

Jeannette Wapler, Dipl.-Ing. (FH); Sebastian Helmling, Dipl.-Ing.
Abteilung Energieeffiziente Gebäude; Wärme- und Kältetechnik
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany
jeannette.wapler@ise.fraunhofer.de
<http://www.ise.fraunhofer.de>

Feldtest von fünf Warmwasser-Wärmepumpen

Das Feldmonitoring der Warmwasser-Wärmepumpen gibt einen Aufschluss über das Betriebsverhalten dieser Anlagen beim Endkunden. Während das Speichervolumen aller Anlagen in etwa die gleiche Größe aufweist, unterscheidet sich der Warmwasserbedarf der Nutzer teilweise erheblich. Kleine Mengen an gezapfter Energie gehen mit einem hohen Anteil an Speicherverlusten einher. Bei den bzgl. Speicherverlusten untersuchten vier Anlagen belaufen sich diese auf ein Drittel bis mehr als das Doppelte der Energiemenge, die letztendlich gezapft wurde.

Auch hinsichtlich des Betriebskonzeptes der Wärmepumpe und des Heizstabes gibt es große Unterschiede zwischen den Anlagen. Hierzu zählen die Position des Regelungssensors und die gewählten Speicher-Sollwerte (insb. deren mögliche Variationen im Tagesgang). Diese Punkte wirken sich auf die Betriebstemperaturen der Wärmepumpe und damit auf die Effizienz der Trinkwassererwärmung aus. Weitere Aspekte mit Einfluss auf die Anlageneffizienz sind die Position des Heizstabes, dessen Betriebskonzept sowie das Konzept der Legionellenschaltung, falls diese aktiviert ist. Die Untersuchungen zeigen bei allen Anlagen Verbesserungsmöglichkeiten auf. Diese reichen von einfach umsetzbaren Maßnahmen (wie Änderungen der Parametrierung, z.B. Umstellung von konstanter auf tageszeitabhängige Speicher-Sollwerte) bis hin zu Maßnahmen auf Herstellerseite (wie z.B. Änderungen des Regelungsalgorithmus für den Heizstabbetrieb).

Zusammenfassung Französisch (oder Englisch; maximal 1200 Zeichen inkl. Leerzeichen)

Projektvorstellung

Im Rahmen des vom Bundesamt für Energie geförderten Projektes “Feldtest von fünf Warmwasser-Wärmepumpenanlagen” werden über einen Zeitraum von zwei Jahren (Messzeitraum: 1.8.2016 – 30.6.2018) detaillierte, hochaufgelöste Messdaten aus dem realen Anlagenbetrieb in Zwei- bzw. Vierpersonenhaushalten ermittelt und analysiert. Als Monitoring-Objekte wurden fünf Warmwasser-Wärmepumpenanlagen unterschiedlicher Herstellern ausgewählt, die im Rahmen des Programmes „ProKilowatt“ jeweils mindestens zehn Mal gefördert und nach 2014 installiert wurden. Die untersuchten Anlagen sind typische Warmwasser-Wärmepumpenanlagen mit Direktkondensation im unteren Drittel der integrierten Trinkwasserspeicher (Volumen 270 ... 310 L) und ergänzendem Heizstab. Tabelle 1 gibt einen Überblick der technischen Daten der Geräte. Als Wärmequelle wird bei allen Anlagen die Raumluft des Aufstellraumes genutzt.

In einem der Gebäude ist eine PV-Anlage installiert und die Warmwasser-Wärmepumpeanlage wird „PV-orientiert“ betrieben. Somit lassen sich das Betriebsverhalten, die Speichertemperaturen und die Performance dieser Anlage nicht mit denen der vier anderen Wärmepumpenanlagen vergleichen. In diesem Beitrag wird diese Anlage nur bei der Auswertung des Zapfverhaltens mit aufgeführt. Ausführungen zum Anlagenverhalten und der Performance dieser Anlage sind im Zwischenbericht [1] enthalten.

Anlage	1	2	3	4	5
Nennvolumen in Liter	285	308	270	295	266
COP	3,2	3,11	2,94	2,9	3,3
Randbed. f. COP: T_Quelle/Senke; Zapfprofil; Norm	A15/W15-45 k.A.; EN 255	A15/W10-55 XL; EN 16147	A15/W10-55 XL; EN 16147	A15/W10-55 XL; EN 16147	A20/W10-55 XL; EN 16147
Heizleistung in KW	1,7	1,7	1,7	1,6	1,4
Leistung Heizstab in KW	1,5	1,5	1,8	1,5	1,5

Table 1: Anlagenkenndaten

Die aus dem Trinkwasserspeicher gezapfte Wärme wird mit einem Wärmemengenzähler gemessen. Der Wärmemengenzähler besteht aus einem Temperatursensorpaar (direkttauchend, PT500, Klasse B, dt_max 0,15 K), einem magnetisch-induktiven Volumenstromgeber (Auflösung: 1 Impuls je 5 ml Durchfluss; Messunsicherheit: +/-0,5 % vom Messwert) und dem Rechenwerk. In Summe liegt die Fehlergrenze des Wärmemengenzählers nach EN 1434 bei 3,5 %. Die von den Geräten aufgenommene elektrische Energie wird mit Wechselstromzählern (Auflösung: 10 Impulsen/Wh; Genauigkeitsklasse 1/B (+/- 2 % vom Messwert)) gemessen. Um die elektrische Energie den einzelnen Komponenten der Warmwasser-Wärmepumpenanlagen zuordnen zu können, wurden mehrere Stromzähler eingesetzt (WPA_Gesamt, Verdichter, Ventilator, Heizstab)¹. An den Trinkwasserspeichern wurden zwei, bzw. teils drei Temperatursensoren – wenn möglich- in den vorhandenen Tauchhülsen eingebracht; bzw. alternativ als Anlegefühler an der Speicheroberfläche befestigt. Da sich die Position der Tauchhülsen von Gerät zu Gerät unterscheidet, sind die Temperaturen in unterschiedlichen Höhen installiert². Weiterhin werden die Lufttemperatur und die Luftfeuchte im Aufstellraum gemessen. Alle Messdaten werden in einer zeitlichen Auflösung von fünf Sekunden erfasst und gespeichert.

Entsprechend des Messkonzeptes bezieht sich die Auswertung der Anlageneffizienz auf eine Bilanzgrenze „nach Speicher“, so wie in der EN 16147 [2], der Norm zur Vermessung von Wärmepumpen zur Trinkwassererwärmung. Es wird somit nicht direkt die Effizienz der von der Wärmepumpe und dem Heizstab bereitgestellten Energie ermittelt. Vielmehr wird die angegebene Anlageneffizienz auch von dem Anteil der Speicherverluste beeinflusst. Dies ist bei der Einordnung der Ergebnisse stets zu beachten. So werden im Gegensatz zu

¹ Bei Geräten, bei denen diese Standard-Konfiguration nicht umgesetzt werden konnte, erfolgt die Zuordnung der Energie anhand Auswertungsalgorithmen.

