

Jahresbericht 2017

Bericht «WP-Feldmessung»

**Wärmepumpen-Anlagen 2015-2018
(Auswertung verlängert bis Dez. 2019)**



energieschweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Dr. Cordin Arpagaus, Interstaatliche Hochschule für Technik NTB

Matthias Berthold, Interstaatliche Hochschule für Technik NTB

Mick Eschmann, Interstaatliche Hochschule für Technik NTB

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

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 4 |
| 2 | Projektziele | 5 |
| 2.1 | Objektbeschreibungen | 5 |
| 2.2 | Systemgrenzen und Kennzahlen | 8 |
| 3 | Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpensysteme..... | 10 |
| 3.1 | Vergleich der Jahresarbeitszahlen..... | 10 |
| 3.1.1 | Einfluss der Temperaturniveaus | 13 |
| 3.2 | Unterschied zwischen Jahresarbeitszahl JAZ+ und Wärmenutzungsgrad WNG..... | 15 |
| 3.2.1 | Einfluss der Hilfs- und Nebenaggregate (Umwälzpumpen, Heizstäbe und Steuerungen) | 16 |
| 3.2.2 | Wärmenutzungsgrad WNG..... | 18 |
| 3.3 | Detailbetrachtungen der Wärmepumpe des Objektes 3..... | 19 |
| 3.3.1 | Monatliche Darstellungen der Systemtemperaturen und wichtigsten Kennwerte (z.B. JAZ+)..... | 19 |
| 3.3.2 | Systemtemperaturen, thermische Leistungen und Betriebsstunden in Abhängigkeit der Aussentemperatur..... | 22 |
| 3.3.3 | Laufzeiten pro Start und Tagesverteilung | 25 |
| 3.3.4 | Tagesausschnitt – Vorlauftemperatur über 70 °C..... | 28 |
| 4 | Energetische Auswertungen zu den Gebäuden | 29 |
| 4.1 | Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage der Objekte 2 und 3..... | 30 |
| 5 | Ausblick | 30 |
| 6 | Schlussfolgerung..... | 31 |
| 7 | Bisherige Feldmessungen FAWA | 32 |
| 7.1 | Auswertung der Jahresarbeitszahlen..... | 33 |
| 7.2 | Thermische Energie | 37 |
| 8 | Literatur..... | 38 |
| 9 | Anhang..... | 39 |
| 9.1 | Methodik und Messequipment | 39 |
| 9.2 | Schemas der Anlagen..... | 41 |

1 Zusammenfassung

Insgesamt werden in diesem Bericht neun Wärmepumpen-Anlagen miteinander verglichen. Es handelt sich um 4 Luft/Wasser- und 5 Sole/Wasser-Wärmepumpen-Anlagen für Neubauten und Sanierungen. Davon sind 5 Wärmepumpen drehzahlreguliert.

Bei allen Anlagen werden verschiedene Kenndaten wie JAZ+ (Jahresarbeitszahl) und WNG (Wärmenutzungsgrad für Heizen, Aufladung und Gesamt), Leistungs-, Energie- und Temperaturwerte auf Tages-, Monats- und Jahresbasis¹ ausgewertet.

Damit sind fundierte Aussagen und Analysen zum Auflade- und Heizverhalten der verschiedenen Objekte möglich.

Aus den Messdaten sind bekannte Erkenntnisse ersichtlich wie z.B., dass die Senktemperatur (für Heizen und Aufladung) einen grossen Einfluss auf die Gesamteffizienz hat. Aber auch interessante Erkenntnisse wie, dass der Heizstab bis zu 7 % oder die Senkenumwälzpumpen bis zu 11 % des gesamten Energieverbrauches ausmachen können. Die Quenumwälzpumpen der Sole/Wasser-Wärmepumpe spielen mit rund 3 % eher eine untergeordnete Rolle.

Insgesamt konnten 2 Wärmepumpen-Anlagen über das gesamte Jahr 2017 ausgemessen werden. Die anderen 7 Anlagen wurden im Verlaufe des 1., 2. oder 3. Quartals des Berichtsjahrs in Betrieb genommen. Daher sind die Kenngrössen wie JAZ+ und WNG noch nicht auf alle Anlagen vergleichbar. Die Jahresarbeitszahl der beiden ausgemessenen Anlagen liegt bei 2.7 (Luft/Wasser) und 4.9 (Sole/Wasser). Der Wärmenutzungsgrad (mit Berücksichtigung aller Hilfsaggregate) wird bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 2.6 und bei der Erdsondenwärmepumpe mit 4.6 angegeben.

Bei der Unterteilung der JAZ+ in Heizen und Aufladung wird ersichtlich, dass bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpen-Anlage die Trinkwarmwasseraufladung sogar effizienter als der Heizbetrieb ist. Dies ist vor allem auf die für dieses Gebäude nötige, hohe Vorlauftemperatur in den Wintermonaten zurückzuführen. Diese liegt zwar immer noch knapp unter der Aufladetemperatur, dafür sind aber im Schnitt die Aussentemperaturen (= Quelltemperatur) bei der Aufladung höher.

Spannend ist auch die Laufzeitdauer pro Verdichterstart. Hier zeigt sich, dass durch die Abtaunngen die Laufzeitdauer stark reduziert wird und die eigentliche Dauer des Heizbetriebs verfälscht.

Der Heizwärmebedarf (HBW) variiert bei den untersuchten Anlagen von 43 kWh/m²a bis 130 kWh/m²a. Der Trinkwasserwärmebedarf (TWWB) liegt bei diesen Anlagen zwischen 12 kWh/m²a und 19 kWh/m²a.

Vier weitere Wärmepumpen-Anlagen wurden zwar noch im 4. Quartal 2017 in Betrieb genommen, konnten jedoch für eine aussagekräftige Auswertung nicht für diesen Bericht herangezogen werden. Wegen der zeitlichen Verzögerung von Inbetriebnahmen und möglichen Messbeginn wurde entschieden, mit den Auswertungen erst im Januar 2018 zu beginnen. Das Projekt wurde jedoch bis Ende 2019 verlängert. Bis dann werden fundierte Datensätze vorliegen.

Bei jeder Wärmepumpenanlage ist ein Schaltschrank verbaut, in welchem eine SPS und Stromwandler für die Berechnung der Aufnahmeleistungen eingebaut ist. Ausserdem werden Durchflusszähler und Temperaturfühler bei der Anlage verbaut, um die Abgabeleistungen zu messen und zu berechnen. Alle gemessenen und berechneten Daten werden in einer Datenbank auf einem Schweizer Server in einer Datenaufösung von 10 Sekunden gespeichert.

¹ Anmerkung: Viele Monats- und Jahresmittelwerte werden aus den Rohdaten des gesamten Zeitraumes ermittelt. Der Mittelwert der einzelnen Tages- bzw. Monatswerte kann von diesen Datenbank-Werten erheblich abweichen, da hier die entsprechende Betriebsgewichtung wegfällt (Bsp.: 103_Tavg_Saus_Heizen: Mittlere Temperatur Senke Austritt, während des Heizbetriebes [Bit_7 = 1 & Bit_4 = 0] – der tägliche Zeitanteil des Heizens ist aber in den Wintermonaten deutlich höher als in der restlichen Zeit -> Bei einer Mittelung der einzelnen Tageswerte würde diese betriebliche Gewichtung aber nicht berücksichtigt werden.

2 Projektziele

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

Durch die technologische Weiterentwicklung und Digitalisierung ist es heute möglich, WP-Feldmessungen zu automatisieren, und hochauflösende Datenreihen einer Vielzahl von Sensoren zu erfassen. Basierend auf diesen qualitativ hochwertigen Datenreihen ist es möglich Aussagen zu treffen, die mit Handablesungen nicht möglich waren. Solche Aussagen sind:

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

Spezifische Ziele des Projekts «WP Feldmessung» sind somit die automatisierte, zeitlich hochauflösende Erfassung von Wärmepumpen-Anlagen im Feld und die Analyse der Messergebnisse. Für einen Vergleich sollen geeignete Kennzahlen ermittelt und publiziert werden. Jährlich sollen fünf neue Anlagen in die Messreihe aufgenommen werden und die bestehenden Anlagen mit der Handfassung weiterbetreut werden. Durch diese Kontinuität kann auch in den Folgejahren ein Abgleich der neu ermittelten Kenngrößen mit den bisherigen Feldmessungen erfolgen.

Nach einem Auswertzeitraum von 2 Jahren (pro Anlage) sollen mögliche Optimierungspotentiale identifiziert und soweit möglich in den bestehenden Anlagen umgesetzt werden. Mit den Daten des dritten Messjahres werden die Auswirkungen der Massnahmen dann überprüft und dokumentiert.

Aufgenommen werden nur neue Wärmepumpenanlagen, welche 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. Diese Vorgangsweise hat auch den Vorteil, dass der Performance-Unterschied zwischen Wärmepumpen, die in Normmessungen am WPZ geprüft werden und den tatsächlich ausgelieferten Wärmepumpen bestimmt werden kann.

Somit kann es im Projekt «WP Feldmessung» gelingen, die Ursachen für die Performance-Unterschiede zwischen Labor und Feld besser auf die Verursacher zurückzuführen (WP-Herstellung, Regler-Einstellungen, Installationen, usw.).

2.1 Objektbeschreibungen

Derzeit werden 13 Anlagen gemessen. In diesem Bericht werden 9 Anlagen dargestellt, da für erste, relevante Aussagen eine Datenmenge von mindestens 120 Tagen benötigt wird. Bei den restlichen vier Anlagen ist die Messdauer unter 45 Tagen, weshalb keine gesicherten Aussagen möglich sind. Bei den zwei Anlagen, welche ab dem Sommer 2016 in Betrieb sind, wurde ein Objekt im

Dezember 2016 bezogen. Aufgrund der geringen Datenlage des Jahres 2016 fokussiert dieser Bericht bei allen Objekten auf die Ergebnisse von 2017.

Bei den getroffenen Aussagen für das Jahr 2017 ist zu beachten, dass nur bei 2 Anlagen (Objekt 2 und Objekt 3) die Auswertedauer von einem vollen Kalenderjahr erreicht wurde.

Dargestellt werden im Folgenden 4 Luft/Wasser- und 5 Sole/Wasser-Wärmepumpen. Verbaut wurden die Wärmepumpen in 3 Neubauten und in 6 Sanierungsobjekten. Fünf Wärmepumpen verwenden drehzahlregelte Kompressoren. Das Objekt 8 hat zusätzlich eine eigene Brauchwarmwasser-Wärmepumpe, das Objekt 6 eine Solarthermie Anlage. Bei drei Wärmepumpen ist der Kühlbetrieb aktiviert.

Tabelle 1 zeigt eine Kurzübersicht über die untersuchten Anlagen. Detaillierte Anlagenschemas sind im Anhang ersichtlich.

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) |
| 2 | 01.08.2016 | | X | X | | X | X | <ul style="list-style-type: none"> Objekt wurde erst im Dez. 2016 bezogen. Heizt und kühlt immer wieder am gleichen Tag |
| 3 | 01.07.2016 | X | | | 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 Kühlbetrieb mehr aufgetreten |
| 4 | 01.07.2017 | | X | | X | | | <ul style="list-style-type: none"> Wärmepumpensystemmodul Einbau der wärmeisolierten Fenster erst für den 4.12.17 geplant WP läuft öfters 24h durch (z.B. vom 11. Nov. bis 11. Dez. 2017 durchgehend in Betrieb) |
| 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) |

| Objektnummer | Beginn der Messung | Luft / Wasser WP | Sole / Wasser WP | Neubau | Sanierung | Drehzahl-Regelung | Kühlung aktiviert | Anmerkungen: |
|--------------|--------------------|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|---|
| 7 | 12.01.2017 | | X | | X | X | | <ul style="list-style-type: none"> • Heizt jeden Tag (auch wenn Tagesmittel der Umgebungstemperatur über 28 Grad 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) |
| 8 | 12.01.2017 | X | | X | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Eigene BWWP (JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung werden betrachtet) • Viele Verdichter Starts im Heizbetrieb (20 bis 42 Starts pro Tag, gilt nicht für die Aufladung) |
| 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) |
| 13 | 01.08.2017 | | X | | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> • Heizstab des Trinkwarmwasserspeicher jeden Freitag für ca. 0.3 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 EKZ²) |

Es ist auffallend, dass die Trinkwasserheizstäbe der Objekte 6, 7, 11 und 13 über eine Zeituhr eingeschaltet werden. Bei all diesen Objekten muss die Aufladung nicht zwingend über die Wärmepumpe selbst gestartet werden.

² Details zur EW-Sperre des EKZ: https://www.ekz.ch/content/dam/ekz-internet/private/Bauen/WV-ZH-2015-01_zusaetzliche-Weisungen-EKZ.pdf

2.2 Systemgrenzen und Kennzahlen

In Analogie zum Beschrieb und den Anwendungshinweisen der verschiedenen Nutzungsgrade des BFE (siehe [2]) werden folgende Kennzahlen pro Wärmepumpenanlage dargestellt. Die Systemgrenzen sind in der Abbildung 1 illustriert. Aufgelistet werden hier nur die in den Abbildungen dargestellten Kennzahlen.

Die Jahresarbeitszahl JAZ+ und der Wärmenutzungsgrad WNG werden mit folgenden Formeln ermittelt:

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

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

Um den Einfluss der «Nutzung» bzw. das Gebäude und dessen Standort einstufen zu können, werden noch folgende Kennwerte ermittelt und dargestellt:

| | |
|--|---|
| $QH_HWB = Q_{\text{Heizen}} / EBF$ | Heizwärmebedarf [kWh/m ²] |
| $GWB = (Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}) / EBF$ | Gesamtwärmebedarf [kWh/m ²] |
| HGT_20_12 | Heizgradtage [°C] |

Mit:

| | |
|------------------------|---|
| Q_{Heizen} | Thermische Energie im Heizbetrieb [kWh] |
| $Q_{\text{Aufladung}}$ | Thermische Energie im Aufladebetrieb [kWh] |
| 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 wird eine Grenztemperatur von 12 °C und eine Soll-Innentemperatur von 20 °C verwendet. Heizgradtage werden nur gezählt, wenn die mittlere Tagestemperatur die Heizgrenze (hier 12 °C) nicht übersteigt. Die HGT ergeben sich dann aus der Differenz zwischen der mittleren Tagestemperatur und 20 °C.

Die Systemgrenzen sind in Abbildung 1 dargestellt.

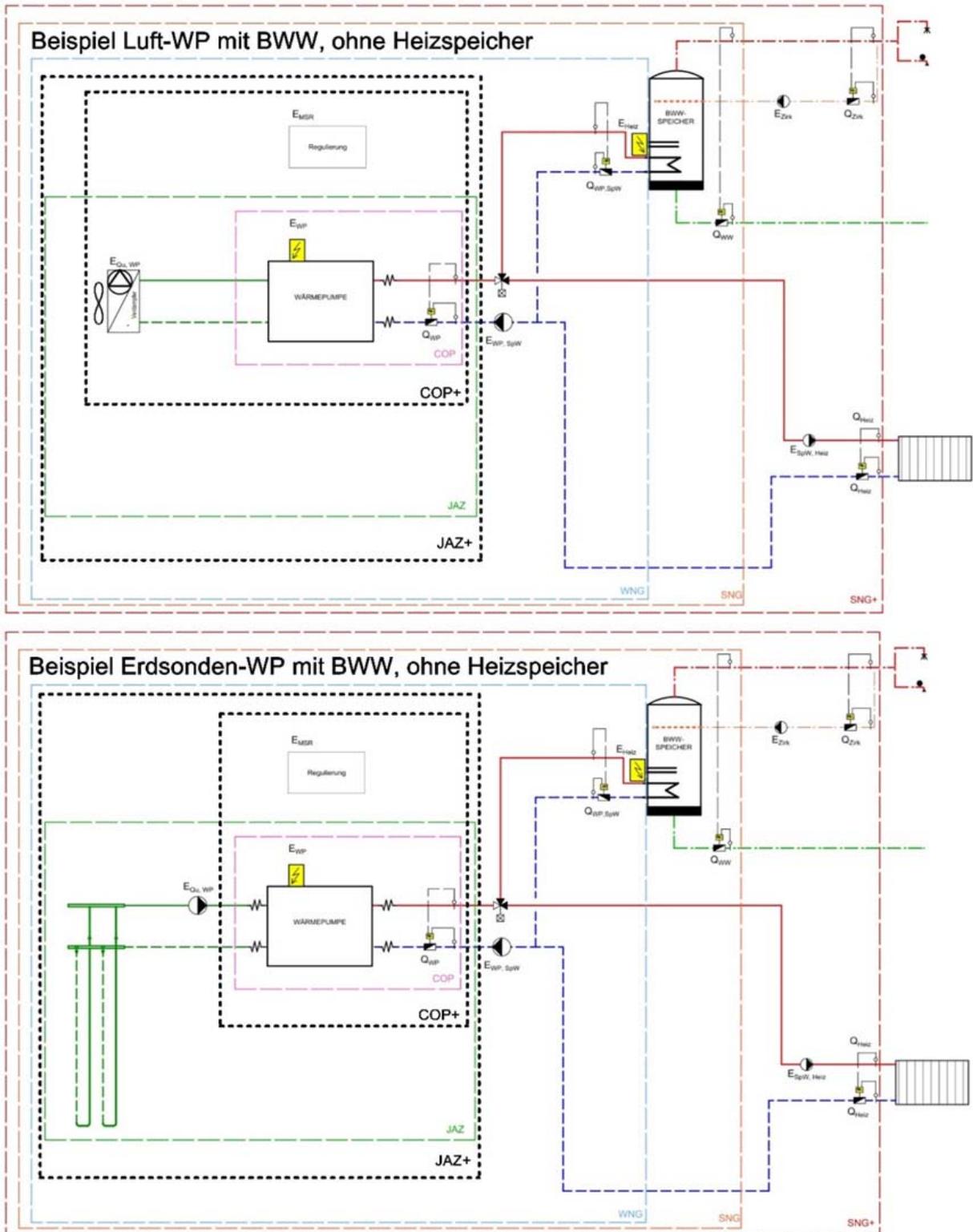


Abbildung 1: Systemgrenzen gemäss BFE für Luft- und Erdsonden-WP mit BWW, ohne Heizspeicher. Zu beachten sind insbesondere die Systemgrenzen zur Berechnung des COP+ und JAZ+. Bei der JAZ+ wird die Steuerung und der Bedarf der Quellen-Umwälzpumpe miteinbezogen.

3 Ergebnisse und Auswertungen der Wärmepumpensysteme

In diesem Kapitel werden die Wärmepumpen-Anlagen miteinander verglichen. Nebst der allgemeinen Energieeffizienz wird auch auf den Effizienzeinfluss der Nebenaggregate (wie z.B. Heizstab, Umwälzpumpen) und der Quellen- bzw. Senkentemperatur eingegangen. Während sich der erste Teil auf die neu ausgerüsteten Anlagen mit hochauflösendem Datenerfassungssystem konzentriert, befasst sich der zweite Teil mit den Bestandsanlagen mit Handablesung.

