bit 6 oder Bit 7 des digitalen Signales 47_Dig = 1 sind (Kompressor 1 oder Kompressor 2 aktiv)
JAZ+	$JAZ+ = (38_WtS + 40_WtA) / (26_WeiTot - 34_WeUS)$

Der fixe Baustein „JAZ_BFE“ ermittelt die Kenngrösse entsprechend der dargestellten Rechenvorschrift. Hier sind die Sensor-IDs bereits fix vorgegeben und im Programmcode hinterlegt.

Tabelle 6: Beispiel von Funktionsnamen und Berechnungsvorschriften in der Datenbank „wpfeldme_calcddata“

Funktion: Berechnungsvorschrift:

mean_B7oB6_1 Mittelwert von (S1 und S2) jenes Zeitbereiches, wo Bit 6 oder Bit 7 des digitalen Signales 47_Dig = 1 sind (Kompressor 1 oder Kompressor 2 aktiv)

JAZ_BFE $JAZ_BFE = (38_WtS + 40_WtA) / (26_WeiTot - 34_WeUS)$