² In den in diesem Bericht verwendeten Sensornamen, ist die Angabe zur Höhe beinhaltet. Z.B. Bezeichnet TS1_15% einen Temperatursensor, der in 15 % der Speicherhöhe über dem Speicherboden positioniert ist.

Warmwasser-Wärmepumpenanlagen die COP-Werte und Jahresarbeitszahlen von Heizungswärmepumpen (zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung) üblicherweise mit einer Bilanzgrenze „vor“ Speicher angegeben.

Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse sind in UTC (Winterzeit) angegeben.

Zapfverhalten

In Abbildung 1 ist die Häufigkeitsverteilung des gezapften Warmwasservolumens pro Tag dargestellt. Das Histogramm ist in eine Klassenbreite von 10 Liter/Tag eingeteilt. Tage, an denen keine Zapfung stattgefunden hat, fließen in die Klasse 1 (0-10 Liter/Tag) ein. Der Warmwasserbedarf der Nutzer unterscheidet sich deutlich. In den beiden Gebäuden, in denen Familien mit vier Personen wohnen, liegt das mittlere tägliche Zapfvolumen bei 145 Liter/Tag (Anlage 1) bzw. 191 Liter/Tag (Anlage 5). In diesen beiden Anlagen traten an wenige Tagen auch Zapfvolumen (leicht) über dem Speicher-Nennvolumen von 285 Liter bzw. 266 Liter auf. In den drei Zwei-Personenhaushalten wurde im Mittel ein Volumen von 54 Liter/Tag (Anlage 2), 71 Liter/Tag (Anlage 3) bzw. 37 Liter/Tag (Anlage 4) gezapft. Bei der Mittelwertangabe von Anlage 4 ist zu beachten, dass hier der Anteil ohne bzw. mit sehr geringer Warmwasserzapfung sehr hoch ist; so wurde an 25% der Tage weniger als 3 Liter/Tag gezapft. In diesen drei Haushalten wurden an den meisten der Tage weniger als ein Drittel des jeweiligen Speicher-Nennvolumens gezapft.

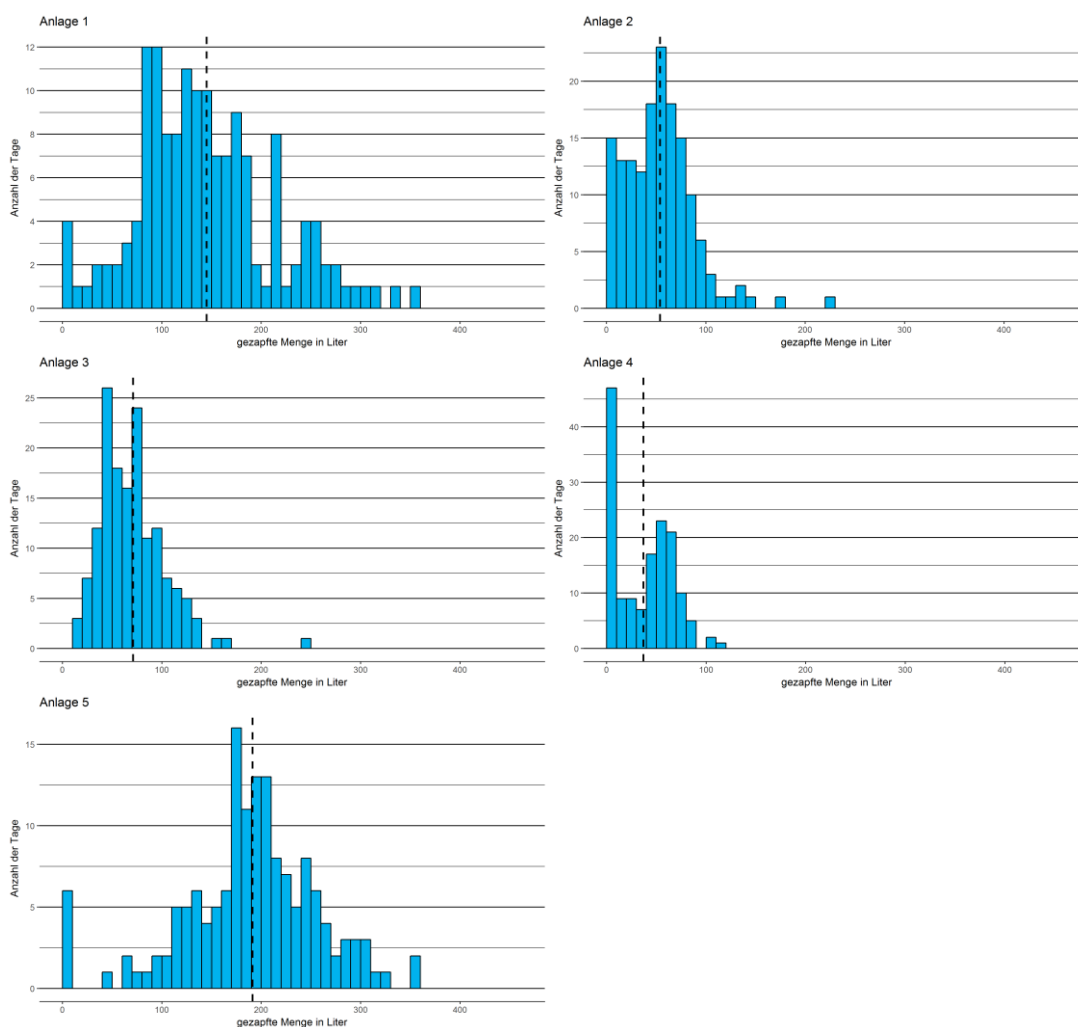


Abbildung 1: Tägliches Zapfvolumen der fünf Anlagen

Die von Herstellern angegebenen COP-Werte beziehen sich auf Labormessungen nach EN 16147 [2]. In dieser Norm sind unterschiedliche Zapfprofile definiert (siehe Tabelle 2). Warmwasser-Wärmepumpen mit einem Speichervolumen von rund 300 Litern werden meist mit dem Profil XL (19,7 kWh) vermessen. Zur Gegenüberstellung des Warmwasserbedarfes der fünf untersuchten Haushalte mit den Zapfprofilen der EN 16147 werden die Tageswerte der gezapften Energie in Klassen eingeteilt. Die Klasse „XL“ umfasst z.B. den Bereich von 15,4 kWh/Tag bis 21,8 kWh/Tag. Die Ergebnisse sind im folgenden Histogramm Abbildung 2 dargestellt.

Zapfprofil	3XS	S	M	L	XL
Gezapfte Wärme	0.345 kWh	2.1 kWh	5.845 kWh	11.655 kWh	19.7 kWh

Tabelle 2: Zapfprofile nach DIN EN 16147

In Blau zeigt Abbildung 2 die jeweilige Einordnung des Trinkwasser-Wärmebedarfes der drei 2-Personenhaushalte (Anlage 2, 3 und 4) in die definierten Zapfklassen. Die Zapfungen dieser Nutzer fallen fast ausschließlich in die Klassen „0“ bis „M“. Der Schwerpunkt liegt jeweils in

Klasse “S”. Bei den beiden 4-Personenhaushalten (in orange dargestellt) treten an einigen wenigen Tagen auch Zapfungen in der Klasse “XL” auf. Der Schwerpunkt der Zapfung liegt in Klasse “M” (Anlage 1) bzw. Klasse “L” (Anlage 5).