3.1 Vergleich der Jahresarbeitszahlen

In Abbildung 2 werden die Jahresarbeitszahlen JAZ+ der gemessenen Objekte für das Jahr 2017 dargestellt. Die Objekte 2 und 3 wurden bereits 2016 in Betrieb genommen. Die restlichen Objekte gingen während des Jahres 2017 in Betrieb. Dementsprechend haben diese Objekte unterschiedliche Auswerteziträume. In diesem Bericht werden jene Objekte dargestellt, welche schon mindestens 120 Tage in Betrieb sind. Ab 2018 wird eine wesentlich breitere Datenbasis vorhanden sein.

Luft/Wasser-Wärmepumpen werden im Bericht mit LW abgekürzt, Erdsonden-Wärmepumpen (oder Sole/Wasser-Wärmepumpen) mit SW. Für eine eindeutige Zuordnung werden anschliessend die internen Objekt-ID in Klammern angegeben (Beispiel: LW (3) ist die Luft/Wasser Wärmepumpe des Objektes 3). Ausserdem ist unter dem Kürzel noch die Art des Heizungssystems erwähnt (S = Sanierung, N = Neubau und d = drehzahlregulierte Wärmepumpe).

In den Grafiken werden die Systeme zuerst entsprechend der Wärmequelle gruppiert (zuerst Luft/Wasser, dann Sole/Wasser Wärmepumpen) und dann entsprechend der Jahresarbeitszahlen JAZ+ aufsteigend gereiht.

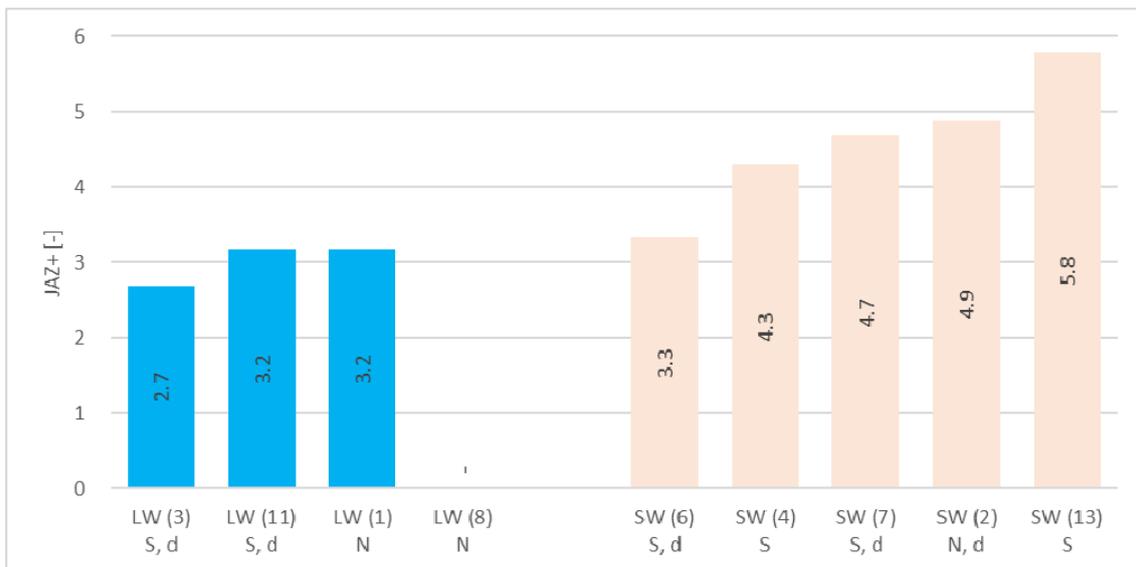


Abbildung 2: Die Jahresarbeitszahl JAZ+ unterschiedlicher Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpensystemen sind dargestellt. In Klammern stehen jeweils die Objektnummern. Legende: S = Sanierung, N = Neubau, d = drehzahlregulierte Wärmepumpe

Die Jahresarbeitszahlen bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen liegen im Bereich von 2.7 bis 3.2. Das Objekt 8 hat eine eigene Brauchwarmwasser-Wärmepumpe, weshalb nur eine Jahresarbeits-

zahl für den Heizbetrieb (JAZ+_Heizen) ermittelt werden kann. Die Heizungsanlagen LW(3) und LW(11) haben eine leistungsmodulierende Wärmepumpe. Die Heizungsanlagen LW(1) und LW(8) bestehen aus einer konventionellen Ein/Aus-Wärmepumpe. Auf den ersten Blick sieht es so aus, als ob die Ein/Aus-Wärmepumpen effizienter laufen als die Leistungsmodulierenden. Beim genaueren Betrachten der Daten ist jedoch ersichtlich, dass es sich bei den Anlagen LW(1) und LW(2) um Sanierungsobjekte handelt. Bei diesen Anlagen ist eine höhere Vorlauftemperatur zu erwarten (siehe Kapitel 3.1.1).

Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen liegen die Jahresarbeitszahlen im Bereich von 3.3 und 5.8. Die Heizsysteme mit der höchsten und niedrigsten Jahresarbeitszahl sind beide am 1.8.2017 in Betrieb genommen worden, womit der Auswertungszeitraum identisch ist. Daher sind hier die Extremwerte nicht auf den Auswertungszeitraum zurückzuführen.

Eine Gegenüberstellung zwischen der gesamten JAZ+, der Jahresarbeitszahl im Heizbetrieb JAZ+_Heizen und während der Trinkwasseraufladung JAZ+_Aufladung ist in Abbildung 3 ersichtlich.

Entsprechend der bisherigen Analyse haben folgende zwei Faktoren den grössten Einfluss auf die Höhe der Jahresarbeitszahl:

- **Temperaturniveau:** Wie erwartet zeigt das Temperaturniveau der Senke einen sehr grossen Einfluss auf die Effizienz der Anlagen. Die Anlagen mit den niedrigsten Jahresarbeitszahlen weisen die höchsten Senken-Vorlauftemperaturen sowohl im Heizbetrieb als auch im Aufladebetrieb auf. Spannend ist, dass die Quelltemperatur während der Trinkwasseraufladung im Mittel wesentlich höher liegt als während dem Heizbetrieb (Siehe Kapitel 3.1.1). Die teilweise sehr gute JAZ+ während der Trinkwasser-Aufladung lässt sich durch diese höheren Quelltemperaturen begründen.
- **Einfluss der Heizstäbe und der Hilfsaggregate:** Deren Einfluss auf die JAZ+ scheint deutlich kleiner zu sein, als die des Temperaturniveaus. Da bei der JAZ+ nicht alle Hilfsaggregate berücksichtigt werden, ist der effektive Einfluss der Hilfsaggregate erst im Wärmenutzungsgrad WNG voll spürbar. Der Einfluss der Heizstäbe auf die Effizienz sowie Betriebszeiten und Dimensionierung der Senken- und Quellen-Umwälzpumpen ist im Kapitel 3.2.1 erläutert.

In der nachfolgenden Abbildung 3 ist ersichtlich, dass die Anlagen, bis auf die Anlage LW(3), während dem Heizbetrieb effizienter als während der Trinkwasser-Erwärmung laufen. Der Effizienzunterschied zwischen Heizen und Aufladung scheint im Schnitt bei den Erdsondenwärmepumpen höher zu sein als bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen. So variiert dieser bei der Wärmepumpenanlage SW(2) zwischen 3.0 (JAZ+_Aufladung) und 6.5 (JAZ+_Heizen).

Ausserdem ist sehr schön ersichtlich, dass die JAZ+_Heizen der unterschiedlichen Anlagen stark schwanken. Die ineffizienteste Anlage weist einen JAZ+_Heizen von 2.7 (LW(3)) auf, während die effizienteste Anlage hier eine 6.5 (SW(2)) erreicht. Dies entspricht einem Unterschied von über 140 %.

Bei der Trinkwassererwärmung liegen die Anlagen bezüglich Effizienz näher beisammen. Hier variieren die Werte zwischen 2.8 (LW(11)) und 3.8 (SW(13)). Dies entspricht einem Unterschied von rund 35 %.

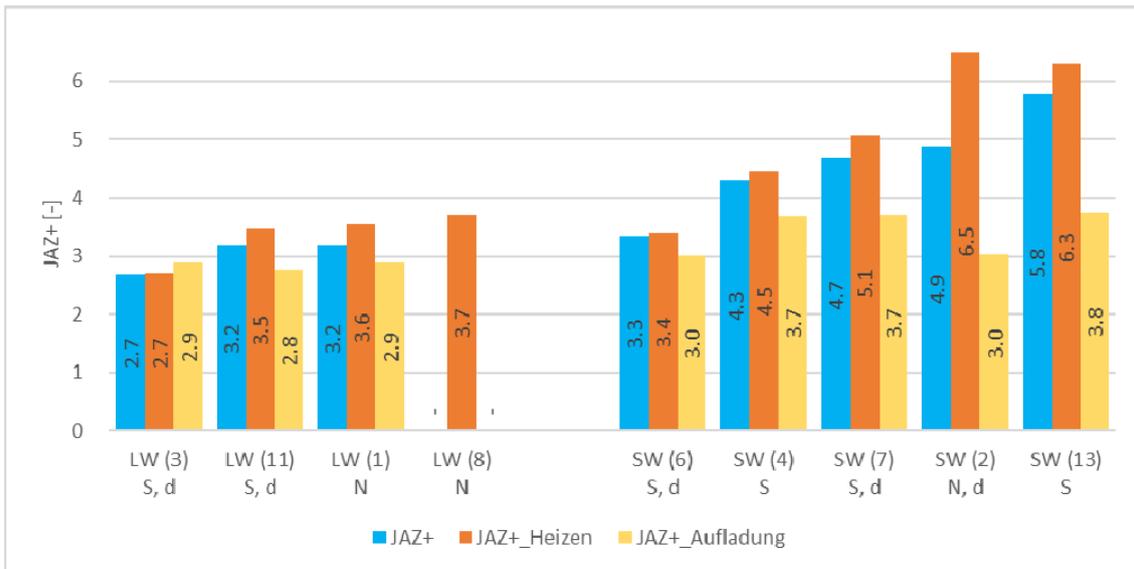


Abbildung 3: Darstellung der Jahresarbeitszahl JAZ+ im Vergleich zu den Arbeitszahlen im Heizbetrieb JAZ+_Heizen und während der Aufladung JAZ+_Aufladung. (Bsp. Zur Namenskonvention: LW (3) = Luft/Wasser-Wärmepumpe des Objektes 3, SW (6) = Sole/Wasser-Wärmepumpe des Objektes 6). Legende: S = Sanierung, N = Neubau, d = drehzahlregulierte Wärmepumpe

Die JAZ+ wird über die gesamte Zeit (24 h und 365 d) ermittelt. Die JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung werden nur ermittelt, wenn der Verdichter an ist. Dadurch kann es vorkommen, dass die JAZ+ kleiner ist als die anderen beiden JAZ+ für Heizen und Aufladung, wie in Abbildung 3 bei LW(3) ersichtlich. Für diesen Fall wird auch ein JAZ+ (netto) ermittelt, der ebenfalls nur die Zeit berücksichtigt, wenn der Verdichter an ist (siehe Abbildung 4).

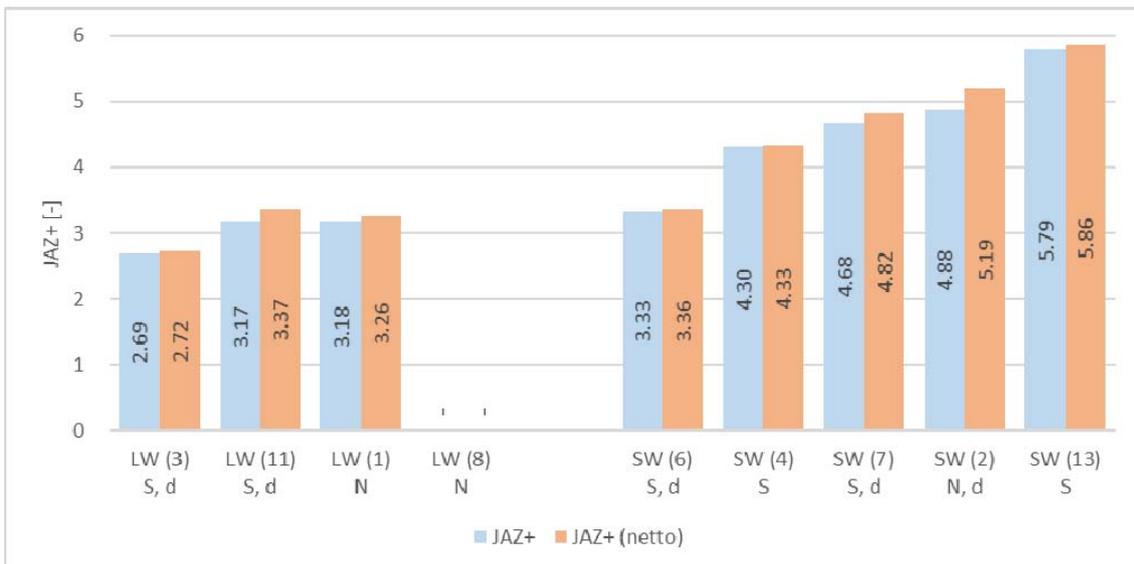


Abbildung 4: Vergleich JAZ+ mit JAZ+ (netto) bei allen Anlagen

Ebenfalls ersichtlich wird in dieser Grafik, dass der energetische Standby-Anteil bei allen ausgewerteten Anlagen zwischen 0.8 % (SW(4)) und 6.4 % (SW(2)) liegt.

3.1.1 Einfluss der Temperaturniveaus

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

In den Abbildungen werden dabei folgende Abkürzungen verwendet:

- Tavg_Qein_Heizen: Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Heizbetriebes» der Wärmepumpe.
- Tavg_Qein_Aufladung: Mittelwert der Quellen-Eingangs-Temperatur, während des «Aufladebetrieb» der Wärmepumpe.
- Tavg_SAus_Heizen: Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Heizbetriebes» der Wärmepumpe.
- Tavg_SAus_Aufladung: Mittelwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Aufladebetrieb» der Wärmepumpe.
- Tmax_SAus_Aufladung: Maximalwert der Senken-Vorlauftemperatur, während des «Aufladebetrieb» der Wärmepumpe.

Aufgrund der kleinen Datenbasis wird auf einen Vergleich zwischen Carnot-Wirkungsgrad und JAZ+ in diesem Bericht verzichtet, obwohl dieser sehr aufschlussreich wäre, um die Wärmepumpen (ohne Einfluss der Einbindung) zu bewerten. Im nächsten Bericht wird dieser Vergleich präsentiert werden.

In Abbildung 5 sind die Temperaturniveaus der 4 Luft/Wasser-Wärmepumpen dargestellt.

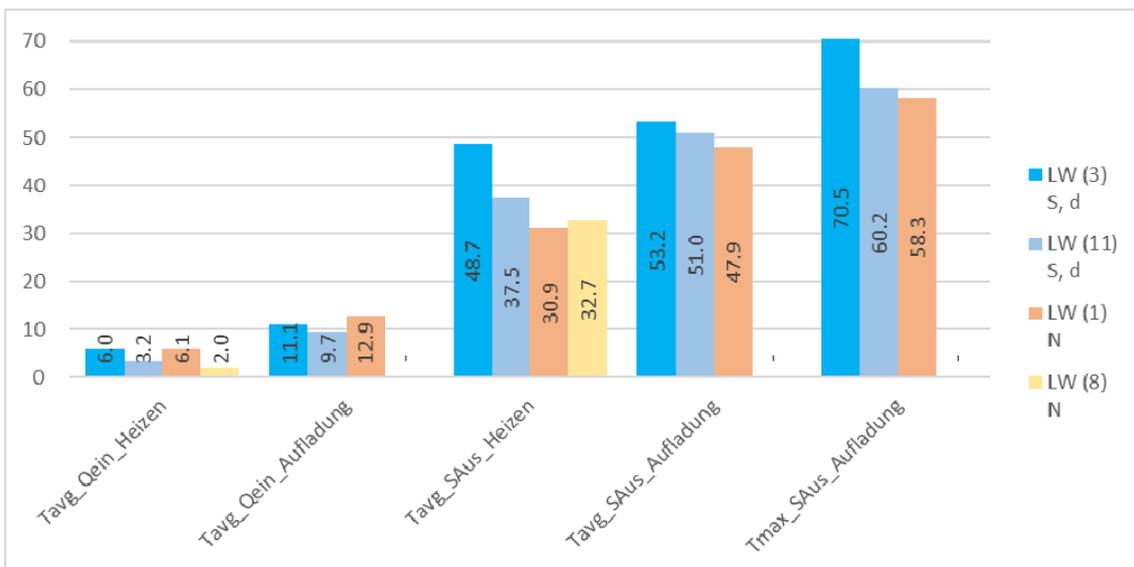


Abbildung 5: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges und des Senken-Vorlaufs während der unterschiedlichen Betriebsziele «Heizen» und «Aufladung». Die Reihung der Objekte erfolgt nach aufsteigender Jahresarbeitszahl JAZ+. Dargestellt wurden hier die 4 Luft/Wasser-Wärmepumpen. Die LW(8) läuft nur im Heizbetrieb.

Generell ist die Tendenz zu erkennen, je höher die Jahresarbeitszahl JAZ+ ist, desto niedriger ist die Senken-Vorlauftemperatur. Trotzdem erstaunt es, dass die Effizienz der beiden Neubauten nicht wesentlich höher liegen als die der Sanierungen. Auf die Ursache dieser Tatsache wird im Folgenden eingegangen.

Die Wärmepumpenanlage des Objektes 3 weist die niedrigste Jahresarbeitszahl JAZ+ von 2.7 auf. Deren Gebäude hat einen relativ hohen Heizwärmebedarf von 130 kWh/m². Der Gesamtwärmebedarf liegt bei rund 150 kWh/m². Die entsprechenden mittleren Senken-Vorlauftemperaturen sind ebenfalls sehr hoch (> 48 °C im Heizbetrieb, > 53 °C im Aufladebetrieb). Bei den beiden Anlagen (Objekt 3 und Objekt 11) mit den höheren Senken-Vorlauftemperaturen handelt es sich um eine Heizungssanierung. Die anderen beiden Anlagen (Objekt 1 und Objekt 8) beheizen je einen Neubau. Ausserdem sind die eingesetzten Wärmepumpen bei der Sanierung drehzahlreguliert und bei den anderen handelt es sich um Ein/Aus-Wärmepumpen.

Da die Vorlauftemperaturen zwischen den einzelnen Anlagen stark variieren, ist es schwierig einen direkten Vergleich der Anlageneffizienz zu machen. Eine Möglichkeit zum Vergleich liegt in der Korrekturberechnung bezüglich der Effizienzmindernng durch den Temperaturhub.