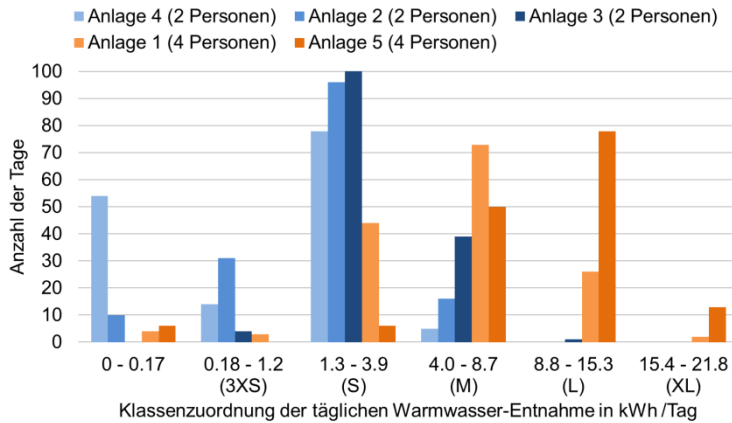


Abbildung 2: Verteilung der täglich gezapften Wärmemenge der fünf vermessenen Anlagen (die Klasse „0“ enthält auch Tage, an denen (aufgrund von Abwesenheit) kein Warmwasser gezapft wurde)

In Abbildung 3 sind die mittleren Speichereintritts-Temperaturen sowie die Speicheraustritts-Temperaturen am Ende jeder Zapfung dargestellt. Hierbei werden nur Zapfungen mit einem Volumen von mindestens 2 Litern berücksichtigt, da die Temperatur kleiner Zapfungen noch stark von der Stillstandstemperatur des Wassers in den Rohrleitungen beeinflusst wird. Da bei der Anlage, die einen PV-orientierten Betrieb nutzt, der Speichersollwert zeitweise deutlich erhöht wird, ist diese Anlage bei der vergleichenden Darstellung nicht berücksichtigt.

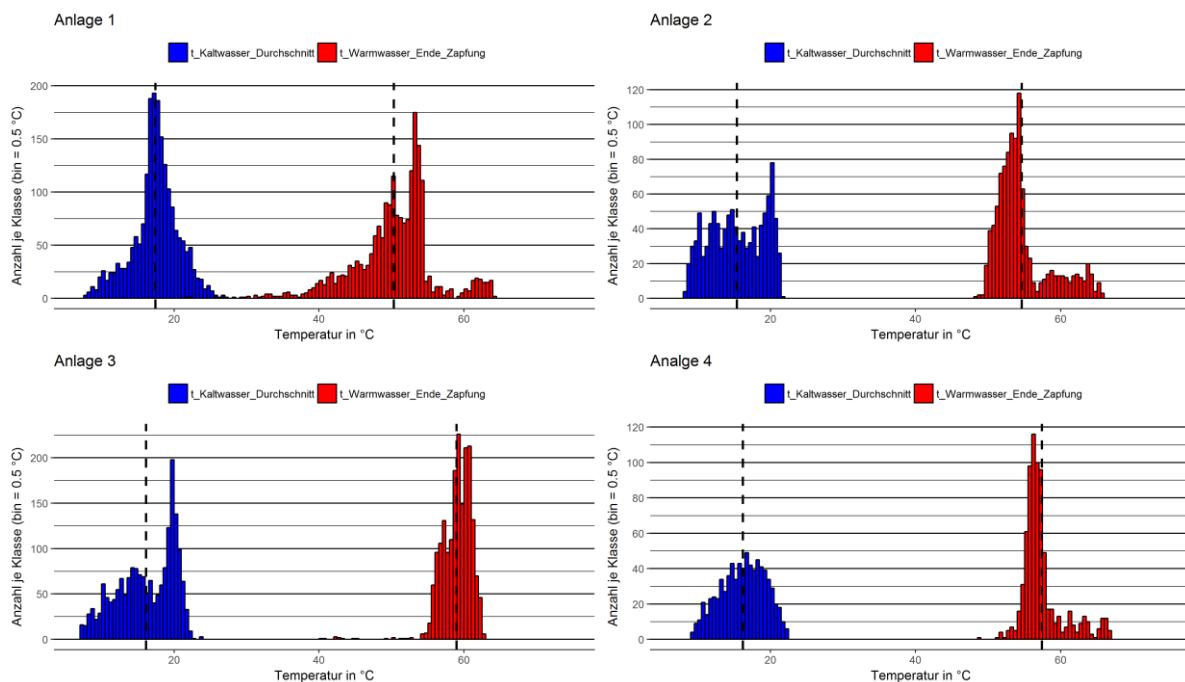


Abbildung 3: Temperatur des Speicherzuflusses und der Speicherentnahme am Ende der Zapfungen mit einem Zapfvolumen von mindestens 2 Litern

Betriebsverhalten und Effizienz

In den Anlagen 1 bis 4 (kein „PV-orientierter Betrieb“) werden unterschiedliche Konzepte für den Betrieb der Wärmepumpe und des Heizstabes verfolgt. Hierbei unterscheiden sich die einzelnen Konzepte untereinander insbesondere hinsichtlich der folgenden Aspekte:

- Position des Temperatursensors, der für die Regelung genutzt wird
- Speichertemperatur-Sollwert und Hysterese für den Wärmepumpenbetrieb; u.U. im Tagesgang variierend
- Position des Heizstabes
- Konzept der Legionellenschaltung
- Betriebskonzept für den Heizstab (außerhalb der Legionellenschaltung)

Die benannten Punkte beeinflussen sowohl die Effizienz des Systems als auch den Nutzerkomfort. Als zwei zentrale Punkte in Bezug auf die Systemeffizienz sind die Speichertemperatur (mit Einfluss auf die Kondensatortemperatur und damit auf den COP sowie auf die Speicherverluste) und der Umfang des Heizstabbetriebes (sowie dessen zeitliche Abstimmung mit dem Wärmepumpenbetrieb) zu nennen. In den folgenden Kapiteln werden das Betriebsverhalten der einzelnen Anlagen sowie deren Effizienz untersucht. In Tabelle 3 sind die zentralen Regelungs-Kennwerte der einzelnen Anlagen aufgeführt.

Anlage	1	2	3	4
Position des Regelungssensors (in % der Speicherhöhe über Speicherboden)	~ 15 %	~ 63 %	~ 10 %	~ 29 %
Standardmodus (Zeitfenster Sollwert & Hysterese)	Wechselnde Einstellung ⁽¹⁾ ; z.B. 8:40 – 15:40 53 °C – 5 K	22:00 – 7:00 55 °C – 4 K	21:15 – 4:15 54 °C – x K	durchgehend 54 °C – ~5 K
Betrieb außerhalb des Standardmodus-Zeitfensters	WP aus	48°C – 4K	WP aus	-
Position des Heizstabes (Volumen oberhalb des Heizstabes)	~ 121 L (58 % von V _{Speicher})	~ 138 L (45 % von V _{Speicher})	~ 125 L (46 % von V _{Speicher})	~ 186 L (63 % von V _{Speicher})
Legionellenschaltung	65 °C; einmal in der Woche	65 °C; einmal in der Woche	deaktiviert	66.6 °C ; einmal in der Woche
Heizstabbetrieb zusätzlich zur Legionellenschaltung	deaktiviert	freigegeben	freigegeben	k. A.
Ergänzungen: Einige Einstellungen sind nicht bekannt; Werte und Informationen wurden in unbekanntem Fällen aus den Monitoringdaten abgeleitet/abgeschätzt (1): die Einstellungen haben sich mehrfach während des Auswertzeitraumes geändert; bis Anfang Dezember lag das Zeitfenster stets vom frühen Vormittag bis in den frühen Nachmittag (auch hier unterschiedliche Uhrzeiten des Beginns und der Dauer (meist 7h, teilweise 4h) gewählt; seit Anfang Dezember werktags vom Nachmittag bis in die Nacht und am Wochenende vom Ende der Nacht bis in den frühen Nachmittag				

Table 3: Regelungsparameter der Anlagen 1 bis 4

Tageszeitlicher Verlauf des Wärmepumpenbetriebes

Der Sollwert der Speichertemperatur für den Wärmepumpenbetrieb ist bei drei der vier Anlagen (Anlage 1 bis 3) im Laufe des Tages nicht konstant. Es ist jeweils ein Zeitfenster pro Tag definiert, in dem der „Standardmodus“ aktiviert ist. In den Zeiten außerhalb dieses Zeitfensters (hier „Absenkmodus“ bzw. „Aus-Modus“ genannt) ist der Sollwert entweder herabgesetzt oder die Wärmepumpe ist deaktiviert. Bei Anlage 4 ist der Sollwert den ganzen Tag über konstant. Die Rasterdiagramme in Bild 4 zeigen den täglichen Verlauf des Wärmepumpenbetriebes grün (nur Wärmepumpe) und rot (Wärmepumpe und Heizstab) während der Auswertungsperiode von August bis Dezember 2016.

Bei **Anlage 1** wurden die Einstellungen am Regler der Wärmepumpe vom Benutzer während der untersuchten Periode mehrmals verändert. Im Zeitraum August bis Anfang Dezember 2016 ist der „Standardmodus“ tagsüber (vom Vormittag bis in den frühen Nachmittag) aktiviert, ab Dezember werktags in der Nacht und am Wochenende tagsüber. Außerhalb dieses Zeitfensters ist die Wärmepumpe deaktiviert. Im Zusammenhang mit der Tatsache, dass der Regelungssensor unten im Speicher (TS1_15 %) platziert und eine

Hysterese von 5 K eingestellt ist, liegt die Speichertemperatur $TS_{1-15\%}$ zu Beginn des „Standard-Zeitfensters“ immer unter dem Einschaltwert (Sollwert minus Hysterese); somit ist der Beginn des Zeitfensters anhand des Wärmepumpenbetriebes im Rasterdiagramm gut ablesbar. Die Wärmepumpe startet jeweils zu Beginn des „Standard-Zeitfensters“ und ist anschließend für i.d.R. zwei bis sechs Stunden durchgehend in Betrieb.

Die Charakteristik des Wärmepumpenbetriebes (Anzahl der Starts pro Tag, jeweilige Laufzeit, ...) ist sowohl vom Zapfverhalten der Nutzer am jeweiligen Tag als auch der tageszeitlichen Lage des „Standardmodus“ abhängig. Im Folgenden wird der Anlagenbetrieb bei drei unterschiedlichen Einstellungen des "Standard-Zeitfensters" beschrieben.

- Zeitfenster mit Beginn um 7:40/8:40/9:40 Uhr und Dauer von 7 h:
An den meisten Tagen läuft die WP nur einmal am Tag. Grund hierfür ist, dass die Zapfung in der Zeitspanne nach dem Ende des ersten Wärmepumpenbetriebes und vor dem Ende des Zeitfensters (also mittags / (früh)nachmittags), meist gering ist. An rund 30 % der Tagen läuft die WP ein zweites Mal; für einige Minuten (wenn der Start des Wärmepumpenbetriebes kurz vor Ende des Zeitfensters liegt und somit nicht die Speichertemperatur sondern das Ende des „Standard-Modus“ den Betrieb beendet) bis zu 2 h.
- Zeitfenster mit Beginn um 5:40 Uhr und Dauer für 12 h bzw. 9 h (nur an Wochenenden):
Die Wärmepumpe läuft während des Zeitfensters zweimal bis viermal. Verglichen mit dem zuvor beschriebenen Zeitfenster ist dies zum einen durch eine längere Dauer des Zeitfensters begründet als auch durch den früheren Start und u.U. auch „unterstützt“ durch das Zapfprofil des Wochenendes.
- Zeitfenster Abend und Nacht (Beginn um 19:40 bzw. 15:40 Uhr, Ende um 3:40):
Beginnt das Zeitfenster bereits um 15:40, so zapfen die Nutzer i.d.R. nach dem ersten Wärmepumpenbetrieb noch eine relevante Menge Warmwasser; die Wärmepumpe läuft zweimal oder dreimal während des Zeitfensters. Beginnt das Zeitfenster erst um 19:40, so erfolgt meist kein zweiter Wärmepumpenbetrieb.



Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 1 bis 4

Bei den **Anlagen 2 und 3** ist der Standardmodus während der Nachtstunden aktiviert: 22:00 bis 7:00 Uhr in Anlage 2 und 21:15 bis vermutlich 4:15 Uhr in Anlage 3. Außerhalb dieses Zeitfensters ist der Sollwert um 7 K reduziert (bei Anlage 2) bzw. der Wärmepumpenbetrieb deaktiviert (Anlage 3). Entsprechend der zeitlichen Lage des Standardmodus läuft die Wärmepumpe bei Anlage 3 nur einmal am Tag. Bei Anlage 2 fällt die morgendliche Zapfung meist noch in des „Standard-Zeitfenster“. Jedoch verursacht diese ebenfalls keinen Start der Wärmepumpe, da der Regulationssensor im oberen Bereich des Speichers positioniert ist und das morgendliche Zapfvolumen i.d.R. unter 50 L liegt. (An einigen Tagen tritt ein Wärmepumpenbetrieb in der zweiten Nachthälfte ein).