Die Anlage LW(3) hat im Heizbetrieb einen durchschnittlichen Temperaturhub von 43 K (Senktemperatur von 49 °C und Quelltemperatur von 6 °C), die LW(11) einen von 34 K. Dies entspricht einem Hubunterschied von rund 9 K. Geht man davon aus, dass eine Wärmepumpenanlage rund 2 % Effizienz einbüsst pro 1 K höherer Vorlauftemperatur, so entspricht dies 18 % Effizienzunterschied der beiden Anlagen. Der gemessene Unterschied zwischen diesen beiden Anlagen liegt bei gut 20 %. Nach dieser Korrektur kann davon ausgegangen werden, dass beide Wärmepumpen etwa gleich effizient betrieben werden. Interessant wäre es hier noch die Messergebnisse vom WPZ-Prüfstand heranzuziehen, um herauszufinden, welche der beiden Anlagen wirklich effizienter in Gebäude eingebunden ist. Dies wird ebenfalls ab 2018 möglich sein.

Natürlich sollte die Korrekturberechnung auch zwischen einer drehzahlregulierten Wärmepumpenanlage (Objekt 11) und einer Ein/Aus-Wärmepumpe (Objekt 1) durchgeführt werden. Der durchschnittliche Temperaturhub des Objektes 11 liegt bei 34 K, der des Objektes 1 bei 25 K. Auch hier entspricht der Hubunterschied der beiden Anlagen rund 11 K. Somit müsste die Wärmepumpenanlage des Objektes 1 eine JAZ+_Heizen von rund 4.0 aufweisen. Mit einer JAZ+_Heizen von 3.6 liegt sie jedoch rund 10 % zu niedrig. Bei diesem Beispiel kann die Leistungsregulierung durchaus seine Vorteile auf die Effizienz aufzeigen. Auch hier müssten die Prüfergebnisse vom WPZ-Prüfstand für eine abschliessende Aussage herangezogen werden. In einem folgenden Bericht wird auf diese Prüfergebnisse zurückgegriffen.

Spannend ist, dass die Quelltemperatur während dem Heizbetrieb wesentlich tiefer liegt als während der Trinkwasser-Aufladung. Im Schnitt liegt diese ca. 6 K tiefer. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch der Grund, weshalb die Anlage bei Objekt 3 während der Aufladung sogar etwas effizienter läuft als während dem Heizbetrieb. Der Temperaturhub während der Aufladung ist rund 1 K kleiner als während des Heizbetriebs.

Objekt 8 hat eine zusätzliche Brauchwarmwasser-Wärmepumpe, weshalb hier nur die Werte für den Heizbetrieb ausgewiesen werden.

In Abbildung 6 sind die Temperaturniveaus der Sole/Wasser-Wärmepumpen dargestellt.

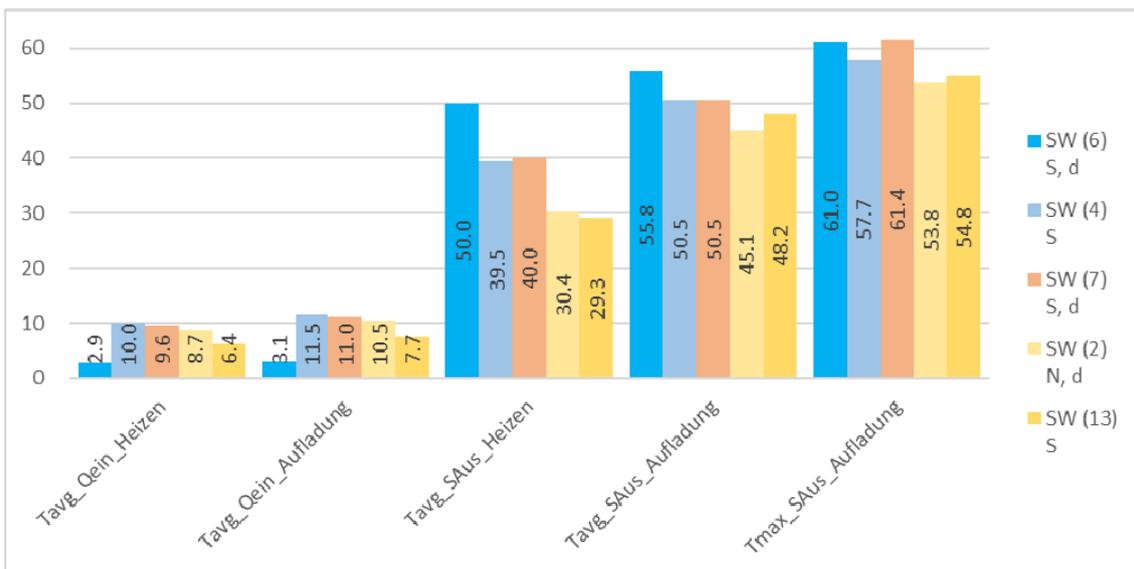


Abbildung 6: Darstellung der unterschiedlichen Temperaturniveaus des Quellen-Einganges und des Senken-Ausganges während der unterschiedlichen Betriebsziele «Heizen» und «Aufladung». Die Reihung der Objekte erfolgt nach aufsteigender Jahresarbeitszahl JAZ+. Dargestellt wurden hier die 5 Sole/Wasser-Wärmepumpen.

Die Reihung der Sole/Wasser-Wärmepumpen erfolgte wieder entsprechend ihrer Jahresarbeitszahlen in aufsteigender Reihenfolge.

Auch hier zeigt die Heizungsanlage SW(6) mit den niedrigsten Jahresarbeitszahlen die höchsten Senken-Vorlauftemperaturen (> 50 °C im Heizbetrieb, > 55 °C im Aufladebetrieb).

Die Messperiode des Systems SW(6) ist identisch mit der Messperiode der Heizungsanlage SW(13). Die etwas geringere Laufzeit des Verdichters vom Heizsystem SW(6) von 1'174 Stunden im Vergleich zum System SW(13) mit 1'461 Stunden dürfte u.a. auch auf die Solarthermie-Unterstützung beim Objekt 6 zurückzuführen sein. Der solare Eintrag in den Trinkwasser- und Heizungspufferspeicher kann leider nicht gemessen werden und liegt hinter den untersuchten Systemgrenzen.

Auch bei den Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen wurden die Korrekturberechnung zwischen einer drehzahlregulierten Wärmepumpenanlage (Objekt 2) und einer Ein/Aus-Wärmepumpe (Objekt 4) durchgeführt. Der durchschnittliche Temperaturhub des Objektes 4 liegt bei 30 K, der des Objektes 2 bei 22 K. Der resultierende Hubunterschied der beiden Anlagen liegt bei ca. 8 K. Somit müsste die Wärmepumpenanlage des Objektes 2 eine JAZ+_Heizen von rund 5.2 aufweisen. Mit einer JAZ+_Heizen von 6.5 liegt sie sogar rund 25 % höher. Hier zeigt die Leistungsmodulierung in Kombination mit einer Wasser-gefüllten (anstelle Glykol) Erdwärmesonde seine Vorteile ausdrücklich. Auch hier müssten die Prüfergebnisse vom WPZ-Prüfstand für eine abschliessende Aussage herangezogen werden. In einem folgenden Bericht werden auf diese Prüfergebnisse zurückgegriffen.

3.2 Unterschied zwischen Jahresarbeitszahl JAZ+ und Wärmenutzungsgrad WNG

Der Wärmenutzungsgrad WNG und die Jahresarbeitszahl JAZ+ haben unterschiedliche Systemgrenzen. Die elektrische Energie für den Betrieb der Senken-Umwälzpumpe und für die Heizstäbe im Trinkwasser- und Pufferspeicher sind bei der Jahresarbeitszahl JAZ+ nicht berücksichtigt, sehr wohl aber beim Wärmenutzungsgrad WNG (siehe Kapitel 3.2.2).

3.2.1 Einfluss der Hilfs- und Nebenaggregate (Umwälzpumpen, Heizstäbe und Steuerungen)

Wie viel Einfluss die Hilfs- und Nebenaggregate auf die Effizienz haben, wird in diesem Kapitel beschrieben. In Abbildung 7 sind die prozentualen Anteile der elektrischen Hilfsaggregate dargestellt, welche nicht dem Verdichter zugeordnet sind. Darunter fallen die energetischen Anteile der Umwälzpumpen (Quelle und Senke), der Heizstäbe der Wärmepumpe, des Trinkwasserspeichers und/oder Pufferspeichers, sowie der WP-Steuerung. Durch die detailreiche Erfassung der jeweiligen Wärmepumpenanlagen ist es mit der aktuellen Feldmessung möglich, diese Fragestellung zu beantworten.

Hier fällt auf, dass die Wärmepumpen mit den höchsten Jahresarbeitszahlen JAZ+ zum Teil auch die höchsten Hilfsbetriebsanteile aufweisen (z.B. SW(13) mit 19% und LW(8) mit 8%). Der energetische Anteil der Senkenumwälzpumpe wird dabei bei der JAZ+ nicht berücksichtigt. In der JAZ+ werden nur die elektrischen Anteile der Quellenumwälzpumpe bzw. des Ventilators, des Heizstabes der Wärmepumpe sowie der WP-Steuerung miteinberechnet.

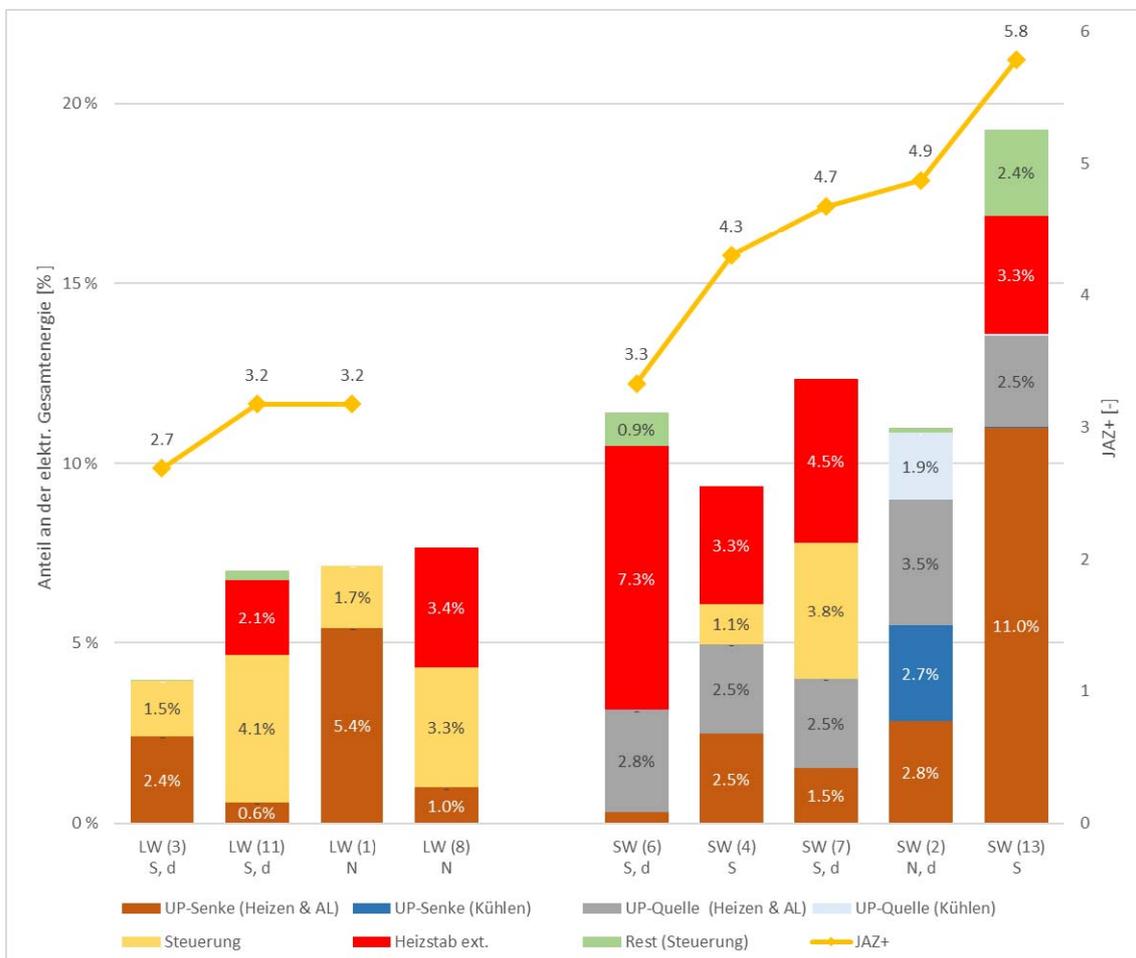


Abbildung 7: Darstellung der Jahresarbeitszahl JAZ+ und der energetischen Anteile der jeweiligen Hilfsaggregate bei unterschiedlichen Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpensystemen. In Klammern stehen jeweils die Objektnummern (Bsp.: LW (3) = Luft/Wasser-Wärmepumpe des Objektes mit der internen Bezeichnung 3)). Legende: S = Sanierung, N = Neubau, d = drehzahlregulierte Wärmepumpe

Sehr schön in dieser Abbildung ist ersichtlich, dass der energetische Anteil der Quellenumwälzpumpe (betrifft nur die Erdsonden-Wärmepumpen) in den Anlagen nur zwischen 2.5 % und 5.4 % liegen. Mit anderen Worten, die Quellenumwälzpumpen haben einen geringen Einfluss auf die

Gesamteffizienz der Anlage (max. 5.4 % bei den ausgewerteten Anlagen). Die Anlage SW(2) weist den höchsten energetischen Anteil der Quellenumwälzpumpe auf. Es kann wohl davon ausgegangen werden, dass entweder die Pumpe überdimensioniert ist, oder die Druckverluste der Sonde sehr hoch sind. Im Rahmen der Optimierungsmassnahmen soll hier Klarheit geschaffen werden.

Der Elektroheizeinsatz aller Wärmepumpenanlagen variiert zwischen 0.0 % und 7.3 %. Bei den Elektroheizeinsätzen muss jedoch noch unterschieden werden, ob es sich um den Heizstab in der Wärmepumpe oder in einem externen Speicher handelt. Der Elektroheizeinsatz in den externen Speichern wird in der JAZ+ nicht mitberücksichtigt. Die Wärmepumpenanlage SW(6) weist den höchsten energetischen Anteil des Elektroheizstabs auf. Dieser heizt den Trinkwasserspeicher wöchentlich auf über 60 °C auf (interne Legionellenschaltung). Welchen Einfluss die beiden zusätzlichen Hilfsaggregate (Senkenumwälzpumpe und externer Elektroheizstab) auf den Wärmenutzungsgrad WNG haben, wird im Kapitel 3.2 beschrieben. Der «Rest», der in der Abbildung 7 aufgelistet ist, weist ebenfalls auf die Steuerung hin. Hier wird dieser energetische Verbrauch jedoch nicht separat, sondern mit einem anderen Verbraucher zusammen gemessen.

In Abbildung 8 werden noch die Betriebsstunden des Verdichters («tBh_V1»), der Senkenumwälzpumpe («tBh_Pu_Se») sowie der Quellenumwälzpumpe («tBh_Pu_Qu») dargestellt. Wie Abbildung 7 aber bereits gezeigt hat, weisen diese Energieanteile nur einen untergeordneten Einfluss auf die JAZ+ der Anlagen auf. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass nur die Anlagen LW(3) und SW(2) über das gesamte Jahr gelaufen sind. Die SW(7) wurde im Januar 2017 in Betrieb genommen.

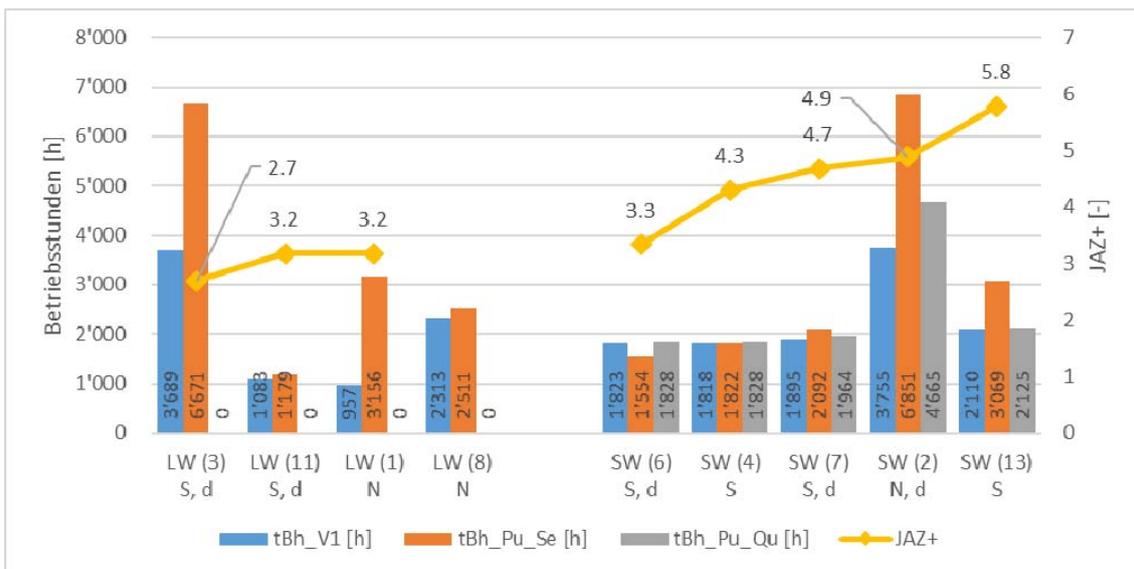


Abbildung 8: Darstellung der Jahresarbeitszahl JAZ+ und der Betriebsstunden von Kompressor und Umwälzpumpen bei unterschiedlichen Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpensystemen. In Klammern stehen jeweils die Objektnummern (Bsp.: LW (3) = Luft/Wasser-Wärmepumpe des Objektes mit der internen Bezeichnung 3)

Aufgrund der unterschiedlichen Auswerteziträume sind die absoluten Zahlen noch nicht abschliessend vergleichbar. Deutlich zu erkennen sind allerdings die relativ unterschiedlichen Betriebszeiten der Pumpen im Vergleich zu den Kompressoren der Wärmepumpen. Bei den Systemen LW(1) läuft die Senkenumwälzpumpe 3.8 mal länger als der Kompressor, bei den Systemen LW(3) und SW(2) ca. doppelt so lange. Bei den Systemen LW(8), SW(4) und SW(7) sind die Betriebszeiten von Senkenumwälzpumpe und Kompressor nahezu identisch. Beim System SW(2) läuft die Quellenumwälzpumpe um ca. 1'000 Betriebsstunden mehr als der Kompressor, was auch auf den Kühlbetrieb im Sommer zurückzuführen ist. Spannend ist auch, dass die Kompressorlaufzeiten der beiden drehzahlregulierten Sole/Wasser-Wärmepumpen (SW(7) = 1'895 h und SW(2) =

3'755 h) um rund Faktor 2 voneinander abweichen. Auch in diesem Punkt soll im Rahmen der Optimierungsmassnahmen Klarheit über die unterschiedlichen Laufzeiten geschaffen werden.

3.2.2 Wärmenutzungsgrad WNG

Je nach Laufzeit und Leistung der Senken-Umwälzpumpe oder des Heizstabes eines Speichers kann der Wärmenutzungsgrad WNG somit deutlich kleiner sein, als die Jahresarbeitszahl JAZ+. Bei den betrachteten Objekten bleibt die Reihung entsprechend Effizienz gleich. Der Unterschied zwischen dem effizientesten und dem ineffizientesten System wird bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen dadurch etwas reduziert (Bereich 2.6 bis 3.1), bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen sogar deutlich reduziert (Bereich 3.1 bis 5.0).

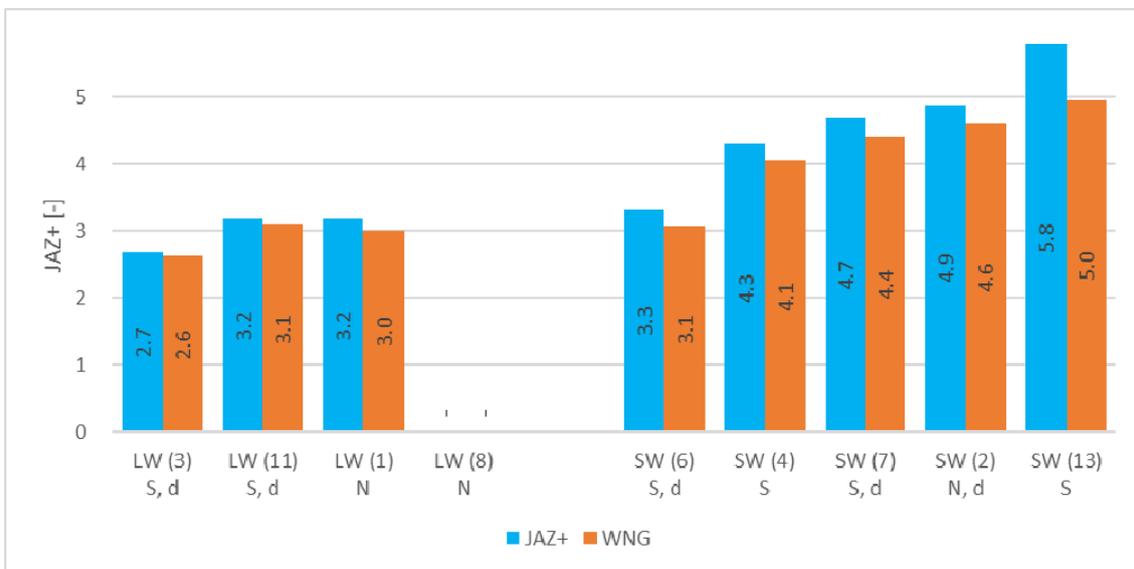


Abbildung 9: Darstellung der Jahresarbeitszahl JAZ+ und des Wärmenutzungsgrades WNG bei unterschiedlicher Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpensystemen. Beim JAZ+ wird die elektrische Energie der Senken-Umwälzpumpe nicht berücksichtigt, weshalb er etwas höher sein kann. In Klammern stehen jeweils die Objektnummern (Bsp.: LW(3) = Luft/Wasser-Wärmepumpe des Objektes mit der internen Bezeichnung 3)

Bei den Heizungsanlagen LW(3) und LW(11) sind die beiden Kennzahlen praktisch identisch. Dies kommt daher, dass die obengenannten Hilfsaggregate (Senken-Umwälzpumpe und el. Heizstab) nur einen sehr kleinen Anteil (rund 2.5%) vom gesamten elektrischen Energieaufwand sind.

Bei den System SW(6) und SW(13) ist der Wärmenutzungsgrad WNG allerdings wesentlich niedriger als die Jahresarbeitszahl JAZ+. Jedoch sind die Gründe für diese Differenz bei diesen beiden Anlagen unterschiedlich. Die SW(6) hat vor allem einen sehr hohen zusätzlichen energetischen Anteil des Trinkwasserspeicher-Elektroeinsatzes (> 7%, bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben). Der WNG bei der SW(13) ist um rund 14% niedriger als die JAZ+, weil der energetische Anteil der Senken-Umwälzpumpe etwa 11% des gesamten elektrischen Verbrauchs ausmacht. Bei allen anderen Heizungsanlagen spielt der elektrische Verbrauch der Senken-Umwälzpumpe eher eine kleinere Rolle. Wärmepumpe SW(13) läuft während der Winterperiode mit einer Temperaturdifferenz (dT) von rund 3 K zwischen Vorlauf und Rücklauf (Heizbetrieb). Dieses kleine dT führt zu einem hohen Volumenstrom senkenseitig, was wiederum zusammen mit der langen Pumpenlaufzeit den hohen energetischen Anteil der Umwälzpumpe erklärt. Dies zeigt eindrücklich, dass eine Optimierung der JAZ+ nicht gleichzeitig zu einer Optimierung der Gesamteffizienz des Heizungssystems führt.

3.3 Detailbetrachtungen der Wärmepumpe des Objektes 3

In diesem Kapitel wird die Luft/Wasser-Wärmepumpe des Objektes 3 etwas detaillierter betrachtet, da dieses Heizsystem

- die geringsten Jahresarbeitszahlen aufweist,
- und nur bei diesem Objekt die Jahresarbeitszahl im Heizbetrieb kleiner ist, als die Jahresarbeitszahl des Aufladebetriebs.

Deshalb werden die Jahresarbeitszahlen JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung, sowie die Quellen und Senken-Temperaturen auf Monatsbasis dargestellt.

3.3.1 Monatliche Darstellungen der Systemtemperaturen und wichtigsten Kennwerte (z.B. JAZ+)

In Abbildung 10 erkennt man sehr gut, wie die Effizienz im Heizbetrieb mit den kleineren Senkenvorlauftemperaturen während des Sommers zunimmt bzw. mit den steigenden Senkenvorlauftemperaturen während der Heizperiode abnimmt. Der Heizbetrieb ist jeweils in «BLAU» dargestellt.

Beim «ORANGE» dargestellten Aufladebetrieb ist die Vorlauftemperatur bei der Aufladung im Jahresverlauf in etwa konstant. Die Senkenaufladetemperatur liegt im gesamten Jahr während der Aufladung zwischen 51.9 °C und 55.0 °C. Somit lässt sich die geringe Variation der Effizienz nur über die Quelltemperatur erklären.



Abbildung 10: Darstellung der Jahresarbeitszahl JAZ+ und die mittlere Vorlauftemperatur «Tavg_SAus» im Heiz- und Aufladebetrieb der Luft/Wasser-Wärmepumpe von Objekt 3.

Deshalb wurden in Abbildung 11 die Jahresarbeitszahlen JAZ+ der Quellen-Eingangs-Temperatur Tavg_Qein gegenübergestellt. Hier erkennt man eine weitgehende Korrelation zwischen der Quellen-Eingangs-Temperatur Tavg_Qein und den monatlichen Jahresarbeitszahlen JAZ+.

Die Quellen-Eingangs-Temperatur Tavg_Qein schwankt bei dieser Luft/Wasser-Wärmepumpe zwischen -2.3 °C (Januar 2017) und 21.1 °C (Juni 2017) bei der Aufladung. Das Maximum im Heizbetrieb liegt mit 15.8 °C (Juli 2017) deutlich unter dem Maximum der Aufladung, da speziell im

Sommer nur an den wenigen «relativ kühlen» Tagen geheizt wird. Die Gesamt-Jahresarbeitszahl JAZ+ _Heizen wird natürlich vom Heizbetrieb während der Heizperiode dominiert, und liegt bei 2.7.

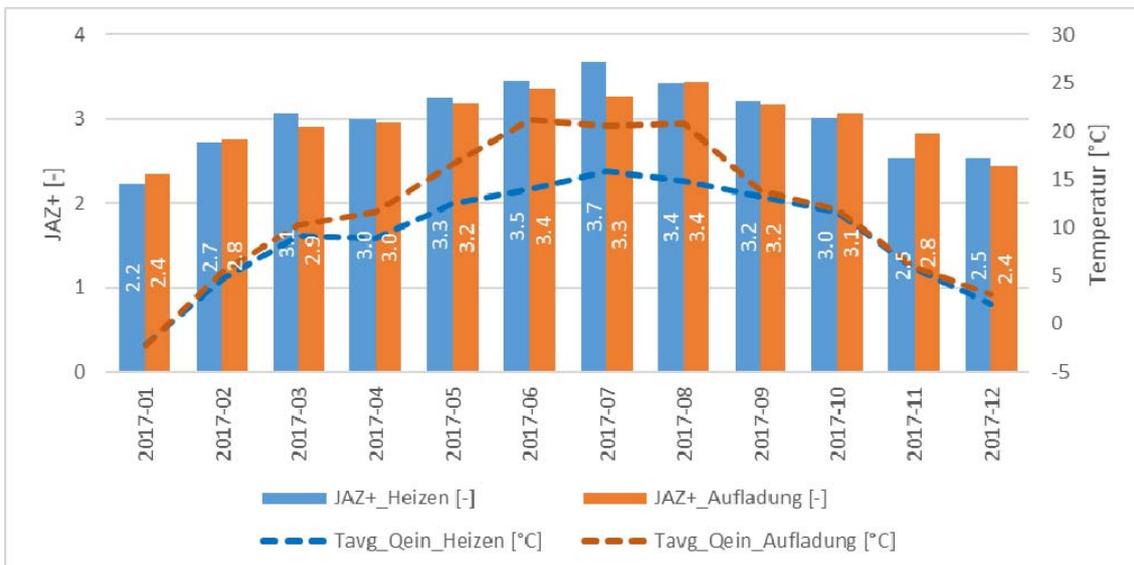


Abbildung 11: Darstellung der Jahresarbeitszahl JAZ+ und die mittlere Quellen-Eingangs-Temperatur «Tavg_QEin» im Heiz- und Aufladebetrieb der Luft/Wasser-Wärmepumpe von Objekt 3.

In Abbildung 12 werden die Monatswerte der thermischen Energie für das Heizen und die Aufladung, sowie die Jahresarbeitszahl JAZ+ dargestellt. In dieser Abbildung ist sehr schön ersichtlich, dass der energetische Bedarf nach Trinkwarmwasser im Jahr etwa konstant bleibt. In den Sommermonaten nimmt dieser jedoch ein wenig ab (Bedarf an Trinkwarmwasser nimmt ab). Etwas anders sieht es beim Heizbetrieb aus. Der Heizbedarf steigt bei tieferer Aussentemperatur stark an und umgekehrt, was natürlich bezüglich des hohen Heizwärmebedarfs von 130 kWh/m² nicht verwundert.

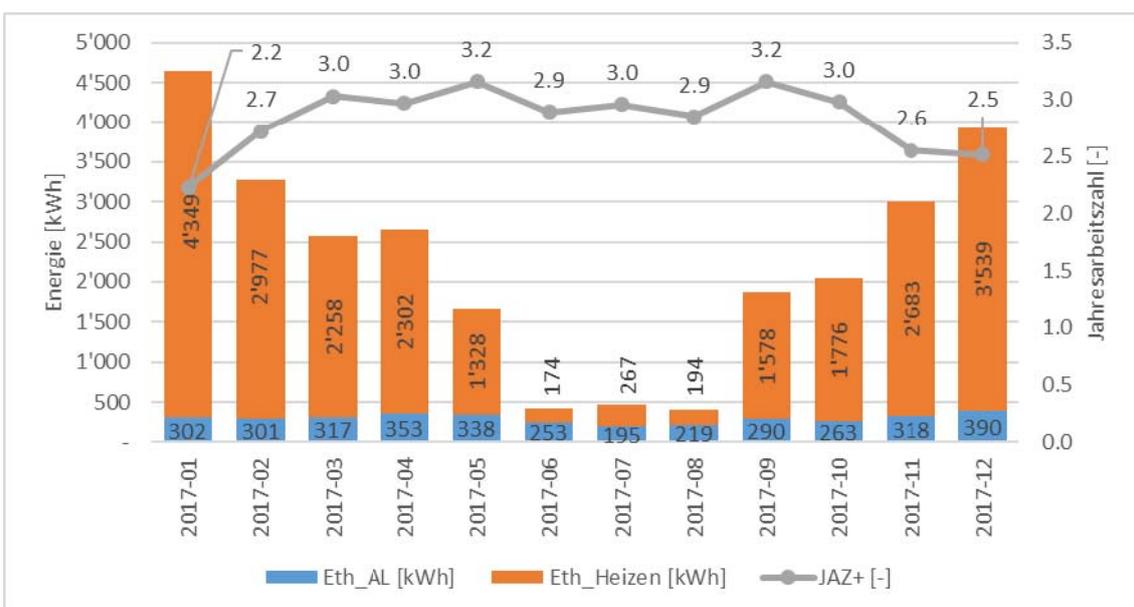


Abbildung 12: Monatswerte der thermischen Energie für das Heizen (Eth_Heizen) und die Aufladung (Eth_AL) sowie die Kennzahl JAZ+

Der relative Laufzeitanteil des Kompressors sowie die Durchschnittstemperaturen der Aussenluft über die einzelnen Monate ist in Abbildung 13 dargestellt. Das Laufzeitmaximum wurde im Januar 2017 mit 83 % erreicht. Da es sich hier um eine drehzahlregulierte Wärmepumpe handelt, könnten die Laufzeiten vor allem in den Winter- und Übergangsmonaten (Frühling und Herbst) höher liegen. In diesen Monaten liegt sie zwischen 50 und 70 %.



Abbildung 13: Monatsmittelwert der Aussenemperatur (Tavg_Aus1) und die relative Laufzeit des WP-Kompressors (Ant_V1) bezogen auf die entsprechenden Monatsstunden

In der Abbildung 14 wird auf die monatliche Unterschiede zwischen der JAZ+ und JAZ+ (netto) eingegangen. Hier zeigt sich, dass die JAZ+ nicht in allen Monaten einen Mittelwert von den beiden JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung entspricht.

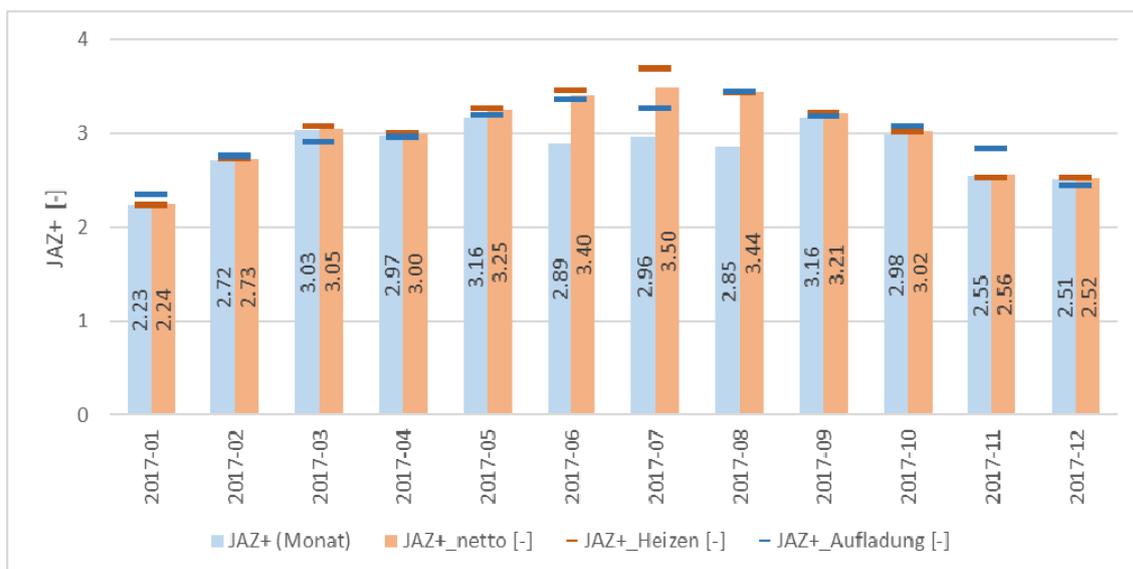


Abbildung 14: Jahresarbeitszahlen im Vergleich über die Monate

Sehr schön ersichtlich ist, dass die beiden JAZ+-Werte vor allem in den Sommermonaten (Juni, Juli und August) um mehr als 15 % voneinander abweichen. Das heisst, dass über 15 % des energetischen Verbrauchs in diesem Zeitraum auf den Standby zurückzuführen ist. In diesen 3 Monaten läuft die Wärmepumpe nämlich nur um rund 7 bis 8 % (siehe Abbildung 13). Da die JAZ+ (netto) zwischen den beiden JAZ+_Heizen und JAZ+_Aufladung liegt, kann auch zugleich deren Plausibilität überprüft werden.

3.3.2 Systemtemperaturen, thermische Leistungen und Betriebsstunden in Abhängigkeit der Aussentemperatur

Mit den folgenden Diagrammen soll herausgefunden werden, ob die Wärmepumpe gut dimensioniert und eingestellt ist.

In Abbildung 15 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen der Senke beim Heizen in Abhängigkeit der Aussentemperatur dargestellt. Die Zunahme der Senkentemperatur bei tieferen Aussentemperaturen ist gut erkennbar. Trotzdem ist auffallend, dass die Senkentemperatur um 0 °C Aussentemperatur einen Sprung von ca. 8 K macht. Bei einer Aussentemperatur von -7 °C (entspricht etwa der Auslegetemperatur) liegt die Vorlauftemperatur bei rund 56 °C und bei +15 °C liegt diese noch bei rund 45 °C.

Die hohen Senkentemperaturen von über 50 °C oberhalb von 15 °C Aussentemperatur sind bezüglich der Umschaltung zwischen Aufladung und Heizen und dem niedrigen Volumenstrom in dieser Zeit zu erklären.

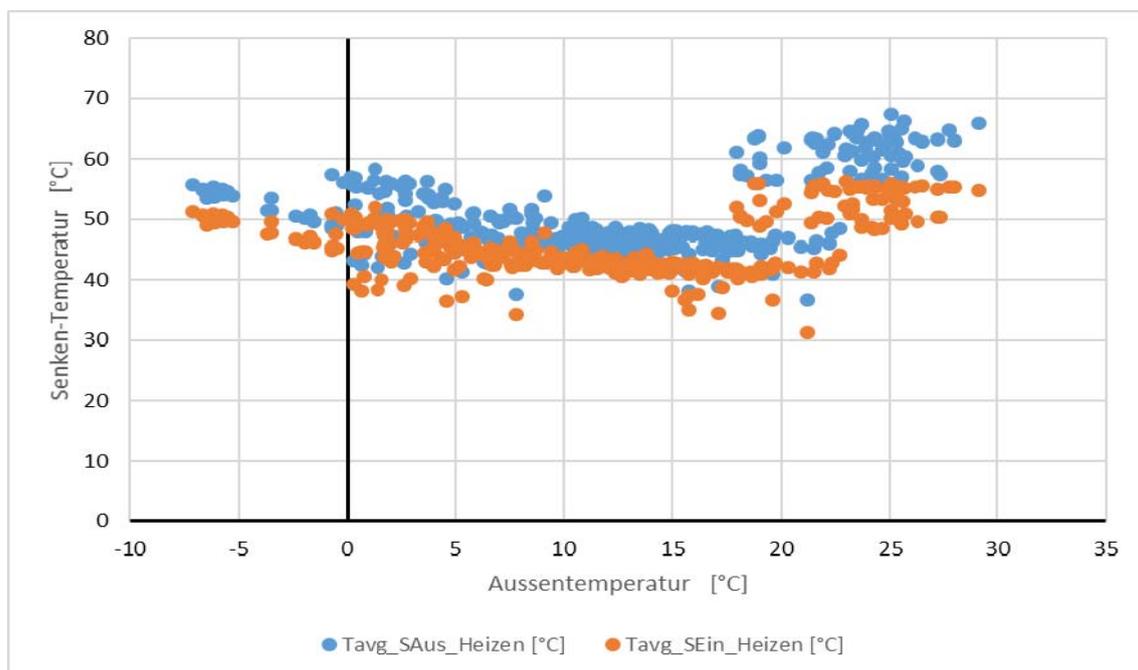


Abbildung 15: Tagesmittelwerte der Senkenvorlauf- (Tavg_SAus_Heizen) und Rücklauftemperatur (Tavg_SEin_Heizen) im Heizbetrieb in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Tavg_Aus1)

Die Einstellung der Temperatur im Trinkwasserspeicher bleibt über das Jahr gesehen sehr konstant. Die mittlere Aufladetemperatur liegt im Schnitt bei 53 °C. Dies ist in der Abbildung 16 gut ersichtlich. Die maximale Aufladetemperatur liegt jedoch etwas höher (siehe Abbildung 5), ist aber in dieser Abbildung nicht ersichtlich.