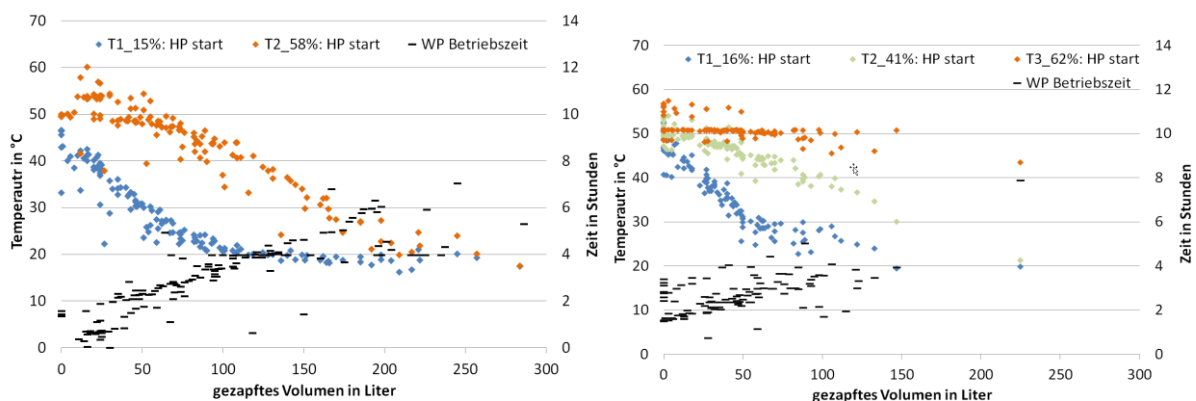
Die **Anlage 4** zeigt eine deutlich andere Betriebscharakteristik als die Anlagen 1 bis 3. Die Wärmepumpe ist zwei- oder dreimal täglich für rund 1 h in Betrieb (abgesehen von Tagen mit sehr geringem Zapfvolumen oder Tagen mit einer – aufgrund der Legionellenschaltung – erhöhten Speichertemperatur). Hierfür sind zwei Aspekte entscheidend. Zum einen ist der Standardbetrieb über den gesamten Tag aktiviert und zum anderen ist der Regulationssensor im unteren Drittel des Speichers positioniert. Die Wärmepumpe startet bereits nachdem weniger als 30 Liter seit dem Ende der letzten Wärmepumpenbetriebsphase gezapft wurden.

Wärmepumpenlaufzeiten und Speichertemperaturen abhängig der Zapfmengen

Die vier Grafiken in Abbildung 5 geben einen näheren Einblick in die einzelnen WP-Betriebszyklen (Auswertungszeitraum August bis November 2016). Separat für jede Wärmepumpenanlage ist die Dauer jeder WP-Betriebsphase (rechte y-Achse) in Bezug auf

das Trinkwasservolumen, welches seit dem Ende der letzten WP-Betriebsphase gezapft wurde bzw. ggf. (noch) während der betrachteten WP-Betriebsphase gezapft wird (x-Achse), dargestellt. Die Länge der WP-Betriebsphasen zeigt die zu erwartende Korrelation zum Zapfvolumen. Wurde bei den Anlagen z.B. ein Volumen von rund 100 L seit dem Ende des vorherigen WP-Betriebes gezapft, so beträgt die Laufzeit der Wärmepumpe bei diesen Anlagen üblicherweise 3,5 bis 4 Stunden. Abweichung von der Korrelation treten in den WP-Betriebszyklen auf, bei denen der Speicher in der vorherigen WP-Betriebsphase über den Standard-Sollwert hinaus erwärmt wurde (Legionellenschaltung) oder der betrachtete WP-Betrieb vor Erreichen des Sollwertes durch das Ende des „Standardmodus“ beendet wird. Zudem verkürzt der Einsatz des Heizstabes die WP-Laufzeiten.

Ergänzend zu den WP-Laufzeiten ist in den vier Grafiken die Temperatur in unterschiedlichen Speicherhöhen zu Beginn jeder WP-Betriebsphase dargestellt (linke y-Achse). Die Temperatur ist hierbei in Bezug auf das Trinkwasservolumen, welches im Zeitraum zwischen dem Ende der vorherigen und dem Beginn der betrachteten WP-Betriebsphase gezapft wurde, aufgetragen. In den Grafiken lassen sich u.a. erkennen, wie weit die Speicherkapazität „ausgenutzt“ wird (also wie weit die Temperatur sinkt), bevor die Wärmepumpe wieder in Betrieb geht, wie hoch die Temperatur im Bereich des Kondensators zu Beginn des WP-Betriebes ist und inwiefern der obere Speicherbereich noch im Solltemperaturbereich liegt. Bei den Anlagen mit zeitlich eingeschränkt aktiviertem „Standardmodus“ (Anlage 1 bis Anlage 3), können die Temperaturen im unteren und mittleren Speicherbereich während des „Absenk- bzw. Aus-Modus“ – abhängig vom Zapfvolumen in diesem Zeitraum - recht weit absinken. In der Folge arbeitet die Wärmepumpe zumindest zu Beginn der WP-Betriebsphase mit einem niedrigen und damit günstigen Temperaturniveau auf der Wärmesenkenseite.



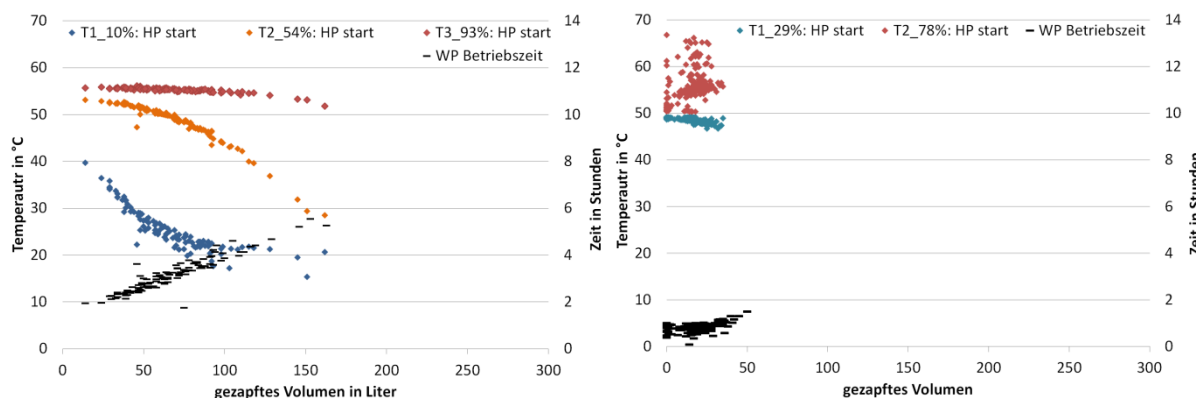


Abbildung 5: Anlage 1 bis 4 Speichertemperatur in unterschiedlichen Höhen zu Beginn jeder WP-Betriebsphase (linke y-Achse) sowie Laufzeit der Wärmepumpe (rechte y-Achse) bezogen auf das Trinkwasservolumen, welches seit dem Ende der vorherigen WP-Betriebsphase gezapft wurde bzw. ggf. (noch) während der betrachteten WP-Betriebsphase gezapft wird (Speichertemperatur nur auf das vor Beginn der betrachteten Betriebsphase gezapfte Volumen bezogen)

Werden z.B. bei **Anlage 1** rund 100 L während des „Aus-Modus“ gezapft, so liegt bei Beginn des „Standardmodus“ die Speichertemperatur im unteren Bereich (TS1_15 %) bei rund 20 °C und im mittleren Bereich (TS2_58 %) bei rund 45 °C. Im oberen Bereich wird die Temperatur noch im Bereich des Sollwertes liegen. Wenn größere Mengen Wasser gezapft werden, ergeben sich entsprechend niedrige Temperaturen im mittleren und oberen Speicherbereich. Folglich können auch Zapftemperaturen unter 40 °C auftreten. So war bei Anlage 1 z.B. die Dauer des „Standard-Zeitfensters“ von nur 4 Stunden im Oktober / November an vielen Tagen zu kurz, um den Speicher bis auf den eingestellten Sollwert zu erwärmen. Folglich war hier die „nutzbare“ Speicherkapazität geringer als anvisiert und für große Zapfmengen während des „Aus-Zeitfenster“ nicht ausreichend. An einigen wenigen Tagen (mit „vollständiger Speicherladung“) wurden während dem „Aus-Zeitfenster“ (weit) mehr als 200 L gezapft und somit auch die Temperaturen im oberen Speicherbereich (deutlich) reduziert. Einbußen beim Nutzerkomfort (zu geringe Zapftemperaturen) lassen sich durch die – auf das Nutzerprofil angepasste – Wahl von Beginn und Ende des „Standard-Zeitfensters“ vermeiden.