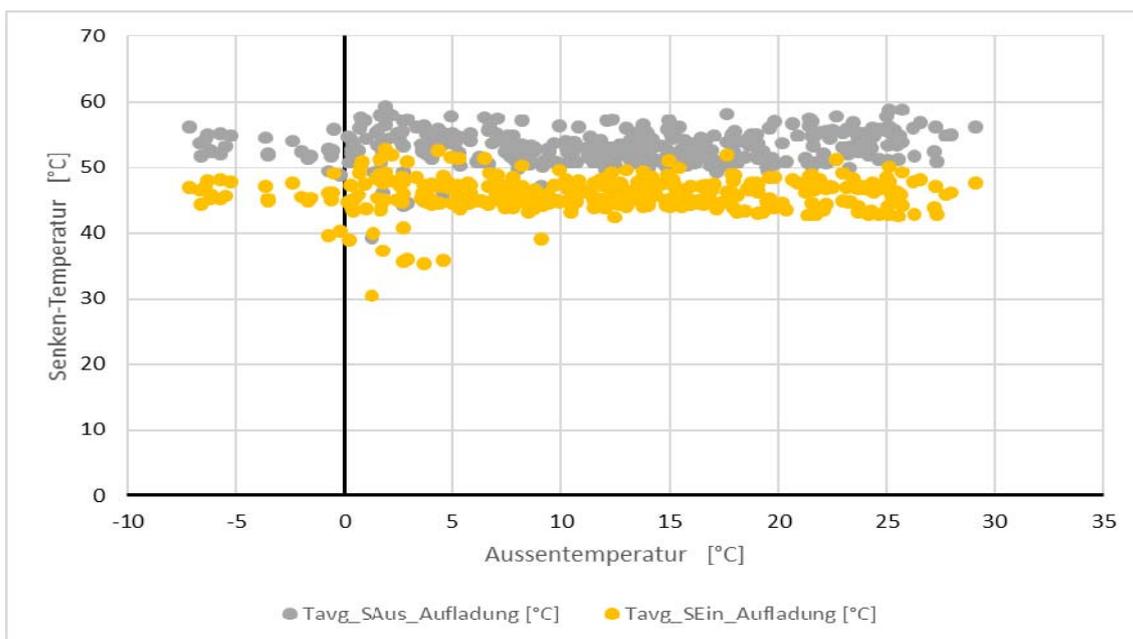


Abbildung 16: Tagesmittelwerte der Senkenvorlauf- (Tavg_SAus_Aufladung) und Senkenrücklauf- (Tavg_SEin_Aufladung) während Aufladung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Tavg_Aus1)

Nun stellt sich die Frage, wie sich die Abgabeleistungen (thermische Leistung während dem Heizbetrieb und der Trinkwasseraufladung) in Abhängigkeit der Aussentemperatur verhalten. Die mittleren Tagesleistungen sind in der Abbildung 17 grafisch dargestellt.

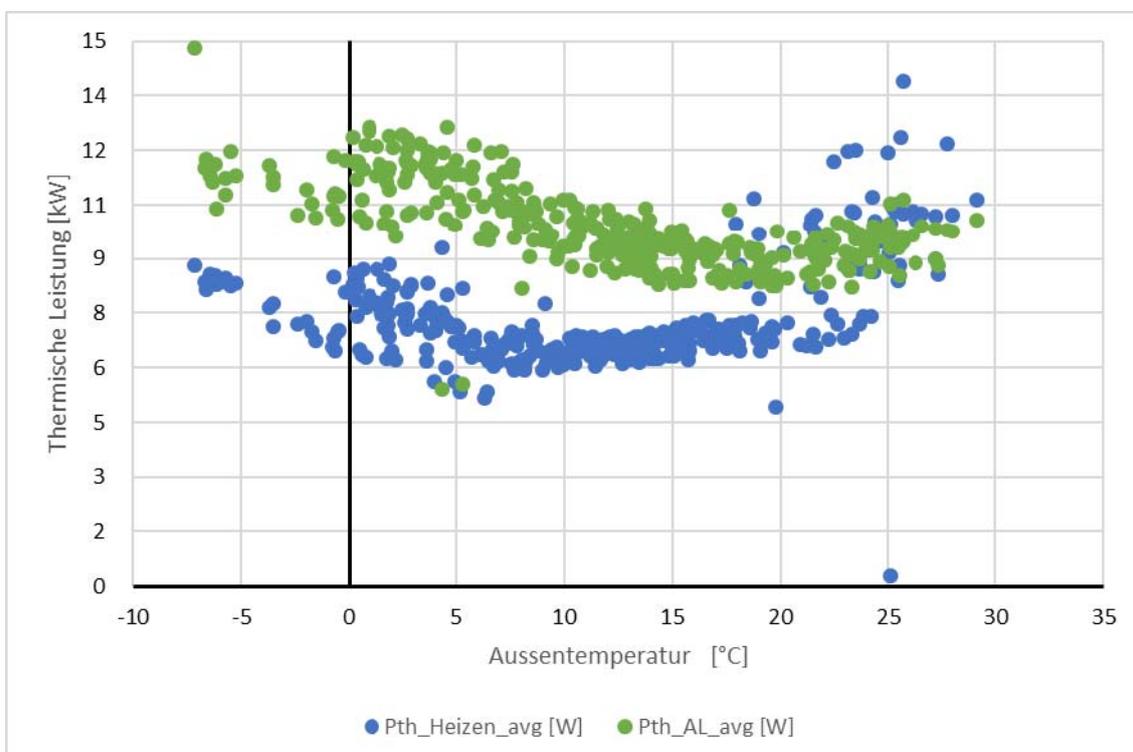


Abbildung 17: Tagesmittelwerte der thermischen WP-Leistung beim Heizen (Pth_Heizen_avg) und bei der Aufladung (Pth_AL_avg) in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Tavg_Aus1)

Die Heizleistung der Wärmepumpenanlage liegt beim Auslegepunkt (-7 °C) bei rund 9 kW. Die Wärmepumpe kann die Heizleistung bis rund +7 °C modulieren. Bei dieser Aussentemperatur liegt die Heizleistung noch bei rund 6 kW. Auch hier ist ein Sprung um die 0 °C Aussentemperatur ersichtlich. Dies kann hier durch die Abtauung erklärt werden. Daher ist die mittlere Tagesleistung unterhalb dieser Aussentemperatur niedriger (Die Abtauleistung wird negativ gemessen, da sie dem System Wärme entnimmt).

Auffallend ist, dass die Leistung für die Trinkwassererwärmung höher ist, als jene zum Beheizen des Gebäudes. Diese Leistung steigt bis 12 kW hoch bei der Auslegetemperatur. Auch die Leistung zur Aufladung des Trinkwasserspeichers wird moduliert. Hier reduziert sich die Leistung auf etwa 9 kW.

Das Potential der Leistungsregulierung wird bei dieser Anlage bestimmt nicht voll ausgenützt. Das zeigen auch die Werte der Verdichter-Betriebsstunden, die in der folgenden Abbildung abgebildet sind.

Die Kühlung wird ab einer Aussentemperatur von 20 °C aktiviert. An vereinzelt Tagen ist die Kühlung praktisch den gesamten Tag aktiviert. Auffallend ist, dass die Wärmepumpe auch noch oberhalb von 20 °C das Gebäude vereinzelt heizt. Es gibt mehrere Tage, an denen sowohl Heizung als auch Kühlung aktiv sind.

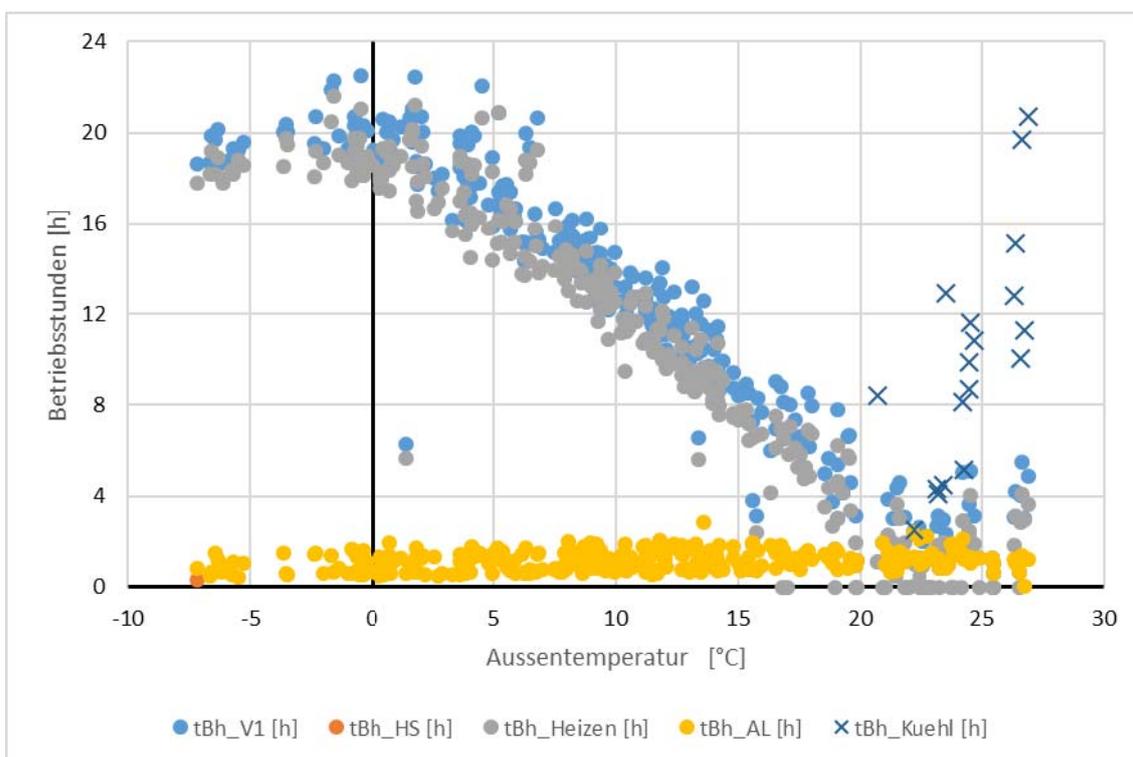


Abbildung 18: Tages-Betriebsstunden des Kompressors (tBh_V1), des Heizstabes (tBh_HS) und Stunden im Heizbetrieb (tBh_Heizen) bzw. Aufladung (tBh_AL), sowie Tages-Betriebsstunden im Kühlbetrieb in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

In Abbildung 19 sind die Betriebszeiten der Abtauungen ersichtlich. Über eine längere Zeit taut die Wärmepumpe vor allem unterhalb von +4 °C ab. Jedoch werden Abtauungen bis +14 °C Aussentemperatur registriert und gemessen. Dies überrascht, da die Wärmepumpe bei diesen hohen Quellentemperaturen bereits in niedriger Teillast läuft (geringe Kälteleistung).

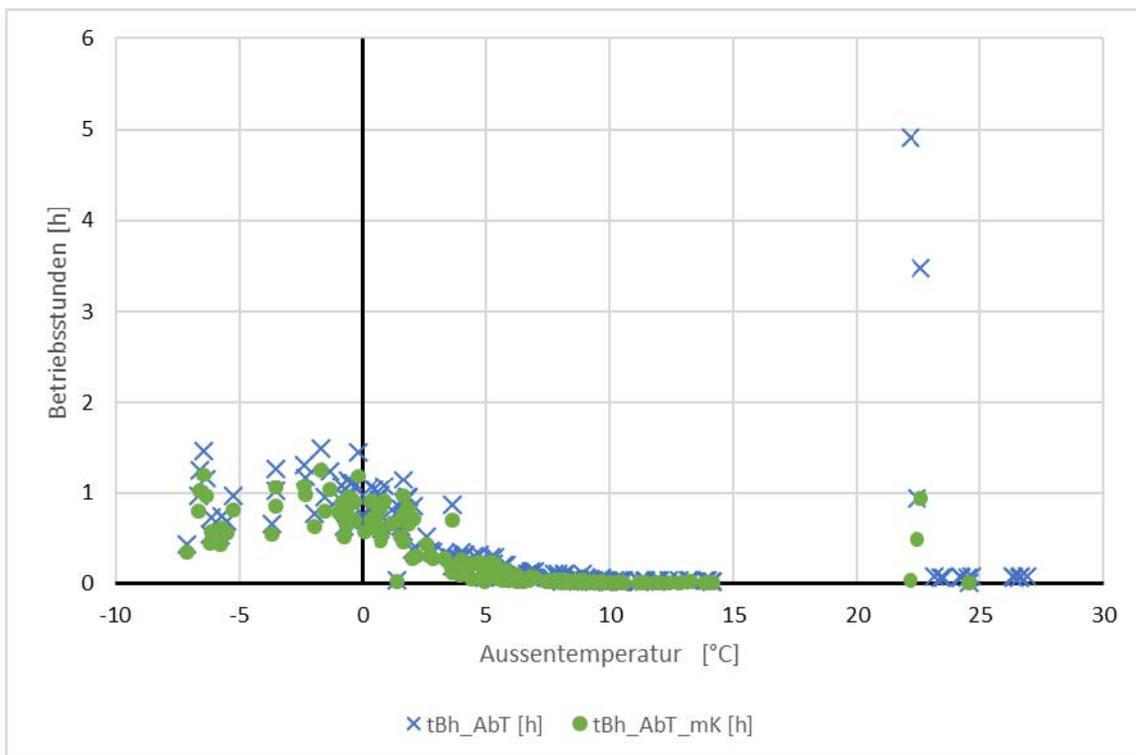


Abbildung 19: Tagestunden im Betriebszustand „Abtauung gesamt“ (tBh_AbT) bzw. „Abtauung mit Kompressor EIN“ (tBh_AbT_mK) [Differenz entspricht der Abtropfzeit] in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Tavg_Aus1)

3.3.3 Laufzeiten pro Start und Tagesverteilung

Im ersten Teil wird die Häufigkeit der Kompressor-Betriebszeit je Startvorgang abgebildet. Die Abszisse gibt dabei das Intervall der Betriebszeit wieder, die Ordinate die Anzahl der WP-Laufzeiten je Startvorgang, welche innerhalb von diesem Intervall liegen (z.B. entspricht hier der Balken beim Häufigkeitswert „131“ der Anzahl der WP_Laufzeiten im Intervall von 0 bis 5 min).

In Abbildung 20 sind nun die Laufzeithäufigkeiten je Kompressor-Start inklusive Kühl- und Abtauvorgänge dargestellt. Da vor allem die Abtauvorgänge die Laufzeitdauer und Starts des Verdichters etwas verzerren können, wird auch eine Auswertung durchgeführt, die die Kühl- und Abtauvorgänge nicht berücksichtigt (siehe Abbildung 21). Beim untersuchten Objekt 3 reduzieren sich daher die Starts vor allem in den Intervallen zwischen 0 bis 35 min. Mit dieser Auswertung wird auch ersichtlich, wie lange eine Abtauung dauert und wie oft diese vorkommt. Beim Objekt 3 dauert die Abtauung durchschnittlich weniger als 15 min.

Die Wärmepumpe läuft im Schnitt etwa 50 min. Ob die Wärmepumpe nun eher taktet oder durch einen Abtaubetrieb unterbrochen wurde, muss durch anderweitige Auswertungen herausgefunden werden. Daher kann und darf nicht pauschal auf eine Überdimensionierung der Wärmepumpe geschlossen werden. Ausserdem sind z.T. die Trinkwasseraufladungen sehr kurz (siehe Kapitel 3.3.4), die ebenfalls in diesen Laufzeiten mitberücksichtigt sind.

Die Gesamtstarts reduzieren sich mit dieser Anpassung um 624 Starts von 5'118 auf 4'494.

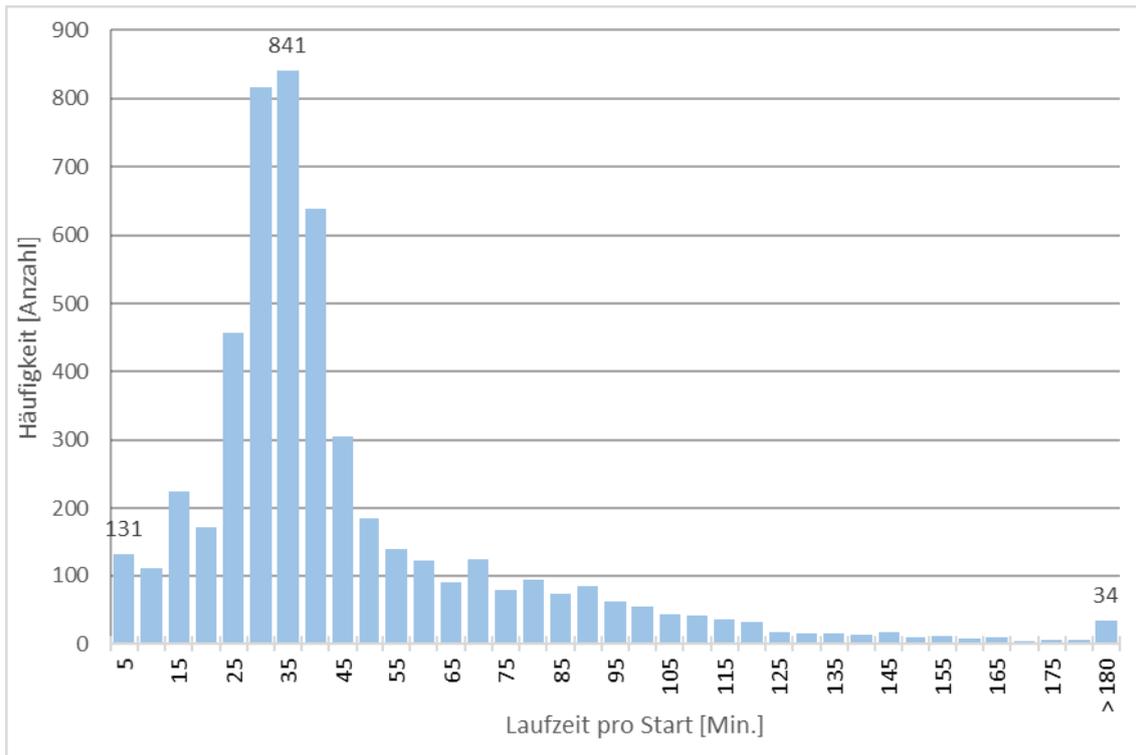


Abbildung 20: Anzahl der WP-Laufzeiten je Start (jeder Kompressor-Start wird als eigenes Ereignis ausgewertet) - mit Kühlen & Abtauung (Objekt 3 - 5'118 WP-Starts mit einer mittleren Laufzeit von 43.3 Minuten)

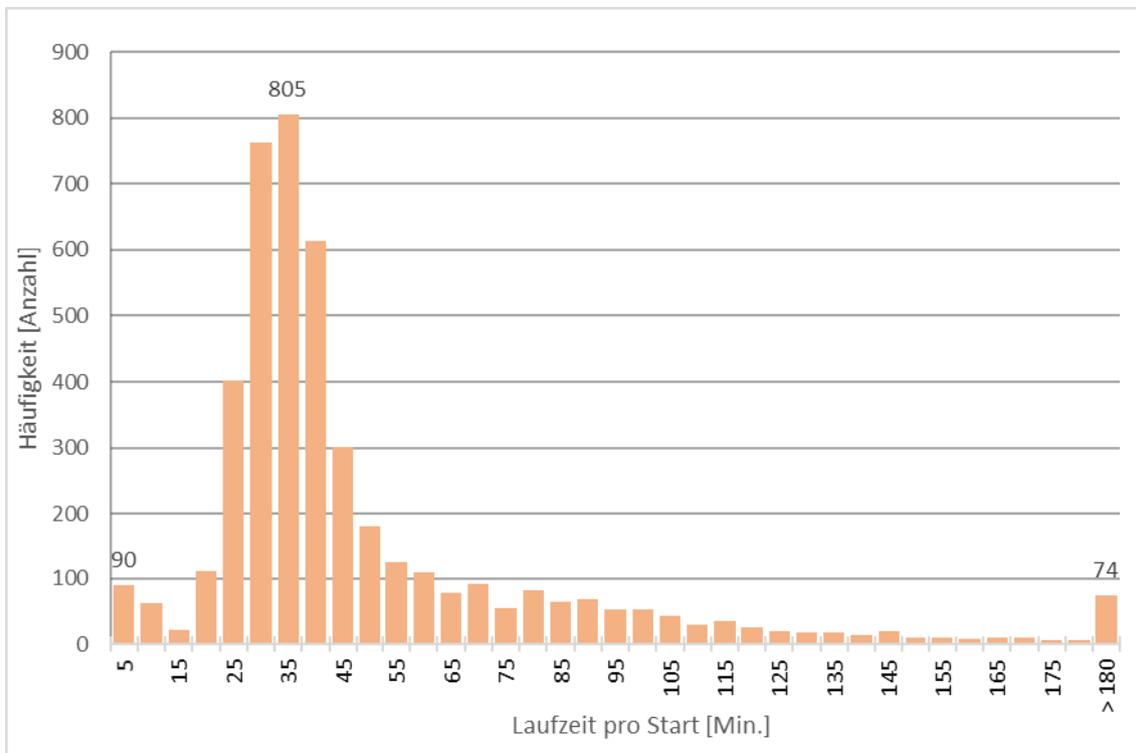


Abbildung 21: Anzahl der WP-Laufzeiten je Start - ohne Berücksichtigung eines Abtau- oder Kühlbetriebes (Objekt 3 - 4'494 WP-Starts mit einer mittleren Laufzeit von 49.4 Minuten)

Im zweiten Teil wird die Summe der gesamten Betriebszeit innerhalb jeder einzelnen Tagesstunde dargestellt. Läuft z.B. eine WP von 01:30 Uhr bis 03:15 Uhr, so wird diese Laufzeit wie folgt aufgeteilt:

Tabelle 2: Erläuterung der Betriebszeiten

| | |
|--------------|-----------|
| Stunde 1 | + 0 h |
| Stunde 2 | + 0.50 h |
| Stunde 3 | + 1.00 h |
| Stunde 4 | + 0.25 h |
| Stunde 5,... | + 0 h,... |

Die Aufteilung der Laufzeit über die Stunden des Tages ist in Abbildung 22 dargestellt. Wird wie oben beschrieben die Betriebszeit über die einzelnen Tages-Urzeiten aufaddiert, so ergibt sich beim Objekt 3 die maximale Betriebszeit in der 22. Stunde (21 bis 22 Uhr). Die minimale Betriebszeit ist am Mittag (11 bis 12 Uhr) ersichtlich, was auf die werkstägliche EW-Sperre zurückzuführen ist (nur an Wochentagen). In der Summe beläuft sich die gesamte EW-Sperrzeit auf 259 Stunden im Berichtsjahr 2017.

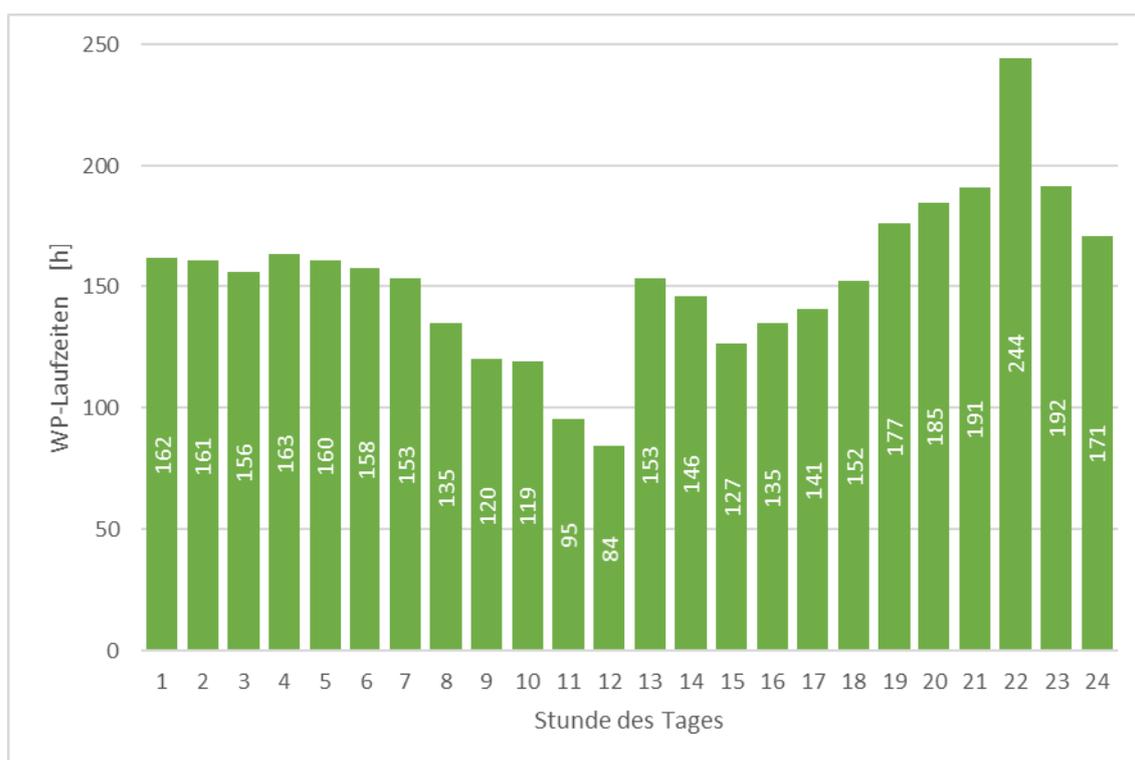


Abbildung 22: Aufteilung der Gesamtlaufzeit über die jeweiligen Stunden des Tages (ohne Kühlen und Abtaugung!) – Objekt 3 mit 3'679 Betriebsstunden im Jahr 2017 (Bsp.: Stunde „2“ ist dabei das Intervall von 01:00 Uhr bis 02:00 Uhr)

3.3.4 Tagesausschnitt – Vorlauftemperatur über 70 °C

Einerseits ist in der Abbildung 5 ersichtlich, dass die Anlage beim Objekt 3 eine maximale Aufladetemperatur von 70.5 °C hat und andererseits der energetische Anteil des Heizstabes bei 0% liegt (siehe Abbildung 7). Um besser zu verstehen, was eigentlich an einem solchen Tag geschieht, wird dieser explizit analysiert. In der Abbildung 23 wird darauf eingegangen.

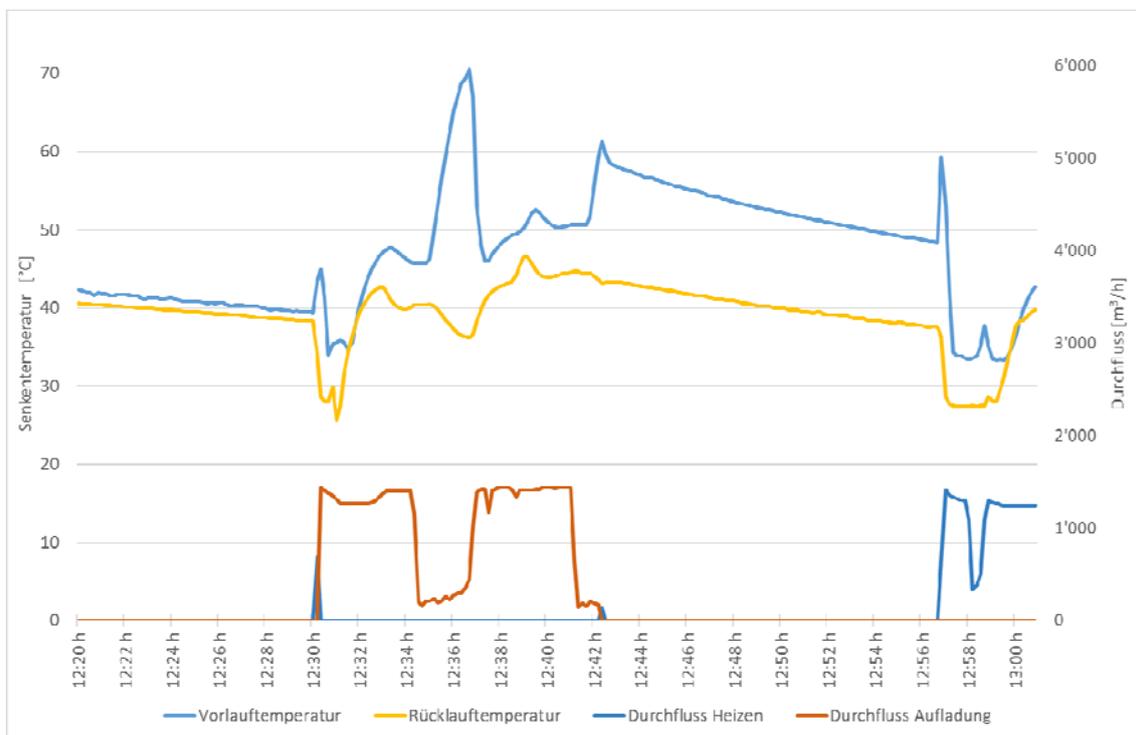


Abbildung 23: Verlauf der Vorlauf- (01_Saus1) und Rücklauftemperatur (03_Sein1) sowie der Volumenstrom am 2.9.2017 (Objekt 3)

In diesem Diagramm sind die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie die beiden Volumenströme während Heizbetrieb und Aufladung ersichtlich. Auffallend ist, dass während der Aufladung der Volumenstrom kurzfristig für 2 min sehr stark von ca. 1.4 m³/h auf rund 0.1 m³/h runterreguliert. In dieser Zeit steigt die Vorlauftemperatur von anfangs 45 °C auf über 70 °C. Mit der folgenden Grafik wird auch ersichtlich, dass zu diesem Zeitpunkt der Elektroheizstab nicht in Betrieb war, sondern nur der Verdichter.

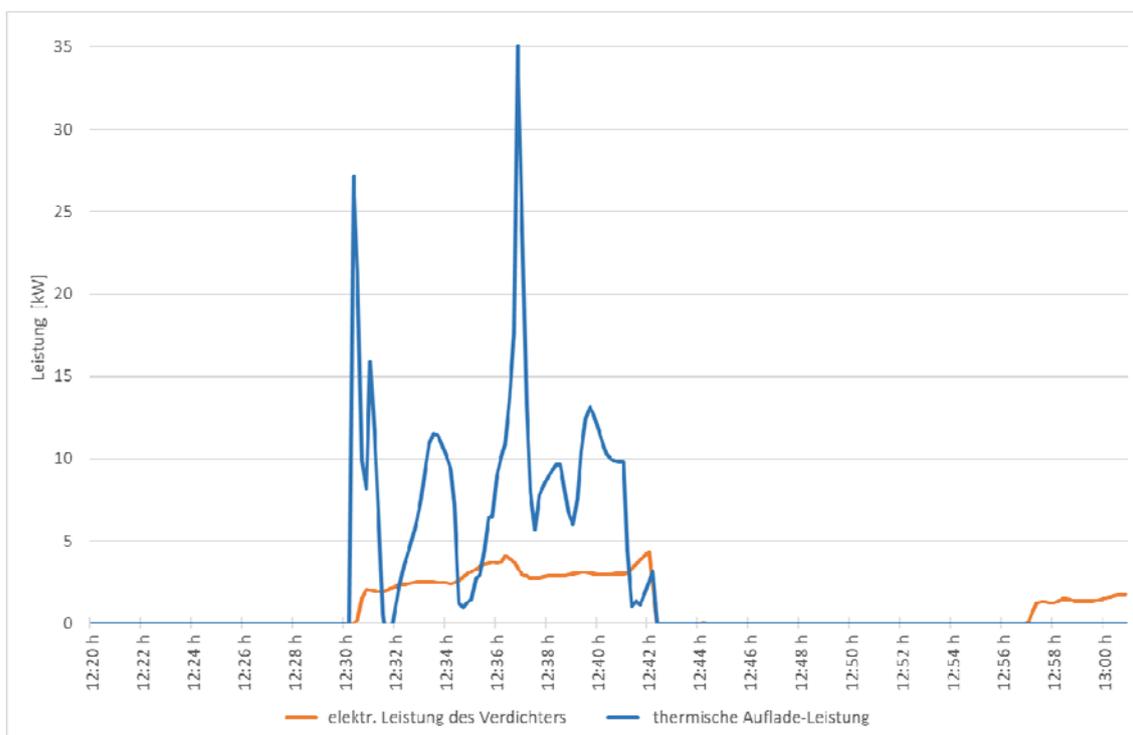


Abbildung 24: Verlauf der elektrischen Aufnahmeleistung des Verdichters sowie die thermische Leistung während der Aufladung am 2.9.2017 (Objekt 3)

Ausserdem ist erstaunlich mit welcher inkonstanter Wärmeleistung der Trinkwasserspeicher aufgeladen wird. Die Wärmeleistung variiert von 0 bis 35 kW. Insgesamt dauert die untersuchte Trinkwasseraufladung nur 12 min. Die Wärmeabgabe in den Trinkwasserspeicher scheint durch das schnelle aufladen nicht optimal zu funktionieren. Die Effizienz der Trinkwassererwärmung kann durch eine gezielte Änderung der Regelparameter (niedrigere Leistung) auf jeden Fall erhöht werden. Es stellt sich so oder so die Frage, ob die Aufladung in einer solch kurzen Zeit durchgeführt werden muss.

4 Energetische Auswertungen zu den Gebäuden

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

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

Heizwärmebedarf [kWh/m²]

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

Gesamtwärmebedarf [kWh/m²]

$$HGT_{20_12}$$

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

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

Diese Kennwerte werden über das ganze Jahr aufsummiert, weshalb aufgrund der Datenlage nur die Werte für die Objekte 2 und Objekte 3 aussagekräftig sind. Deshalb werden hier auch nur diese beiden Objekte dargestellt. Im nächsten Bericht werden wesentlich mehr Anlagen für diese Werte herangezogen.

4.1 Heizwärme-, Gesamtwärmebedarf und Heizgradtage der Objekte 2 und 3

Objekt 2 wurde bis auf das Grundfundament des Gebäudes komplett erneuert (Fenster, Fassade, Dach, Böden und Heizungssystem inklusive der Verteilung), weshalb es in diesem Bericht der Kategorie «Neubau» zugewiesen wird. Das Objekt 3 ist eine reine Heizungssanierung. Weder die Fenster noch die Fassade wurde erneuert.

Umso spannender wird der Vergleich dieser beiden Objekte. Die Heizgradtage HGT_{20_12} beim Objekt 3 sind zwar um rund 5 % niedriger als beim Objekt 2, jedoch liegt der Heizwärmebedarf mehr als dreimal höher. Die Heizgradtage beziehen sich direkt auf die Aussentemperatur des Gebäudes. Im nächsten Bericht werden die Altbauten (Heizungssanierungen) mit einer HGT_{20_16} mit den HGT_{20_12} von Neubauten verglichen.

Der Grenzwert vom Gesamtwärmebedarf von Minergie liegt bei 55 kWh/m²a und von Minergie A liegt bei 35 kWh/m²a. Für diese Bilanz sind bereits Heizwärmebedarf und Trinkwasserwärmebedarf miteinander aufsummiert.

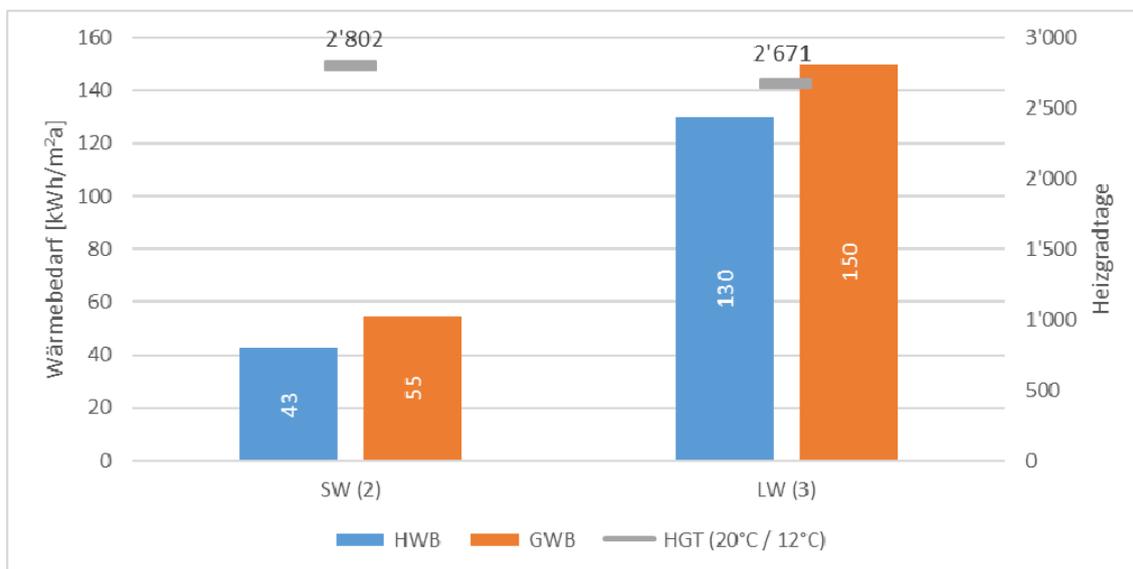


Abbildung 25: Darstellung des Heizwärmebedarfes (QH_HWB), des Gesamtwärmebedarfes (GWB) sowie der Heizgradtage.