Bei den **Anlagen 2 und 3** ergeben sich – abhängig von den jeweiligen Zapfvolumina – ähnliche Speichertemperaturen während der Auswertungsperiode. Bei beiden Anlagen liegt die Speichertemperatur in Höhe des Anschlusses der Warmwasserleitung jedoch immer über 45 °C, da das während dem „Aus-Modus“ bzw. „Absenkmodus“ gezapfte Volumen (und generell das tägliche Zapfvolumen) hier nie so hoch wie an einigen Tagen bei Anlage 1 ist. Aufgrund des deutlich abweichenden Wärmepumpenbetriebskonzeptes unterscheiden sich die Speichertemperaturen in **Anlage 4** deutlich von denen der anderen Anlagen. Wie oben beschrieben startet die Wärmepumpe stets, wenn die Temperatur im unteren Speicherbereich (TS1_29 %) um 5 K unter den Sollwert fällt. Somit liegt die Temperatur in diesem Bereich zu Beginn des Wärmepumpenbetriebes immer im Bereich von 47,5 °C bis 49,0 °C. Die Wärmepumpe hat damit nicht die Möglichkeit zeitweise mit einer niedrigen Wärmesenktemperatur zu arbeiten.

Effizienz und Speicherverluste

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse der Speicherverluste der Anlage 1 vorgestellt. Während der gewählten Auswertungsperiode (keine Zapfungen; drei Wärmepumpenbetriebszyklen in Reihe; Dauer jeweils 23,9 h) liegt die mittlere oberflächengewichtete Speichertemperatur ($TS_{12,avg,surf^*}$) bei $50,7\text{ °C}$ und die mittlere Raumtemperatur bei $24,5\text{ °C}$. Bei diesen Randbedingungen ist eine mittlere elektrische Leistungsaufnahme $P_{stand-by}$ von 31 W erforderlich, um die Speicherverluste auszugleichen. Dieser Wert beinhaltet neben dem Energiebezug für den Kompressor und den Ventilator auch den Energiebezug der Regelung während der Auswertungsperiode. Anhand der Temperaturabnahme im Speicher wird eine Wärmeverlustrate von 3.2 W/K ermittelt. Anschließend lässt sich basierend auf der Wärmeverlustrate, den Messwerten der Speicher- und Raumtemperatur durchgehend für die gesamte Messperiode der Speicherverlust abschätzen. Es zeigt sich, dass die Energie, die infolge von Speicherverlusten nicht genutzt wird, in etwa so groß ist wie die Zapfenergie (Nutzenergie), wenn die tägliche Zapfung bei rund 50 L/Tag liegt. An Tagen, an denen rund 150 L/Tag gezapft werden, betragen die Verluste nach dieser Berechnung nicht mehr als ein Viertel der Nutzenergie.

Abbildung 6 zeigt Werte der Anlageneffizienz „nach Speicher“ $COP_{Anlage,Zyklus}$ (ausgefüllte Rechtecke), die jeweils über einen definierten WP-Zyklus³ ermittelt wurden, in Abhängigkeit von der während dieses WP-Zyklus gezapften Energiemenge. Diese Grafik zeigt den erwarteten Zusammenhang und verdeutlicht einmal mehr den Einfluss der Speicherverluste. $COP_{Anlage,Zyklus}$ beläuft sich auf rund 2,5, wenn in der jeweiligen Periode 5 kWh/Zyklus gezapft wurden. Summieren sich die Entnahmen während des Zyklus nur auf 2 kWh/Zyklus, so ist die Anlageneffizienz mit rund 1,5 deutlich geringer.

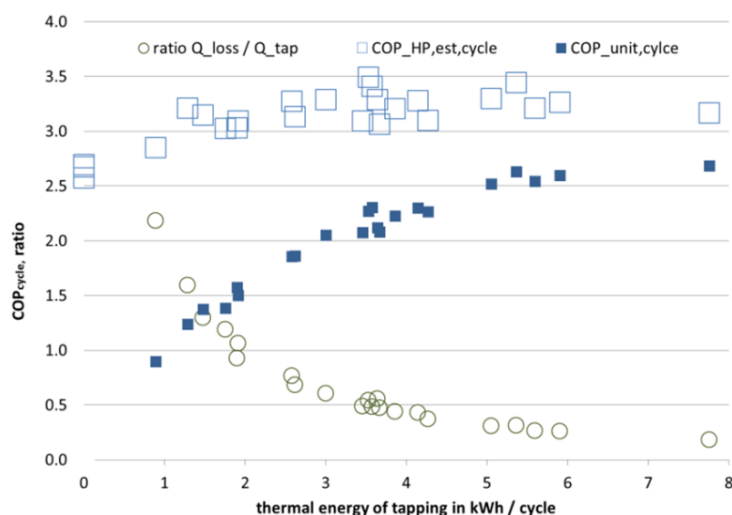


Abbildung 6: $COP_{Anlage,Zyklus}$ und $COP_{WP,est,Zyklus}$ je Wärmepumpenzyklus

Ergänzend wird ein fiktiver $COP_{WP,est,Zyklus}$ entsprechend der folgenden Formel ermittelt. $COP_{WP,est,Zyklus}$ schätzt die Effizienz allein der Wärmepumpe ab und bezieht sich somit auf

³ Ausgewählte Wärmepumpenzyklen erfüllen folgende Kriterien:
Ende Wärmepumpenbetrieb bis Ende folgender Wärmepumpenbetrieb; kein Heizstabbetrieb; Unterschied der Speichertemperatur zu Beginn und Ende weniger als $0,5\text{ K}$; Zyklendauer: mind. 23h, max. 25h

die “fiktive” (hier nicht direkt messbare) Bilanzgrenze beim Wärmeübergang von Kondensator zu Speicher.

$$\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}} = \frac{Q_{\text{tab}} + Q_{\text{loss,est}}}{E_{\text{compressor}} + E_{\text{fan}} + E_{\text{controller}}}$$

Die Effizienz der Wärmepumpe „vor Speicher“ ($\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$) liegt im Bereich von 3,0 und 3,5 (siehe Abbildung 6); abgesehen von Tagen, an denen sehr wenig Warmwasser gezapft wird. An diesen Tagen mit nur wenig Kaltwassereinfluss in den Speicher, wird die Temperatur im unteren Speicherbereich (in der Höhe des Kondensators) vor dem nächsten Wärmepumpenbetrieb nicht so weit reduziert wie bei größeren Mengen zugeführtem Kaltwassers. Somit ergeben sich für den Wärmepumpenbetrieb nach einer “stärkeren Speicherentleerung” zu Betriebsbeginn günstigere Temperaturbedingungen an der Wärmesenkenseite.