In Abbildung 25 ist ersichtlich, dass das Objekt 2 mit 55 kWh/m²a die Grenzwerte von Minergie (38 kWh/m²a) nicht einhalten kann. Der Grenzwert für Minergie-P liegt bei 30 kWh/m²a. Das Objekt 3 hat einen Gebäude-Standard vom Jahr 1984. Der Trinkwarmwasseranteil nimmt relativ gesehen bei besserer Bausubstanz zu, jedoch liegt dieser beim Objekt 2 bei rund 23 % und nicht bei 50 %, wie vielerorts kommuniziert.

5 Ausblick

Für die nächsten beiden Jahre werden für dieses Projekt noch 4 weitere Anlagen aufgenommen, die bereits seit November und Dezember 2017 in Betrieb sind. Somit werden im Jahr 2018 insgesamt 13 Anlagen mit der automatisierten Datenerfassung überwacht werden. Alle diese Wärme-

pumpen-Anlagen werden weiterhin ausgemessen, um im nächsten Schritt etwaige Optimierungsarbeiten durchführen zu können.

Um das Potential der Messdaten besser ausnutzen zu können, sollen 2018 vertiefte Analysen für spezielle Fragestellungen durchgeführt werden. Diese sollen unter anderem auch als Semesterarbeiten im Bachelor- und/oder Masterstudiengang der NTB ausgeschrieben werden, um eine möglichst breite Perspektive zu präsentieren. Mögliche Fragestellungen hierfür sind:

- Analyse des Abtauens der Luft/Wasser-Wärmepumpen
- Analyse des Taktverhaltens
- Detailanalyse jener Anlagen, die bereits mehr als ein Jahr Laufzeit haben
- Vergleich der JAZ und WNG aus dem Projekt FAWA und dem momentanen Projekt (die Systemgrenzen der beiden Projekte sind jedoch nicht gleich)
- Untersuchung der Trinkwasserbereitung und Legionellen-Schaltungen
- Einfluss der Nebenaggregate
- Erarbeitung von Optimierungsmassnahmen für einzelne Objekte
- etc.

Die Ergebnisse dieser Analysen sollen einerseits branchenintern, aber auch für das breite Publikum aufbereitet werden. Hierfür sind Präsentationen geplant, aber auch Publikationen in «Planer&Installateur», «Friscaldo», etc.

6 Schlussfolgerung

Das Projekt «WP_Felmessungen» entwickelt sich in die richtige Richtung. Die Aufbauphase im Hinblick auf Messkonzept, Datenerfassungssystem, Anlagen-Akquise, Datenbank und Grobauswertungen ist abgeschlossen. Die Auswertungen erster Anlagen konnte inzwischen erfolgreich begonnen werden. Im kommenden Jahre soll der Fokus verstärkt auf die detaillierten Auswertungen und die Publikation der Resultate gelegt werden. Zudem stehen erste Anlagen zur Optimierung an, um einen Vorher/Nachher-Vergleich zu ermöglichen, der aufzeigt, welches Potential in einer gezielten Optimierung liegt.

Die hohe Datenqualität verspricht auch die Möglichkeit von spannenden Auswertungen mit unterschiedlichsten Fragestellungen, wie im Kapitel «Ausblick» aufgezeigt.

Erste Erkenntnisse bei diesem Projekt sind, dass nicht nur die Senken- bzw. Quelltemperatur einen grösseren Einfluss auf die Effizienz hat, sondern auch der energetische Anteil der Hilfsaggregate. Beim Wärmenutzungsgrad WNG wird dies sehr schön ersichtlich. Ausserdem ist ersichtlich, dass die Regelung einzelner Wärmepumpenanlagen noch Potential haben in Bezug auf:

- Leistungsmodulierung
- Aufladung des Trinkwasserspeichers
- Abtauung

Der Fokus für das kommende Jahr liegt vor allem auf den detaillierten Auswertungen und der Publikation der Resultate.

Für die bisherigen Feldmessdaten werden die Kennzahlen JAZ 1 und JAZ 2 wie folgt berechnet:

$$JAZ\ 1 = Q_{WP} / E_{tot}$$

$$JAZ\ 2 = (Q_{Heiz} + Q_{WP,SPW}) / E_{tot}$$

mit

$$E_{tot} = E_{WP} + E_{Qu,WP} + E_{WP,SPW} + E_{Steuer}$$

wobei

Q_{WP} Thermische Energie der WP [kWh]

Q_{Heiz} Thermische Energie zur Heizung [kWh]

$Q_{WP,SPW}$ Thermische Energie der Aufladung zum Warmwasserspeicher [kWh]

(Hinweis: Es ist jedoch nicht sichergestellt, dass diese Wärme in allen Anlagen wirklich gemessen wurde.)

Die entsprechenden Energien sind:

E_{WP} Elektrische Energie der Wärmepumpe [kWh]

$E_{Qu,WP}$ Elektrische Energie der Umwälzpumpe der Quelle für Sole/Wasser WP [kWh]

$E_{WP,SPW}$ Elektrische Energie der Umwälzpumpe der Senke zum Warmwasserspeicher [kWh]

E_{Steuer} Elektrische Energie der WP-Steuerung [kWh]

7.1 Auswertung der Jahresarbeitszahlen

Die Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die JAZ 1 Werte der verschiedenen ausgewerteten Anlagen, aufgeteilt in Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen pro Objekt nach Betriebsjahren.

Die Analyse zeigt, dass die JAZ 1 bei L/W-WP zwischen 1.4 und 5.2, bzw. 2.4 und 6.6 bei S/W-WP liegt. Je nach Anlage variieren die Werte. Es gibt Anlagen mit guten bis sehr guten JAZ 1 Zahlen. Die Objekte 1211 und 1212 verwenden Stall-Luft als Quelle mit höheren Umgebungstemperaturen.

In den folgenden Abbildungen sind alle bis zum 26.1.2018 erhaltenen Daten eingearbeitet. Die aktuellsten Daten vom Jahr 2017 sind derzeit Daten vom 4. Juni 2017. Nach dem Erhalt neuer Daten werden die Grafiken entsprechend aktualisiert.

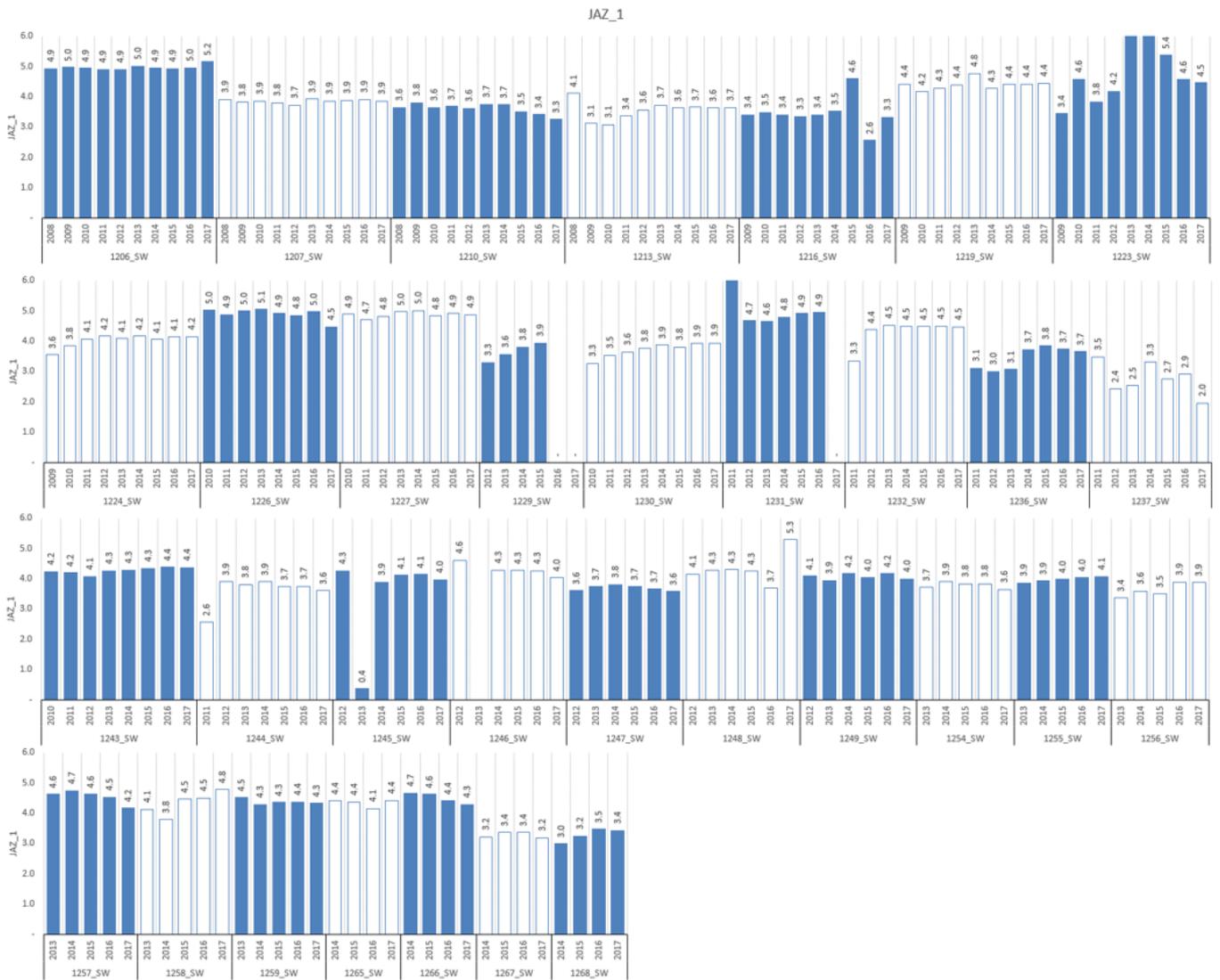


Abbildung 27: JAZ 1 der bisherigen Feldmessungen der Sole/Wasser WP (33 Objekte) im Verlauf der Betriebsjahre

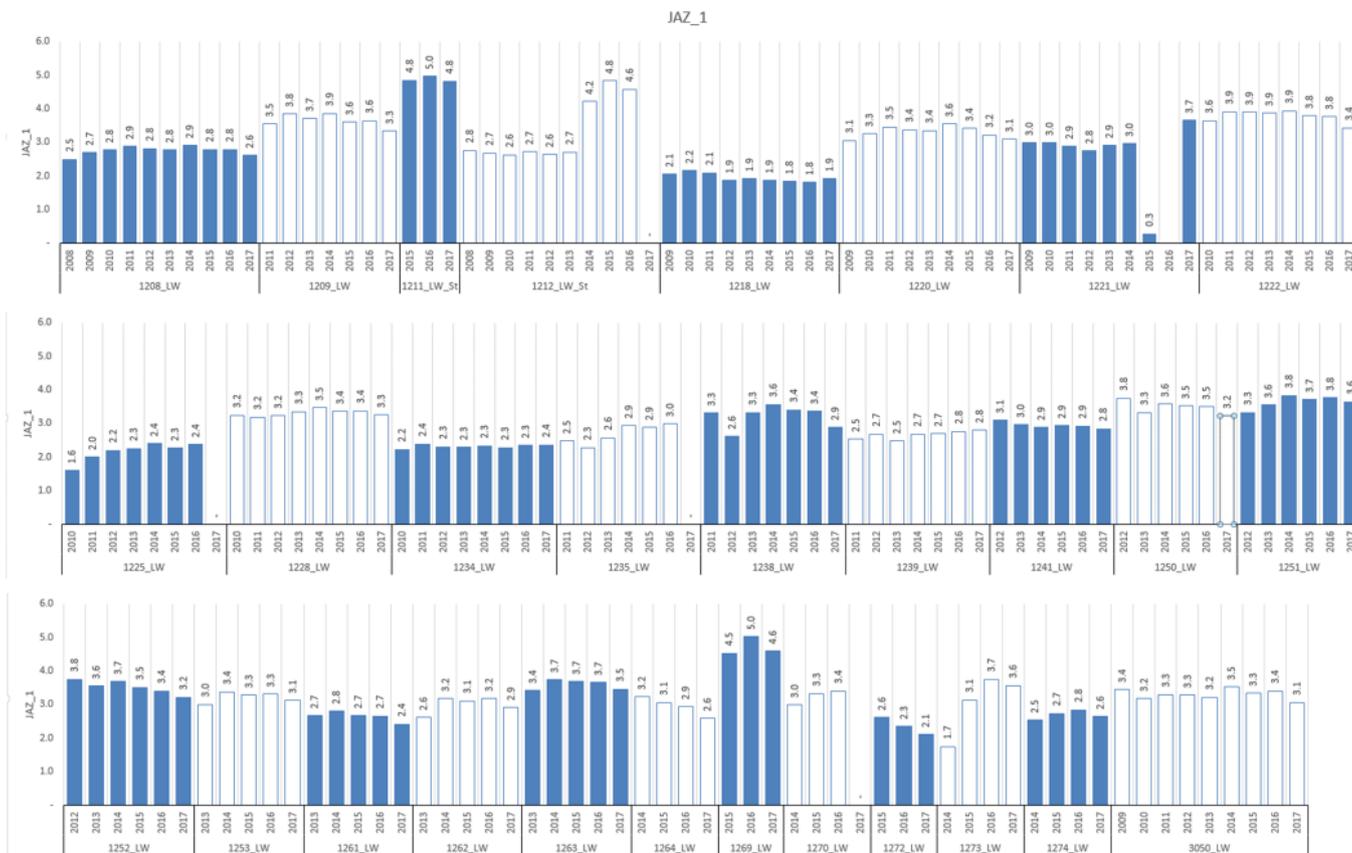


Abbildung 28: JAZ 1 der bisherigen Feldmessungen der Luft/Wasser WP (31 Objekte) im Verlauf der Betriebsjahre

Abbildung 29 zeigt die JAZ 2 Werte der bisherigen Feldmessungen für die L/W-WP der Objekte 1205 und 1271, sowie der S/W-WP Objekt 1244. Die JAZ 2 Werte liegen hier im Bereich von 1.5 bis 3.5.

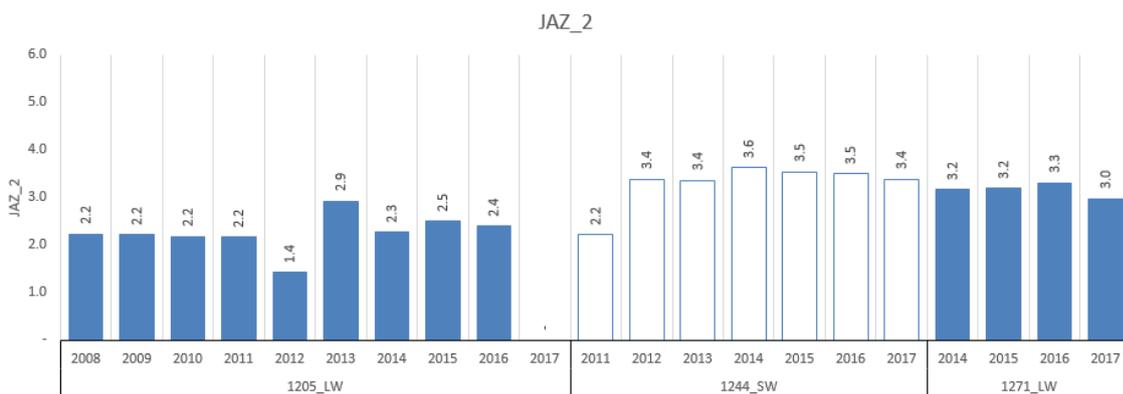


Abbildung 29: JAZ 2 der bisherigen L/W-WP (Objekte 1205 und 1271) und S/W-WP (Objekt 1244) Feldmessungen

Die Abbildung 30 vergleicht die verfügbaren JAZ 1 und JAZ 2 Werte von der Sole/Wasser-WP des Objektes 1244 im Verlauf der Betriebsjahre. Die Differenz zwischen der JAZ 2 und JAZ 1 illustriert die Speicherverluste des Pufferspeichers. Die Speicherverluste liegen jährlich zwischen 7.0 % und 8.7 %.

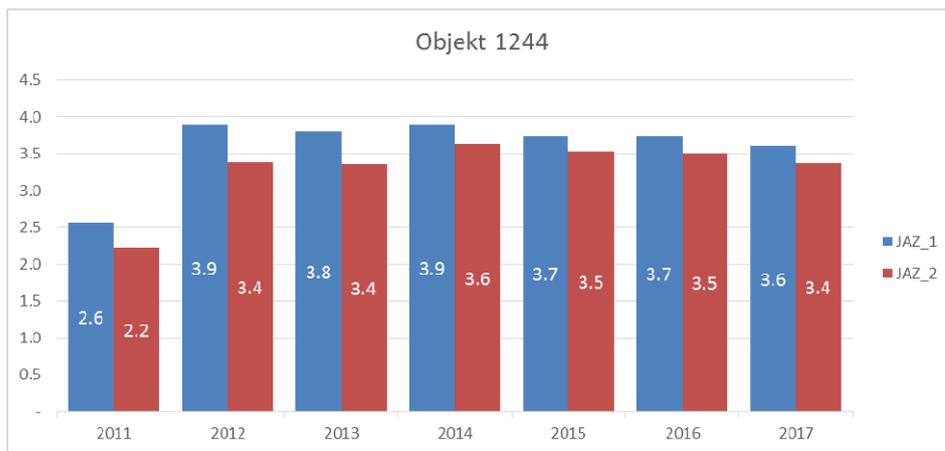


Abbildung 30: Vergleich JAZ 1 und JAZ 2 der bisherigen Feldmessung S/W-WP (Objekt 1244) im Verlauf der Betriebsjahre

7.2 Thermische Energie

Neben den JAZ Kennzahlen werden auch die thermischen Energien protokolliert. Diese Daten werden immer wieder von Hand abgelesen, weshalb Ablesefehler auftreten können, welche sich als Ausreisser bemerkbar machen.

Die Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die totalen thermischen Energien der 33 Sole/Wasser- bzw. 31 Luft/Wasser-Wärmepumpen der bisherigen Feldmessungen. Die Werte variieren über die Jahre 2008 bis 2017. Für S/W-WP liegen die jährlichen thermischen Energien im Bereich von 10 bis 55 MWh, für L/W-WP bei 15 bis 28 MWh. Beim Jahr 2017 wurden nur die bisherigen Daten berücksichtigt, da die vollständigen Jahresdaten noch ausstehen.

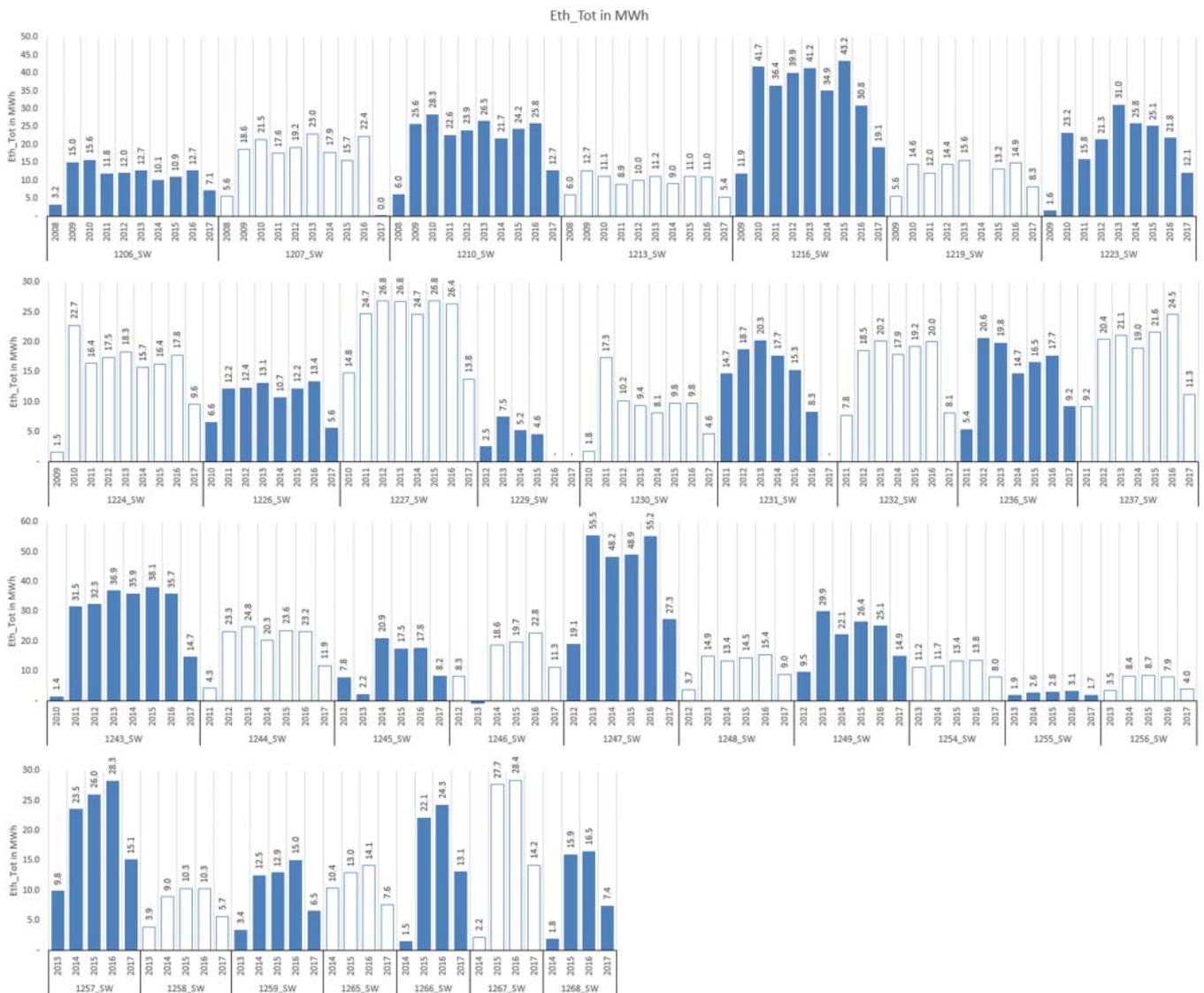


Abbildung 31: Thermische Energien der bisherigen Feldmessung S/W-WP (33 Objekte) im Verlauf der Betriebsjahre

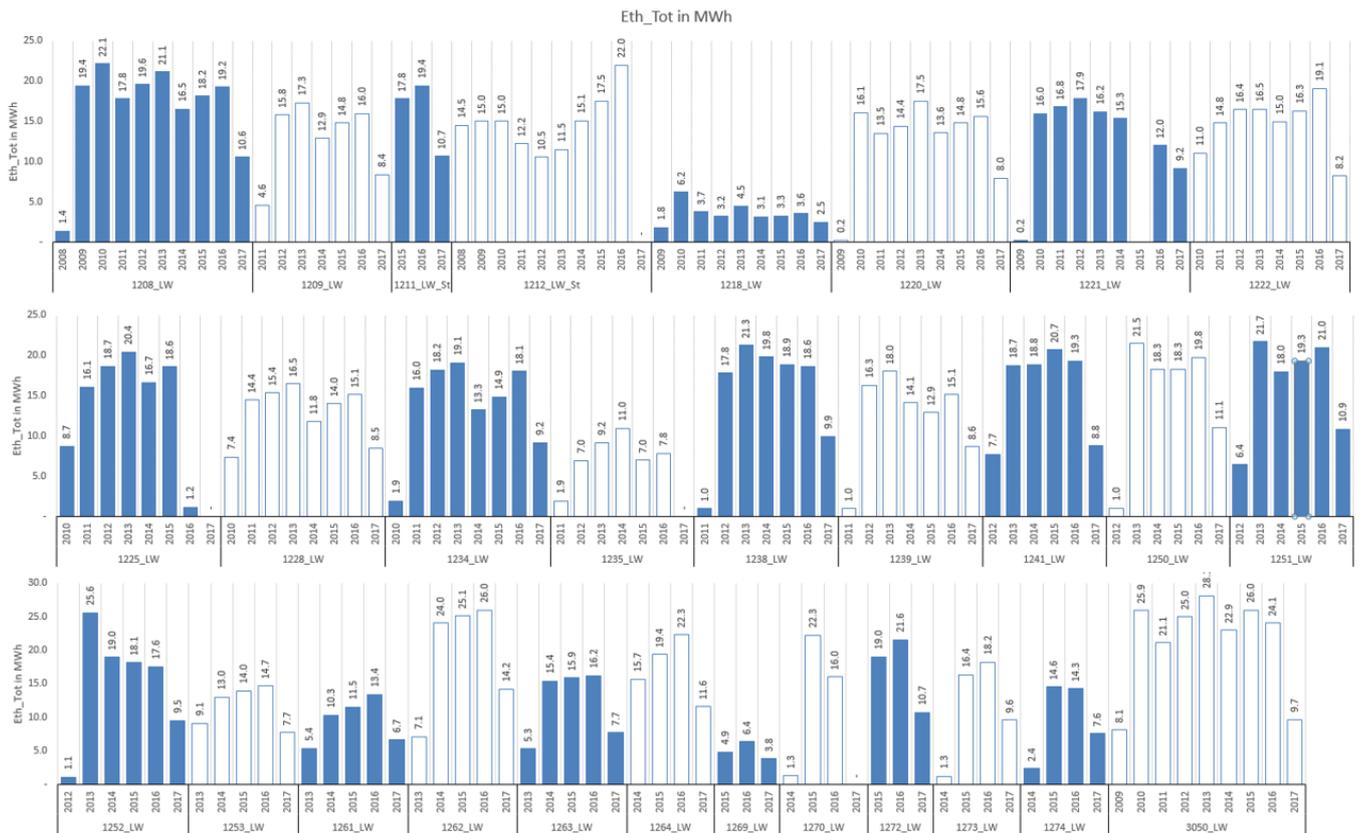


Abbildung 32: Thermische Energien der bisherigen Feldmessung LW-WP (31 Objekte) im Verlauf der Betriebsjahre

8 Literatur

- [1] EN 14511:2013 Teile 1 bis 4: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern; Begriffe, Prüfbedingungen, Prüfverfahren und Anforderungen
- [2] Definition von Nutzungsgraden von Wärmepumpen-Anlagen des BFE
- [3] Hubacher Engineering: QS-WP/QP: Fortsetzung des Feldmonitorings von WP-Anlagen (2011-2014), Schlussbericht, 30. Juni 2015

9 Anhang

9.1 Methodik und Messequipment

Die Messausrüstung für die 15 geplanten Anlagen des Projektes (5 Anlagen je für die Jahre 2015, 2016 und 2017) ist bis auf wenige Details identisch. Bei jeder Wärmepumpenanlage wird ein Schaltschrank verbaut, der u.a. eine SPS (Speicherprogrammierte Steuerung) und Stromwandler für die Berechnung der Aufnahmeleistungen eingebaut hat. Die Abbildung 33 zeigt beispielhaft den Aufbau des Schaltschranks der WP-Anlage F004_2017_SW.

Für die Internetanbindung der SPS ist jeweils zusätzlich ein Site-Manager Modul verbaut. Je nach Anlage wird die Internetverbindung über LAN Kabel, WLAN oder Mobilfunk aufgebaut. Die Daten werden von Zeit zu Zeit über FTP Zugriff von der SPS abgerufen. (Hinweis: Das automatische Versenden der Daten über E-Mails an den Server kann aktuell aufgrund eines Bugs im E-Mail-Container des Herstellers zu SPS Abstürzen und damit auch zu einem Datenverlust führen, weshalb zur Sicherheit im Moment die Auslesung manuell erfolgt).

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 33: 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. 2 3 ersichtlich.

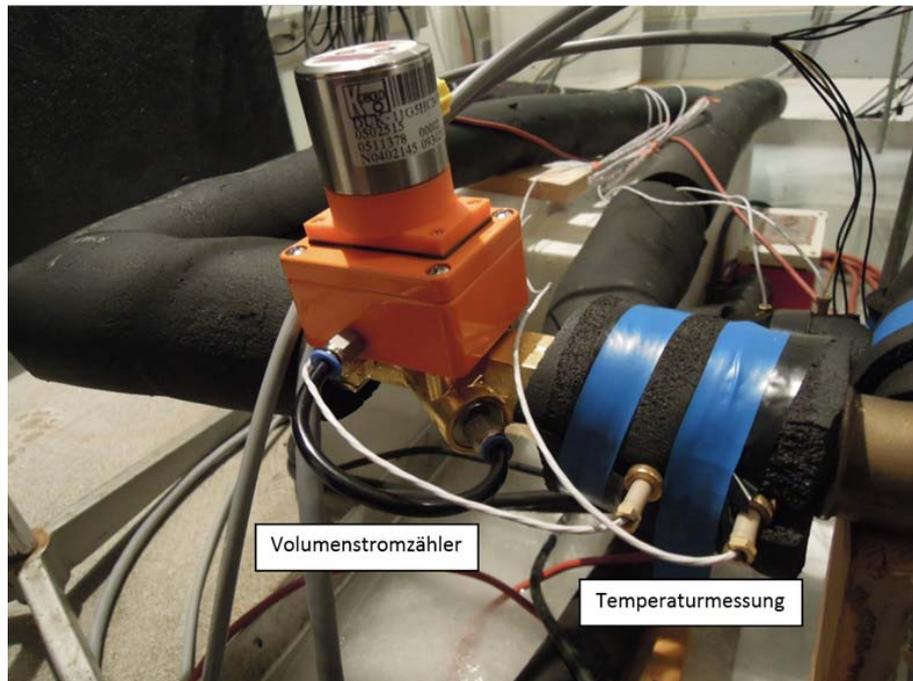


Abbildung 34: Volumenstromzähler und Temperaturmessung (Laboraufbau)

Die gesamten Daten werden auf einem Server in der Schweiz in 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 Id's, wodurch die personenbezogenen Daten in den anderen Datenbanken nicht im Klartext ersichtlich sind (siehe beispielhaft Abbildung 35).

| objectId | objecttypeId | 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 35: Ausschnitt aus der Objekt-Datenbank „wpfldme_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-Id's 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 4 werden zwei Beispiele angeführt: Die allgemeine Funktion „mean_B7oB6_1“ ermittelt die Mittelwerte gemässe der verlinkten Sensor-Id's S1 und S2, in den Zeitabschnitten, in welchen Bit 7 oder Bit 6 des digitalen Signales „47_Dig“ gleich „1“ ist.

Tabelle 3: Beispiel von Funktionsnamen und Berechnungsvorschriften in der Datenbank „wpfeldme_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-Id's bereits fix vorgegeben und im Programmcode hinterlegt.

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

Funktion: Berechnungsvorschrift:

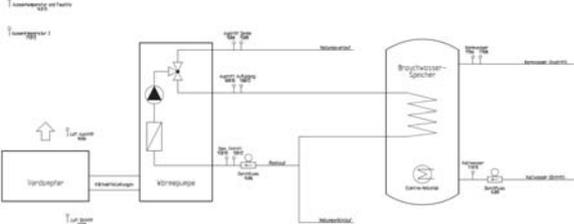
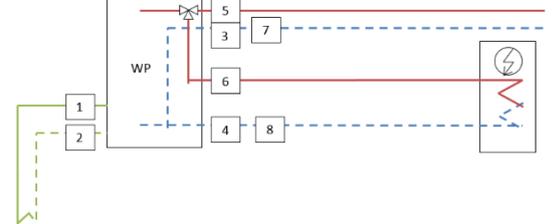
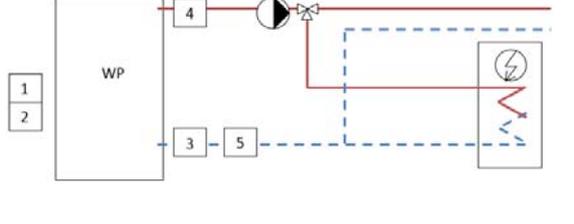
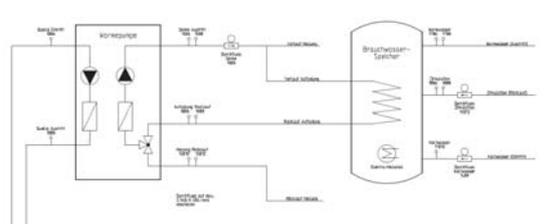
mean_B7oB6_1 Mittelwert von (S1 und S2) jenes Zeitbereiches, wo Bit 6 oder Bit 7 des digitalen Signales 47_Dig = 1 sind (Kompressor 1 oder Kompressor 2 aktiv)

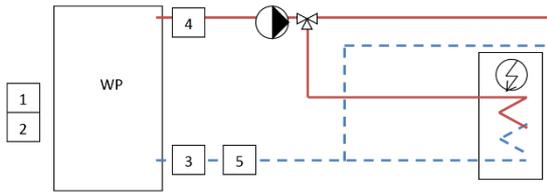
JAZ_BFE $JAZ_BFE = (38_WtS + 40_WtA) / (26_WeiTot - 34_WeUS)$

9.2 Schemas der Anlagen

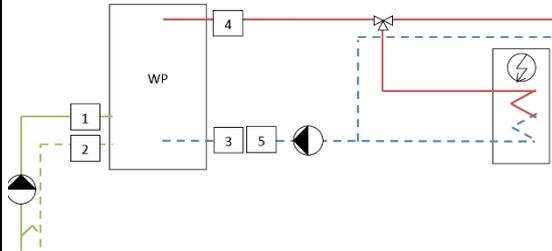
Der hydraulische Aufbau und die Sensorpositionen einiger Objekte sind in den folgenden Schemas im Detail dargestellt:

Tabelle 4: Hydraulik Schemas der WP Anlagen mit Position und Typ der verbauten Sensoren (S/W: Sole/Wasser, L/W: Luft/Wasser, BWW: Trinkwarmwasser).

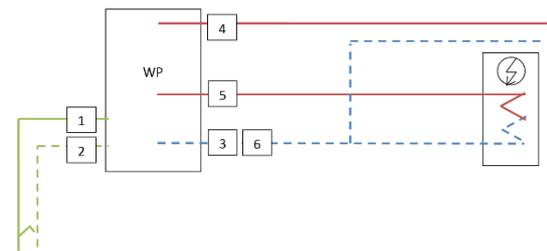
| | |
|--|---|
| <p>F001_LW_2017 (L/W, Neubau)</p>  <p>1 Aussentemperatur (2x) 2 Feuchtefühler 3 Rücklauftemperatur/Temperatur Aufladung Eintritt (2x) 4 Vorlauftemperatur/Temperatur Aufladung Austritt (2x) Volumenstromzähler</p> | <p>F002_SW_2016 (S/W, Neubau)</p>  <p>1 Eintrittstemperatur Quelle 2 Austrittstemperatur Quelle 3 Rücklauftemperatur (2x) 4 Temperatur Aufladung Eintritt (2x) 5 Vorlauftemperatur (2x) 6 Temperatur Aufladung Austritt (2x) 7 Volumenstromzähler Heizen 8 Volumenstromzähler Aufladung</p> |
| <p>F003_LW_2016 (L/W, Sanierung)</p>  <p>1 Aussentemperatur (2x) 2 Feuchtefühler 3 Rücklauftemperatur/Temperatur Aufladung Eintritt (2x) 4 Vorlauftemperatur/Temperatur Aufladung Austritt (2x) 5 Volumenstromzähler</p> | <p>F004_2017_SW (S/W, Sanierung)</p>  <p>1 Quelltemperatur (1x Austritt, 1x Eintritt) 2 Aussentemperatur (1x) 3 Rücklauftemperatur/Temperatur Aufladung Eintritt (2x) 4 Vorlauftemperatur (2x) 5 Temperatur Aufladung Austritt (1x) 6 Volumenstromzähler (1x für Senke, 1x für Kaltwasser) 7 Schwerkraft-Zirkulation (1x Volumenstromzähler- Rücklauf)</p> |

F005_2018_LW (L/W, Neubau)

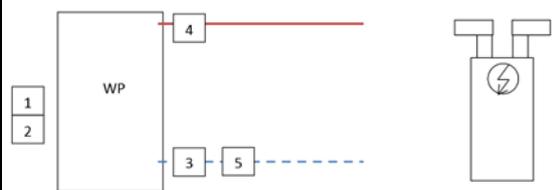
- 1 Aussentemperatur (2x)
- 2 Feuchtefühler
- 3 Rücklauftemperatur/Temperatur
Aufladung Eintritt (2x)
- 4 Vorlauftemperatur/Temperatur
Aufladung Austritt (2x)
- 5 Volumenstromzähler

F006_2017_SW (S/W, Sanierung)

- 1 Eintrittstemperatur Quelle
 - 2 Austrittstemperatur Quelle
 - 3 Rücklauftemperatur (2x)
 - 4 Vorlauftemperatur Heizen und
Aufladung Eintritt (2x)
- Volumenstromzähler Heizen und
Aufladung

**F007_SW_2017** (S/W, Sanierung)

- 1 Eintrittstemperatur Quelle
- 2 Austrittstemperatur Quelle
- 3 Rücklauftemperatur (2x)
- 4 Vorlauftemperatur Heizen (2x)
- 5 Aufladung Eintritt (2x)
- 6 Volumenstromzähler Heizen
und Aufladung

F008_LW_2017 (L/W u. BWW, Neubau)

- 1 Aussentemperatur (2x)
- 2 Feuchtefühler
- 3 Rücklauftemperatur/Temperatur
Aufladung Eintritt (2x)
- 4 Vorlauftemperatur/Temperatur
Aufladung Austritt (2x)
- 5 Volumenstromzähler