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die verwendete Methode zur Ermittlung der Speicherverluste und damit auch von $\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$ mit nicht unerheblichen Unsicherheiten verbunden ist.

Legionellenschaltung

Bei drei der untersuchten Anlagen ist eine Legionellenschaltung freigegeben und der Speicher wird einmal pro Woche auf 65 °C (Anlage 1 und Anlage 2) bzw. 67,5 °C (Anlage 4) erwärmt. Unterschiede im Anlagendesign und im Regelungskonzept der drei Anlagen bringen unterschiedliche Betriebscharakteristika im der Legionellenschaltung mit sich. Im Wesentlichen sind hier drei Aspekte zu nennen, die einen relevanten Einfluss auf den von der Legionellenschaltung verursachten Energiebezug haben, und sich von Anlage zu Anlage unterscheiden:

- Speichertemperatur zu Beginn der Legionellenschaltung sowie die Endtemperatur
- Speichervolumen, das während der Legionellenschaltung erwärmt wird
- verwendete Wärmeerzeuger (Heizstab und / oder Wärmepumpe)

Bei der **Anlage 1** wird die Legionellenschaltung jeden Montag um 11:40 gestartet. Der Heizstab erwärmt den Speicher auf 65 °C. Im Zeitraum bis Anfang Dezember 2016, in dem der „Standardmodus“ am frühen Vormittag (um 8:40 oder 9:40) aktiviert wurde, ist die Wärmepumpe noch in Betrieb, wenn der Heizstab mit Beginn der Legionellenschaltung eingeschaltet wird (an 15 von 19 Tagen; siehe Abbildung 4). Folglich ersetzt der Heizstab (unnötiger Weise) einen Teil des Wärmepumpenbetriebes. Wenn der Wärmepumpenbetrieb direkt vor dem Start des Heizstabbetriebes endet, so ist der Heizstab rund 65 Minuten in Betrieb und bezieht rund 1,6 kWh_{el} während das Wasser über dem und um den Heizstab um rund 12 K erwärmt wird (TS2_58 % steigt von 54 °C auf 66 °C). An Tagen, an denen die Wärmepumpe zuvor den Speicher noch nicht bis auf den Sollwert erwärmt hatte, war der Heizstabbetrieb teilweise deutlich länger. So lag der Gesamtenergiebezug des Heizstabes während der Legionellenschaltung in den Monaten Juli bis Oktober 2016 doppelt so hoch als wenn ein optimiertes Regelungskonzept implementiert wäre, bei dem die Legionellenschaltung direkt nach dem Ende des Wärmepumpenbetriebes beginnt. Unter der

Annahme⁴ eines $COP_{\text{Kompressor, Ventilator}}$ von 2,7 könnte die Arbeitszahl dieses Auswertezitraumes um rund 6 % verbessert werden. Da im Dezember das Zeitfenster des „Standardmodus“ in die Nacht verlegt wurde, zeigt sich hier eine andere Charakteristik der Legionellenschaltung. Nun ergibt sich keine zeitliche Überschneidung von Heizstab- und Wärmepumpenbetrieb. Jedoch fallen in den Zeitraum zwischen dem Ende des Wärmepumpen- und dem Beginn des Heizstabbetriebes die Zapfungen des Morgens und Vormittages. Bei Beginn des Heizstabbetriebes lag die Speichertemperatur $TS2_{58}$ % an den drei Montagen bei 46 °C, 48 °C bzw. 34 °C. Damit war der Energiebezug des Heizstabes zwischen 50 % und 100 % höher als bei einem direkt an das Ende des Wärmepumpenbetriebes anschließenden Legionellenschaltung.

Bei der **Anlage 2** wird die Legionellenschaltung einmal die Woche zu verschiedenen Tageszeiten aktiviert; jeweils 7 Tage und 2 bis 5 Stunden nach dem Beginn der vorherigen Legionellenschaltung (in wenigen Fällen ist der zeitliche Abstand etwas kürzer oder länger als hier angegeben). Zu Beginn der Legionellenschaltung ist die Wärmepumpe ebenso wie der Heizstab in Betrieb; genauer gesagt startet die Wärmepumpe 2 Minuten nach dem Heizstab. Während der Heizstab bei 61 °C ($TS3_{62}$ %) ausgeschaltet wird, erwärmt die Wärmepumpe den Speicher bis auf 65 °C. Es liegt kein Grund für dieses Betriebskonzept des Legionellenmodus auf der Hand. Der Heizstab arbeitet während die Speichertemperatur in einem Bereich liegt, welcher von dieser Wärmepumpe auch bedient werden kann. Zudem ist kein Grund offensichtlich, weshalb der Speicher schnell erwärmt werden müsste. Unter Annahme⁵ eines $COP_{\text{Kompressor, Ventilator}}$ von 2,0, ließe sich die Effizienz um rund 6% verbessern, wenn der Heizstab während der Legionellenschaltung nicht genutzt würde. Im Gegensatz zu den anderen Anlagen, bei denen die Speichererwärmung im Rahmen der Legionellenschaltung nur mittels des Heizstabes erfolgt, wird hier der Speicher nicht nur im mittleren und oberen Bereich sondern bis hinab zur Position des Kondensators erwärmt.

Bei der **Anlage 4** wird die Legionellenschaltung alle 160 Stunden (6 Tage und 16 Stunden) aktiviert. Der Heizstab erwärmt den Speicher im Schnitt um 12 K auf 66,5 °C ($TS2_{54}$ %). Die Wärmepumpe ist i.d.R. nicht zeitgleich in Betrieb (an 3 von 23 Tagen ergibt sich eine zufällige Überschneidung). Der Energiebezug des Heizstabes liegt im Bereich von 2,1 kWh bis 3,3 kWh; abhängig von der Speichertemperatur beim Start des Heizstabbetriebes. Da bei dieser Anlage der „Standardmodus“ durchgehend aktiviert ist und der Regelungssensor im unteren Speicherbereich platziert ist liegt die Temperatur beim Start der Legionellenschaltung im Bereich von 51 °C und 57 °C. Ein Vergleich mit Anlage 1 verdeutlicht den Einfluss der Unterschiede des zu erwärmenden Speichervolumens (siehe Tabelle 3). Hierzu werden bei Anlage 1 die Legionellenschaltungen betrachtet, bei denen keine Überlappung mit dem Wärmepumpenbetrieb auftritt, sondern der Wärmepumpenbetrieb kurz (max. 1 ... 2 Stunden) vorher endet. Die Erhöhung der Temperatur liegt im Mittel in der gleichen Größenordnung, der Energiebezug bei Anlage 4 aufgrund des größeren zu erwärmenden Speichervolumens jedoch rund 60 % höher.

⁴ Der hier angesetzte Wert des COP berücksichtigt zwei Anhaltspunkte: Wärmesenktemperatur, die während des zeitgleichen Heizstabes vorhanden ist, und dem für Stillstandperioden (grob) ermittelten COP.

⁵ Dieser Wert ist eine Abschätzung des COPs, der sich unter den Betriebsbedingungen einstellt, die während des zeitgleichen Heizstabbetriebes vorherrschen.

Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellschaltung

Bei zwei der vier Anlagen (Anlage 2 und Anlage 3) ist der Heizstab auch außerhalb der Legionellschaltung in Betrieb.

Der Heizstab wird bei **Anlage 2** eingesetzt, wenn die Temperatur am Sensor TS3_62 % während des Wärmepumpenbetriebes um 11 K bis 12 K unter den Wärmepumpensollwert sinkt (sei es in Folge von Zapfungen oder von Abkühlung). Innerhalb der Auswertungsperiode August bis Dezember 2016 trat dieser Falls sieben mal ein und der elektrische Energiebezug hierfür beläuft sich auf weniger als 1 % des Gesamtenergiebezuges der Anlage.

Bei der **Anlage 3** ist der Heizstab täglich - meist für einen kurzen Zeitraum von 12 bis 18 Minuten und an wenigen Tagen länger - in Betrieb. Hintergrund: Der Heizstab wird stets 5 Stunden nach dem Start der Wärmepumpe, der auf den Beginn des „Standart-Zeitfensters“ (21:15) fällt, eingeschaltet. An den meisten Tagen endet der Wärmepumpenbetrieb (zwischen einige Minuten bis zu 3 h) vor dem Start des Heizstabes. Der Heizstab erwärmt den Speicher (je nach Abstand zum Ende des Wärmepumpenbetriebes) im Mittel um 1,7 K. An rund 10 % der Tage ist die Wärmepumpe noch in Betrieb, wenn der Heizstab startet, und beide arbeiten dann zeitgleich. Es besteht keine offensichtliche Notwendigkeit für diesen Regelungsansatz: die Wärmepumpe kann den Speicher mit einer angemessenen Betriebsdauer während der Nacht erwärmen. Es wird abgeschätzt, dass die Verbesserung der Anlageneffizienz bei einer Vermeidung dieses Heizstabeinsatzes im Bereich von 10 % liegen könnte.

Elektrische, thermische Energie und Anlageneffizienz

Im folgenden Abschnitt wird die Anlagen-Arbeitszahl (ermittelt über den Zeitraum August bis November 2016) der vier Anlagen gegenübergestellt und in den Kontext der oben untersuchten Einflussfaktoren gesetzt. Zum Zeitpunkt der ersten Analyse-Periode ist die Datenlage nicht bei allen Anlagen ausreichend, um den Wärmeverlustfaktor anlagenspezifisch abzuschätzen (teilweise keine mehrtägigen Perioden ohne Zapfung). Daher wird hier zur Visualisierung der Größenordnung der jeweiligen Speicherverluste ein einheitlicher UA-Wert von 3,2 W/K angesetzt. Dieser basiert auf der Auswertung der Anlage 1.

Bei der Bewertung der in dem folgenden Bild 7 angegebenen Temperaturen ist zu beachten, dass die Sensoren nicht alle in der gleichen Höhe angeordnet sind.

Die Arbeitszahl der **Anlage 1** beläuft sich auf 2,1, den höchsten (besten) Wert der untersuchten Anlagen. Der Warmwasserbezug der Bewohner ist mit einem Durchschnitt von 145 Liter pro Tag deutlich höher als in den anderen Gebäuden. Demnach ist der effizienzmindern Einfluss der Speicherverluste deutlich geringer als bei den anderen Anlagen. Jedoch liegen die Speicherverluste immerhin bei rund einem Drittel der Energie des gezapften Warmwassers. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Effizienz, der bei dieser Anlage etwas bis erheblich besser ist als bei den anderen Anlagen, ist die Speichertemperatur. Die große Menge an gezapftem Warmwasser führt in Kombination mit der gewählten tageszeitlichen Aufteilung von „Standardmodus“ und „Aus-Modus“ zu einem erheblichen Absinken der Speichertemperatur im unteren und mittleren Bereich. Dies ist zum einen günstig für die Effizienz des Wärmepumpenbetriebes und zum anderen zur Reduzierung der

Speicherverluste. Der Heizstab hat einen Anteil von 20% am Gesamtenergiebezug der Anlage.

Bei **Anlage 2** ergibt sich für den Auswertungszeitraum eine Arbeitszahl von 1,1. Die im Vergleich zu Anlage 1 deutlich geringe Effizienz ist vorrangig in dem geringeren Zapfvolumen begründet. Der Mittelwert des täglich gezapften Warmwasservolumens liegt bei 54 Liter pro Tag und damit bei knapp 40 % gegenüber Anlage 1. In der Folge liegen die Speicherverluste vermutlich etwas höher als die Energie des gezapften Warmwassers. Zudem ergeben sich aufgrund des geringeren Zapfvolumens im Mittel höhere Speichertemperaturen, auch wenn die maximalen Speichertemperaturen in der gleichen Größenordnung liegen. Bei dieser Anlage ist der Anteil des Heizstabes am Gesamtenergiebezug mit 12 % der geringste unter den untersuchten Anlagen ohne PV-orientierten Betrieb.

Bei **Anlage 3** ergibt sich eine Arbeitszahl von 1,4. Im Mittel liegt das tägliche Zapfvolumen mit 71 Liter pro Tag bei rund der Hälfte von Anlage 1 und rund 30 % über dem von Anlage 2. Neben dem Nutzerverhalten unterscheidet sich Anlage 3 noch in weiteren Punkten von Anlage 1. So wird der Speicher auf rund 5 K höhere Temperaturen erwärmt, was sich mindernd auf die Anlageneffizienz auswirkt. Der elektrische Energieanteil des Heizstabes beläuft sich wie bei Anlage 1 auf 20 %. Die Gründe für den Heizstabbetrieb sind jedoch unterschiedlich. Bei Anlage 3 ist keine Legionellenschaltung aktiviert; der Energiebezug ist auf den (anscheinend überflüssigen) täglichen Heizstabbetrieb zurückzuführen (Erläuterungen siehe oben).

Die Nutzer von **Anlage 4** haben im Vergleich zu den Nutzern der anderen Anlagen den geringsten Warmwasserbedarf (durchschnittlich 37 Liter pro Tag). Dies ist mit den oben beschriebenen Folgen eines ungünstigen Verhältnisses von thermischer Nutzenergie zu thermischer Verlustenergie verbunden. Ein weiterer Effizienz-mindernder Faktor ergibt sich aus dem Regelungskonzept dieser Anlage (Regelungssensor unten im Speicher und konstanter Sollwert über den ganzen Tag). Die damit verbundenen im Vergleich zu den anderen Anlagen höheren Speichertemperaturen im unteren und mittleren Bereich bringen Minderungen der Effizienz der Wärmepumpe und Steigerungen der Speicherverluste mit sich.

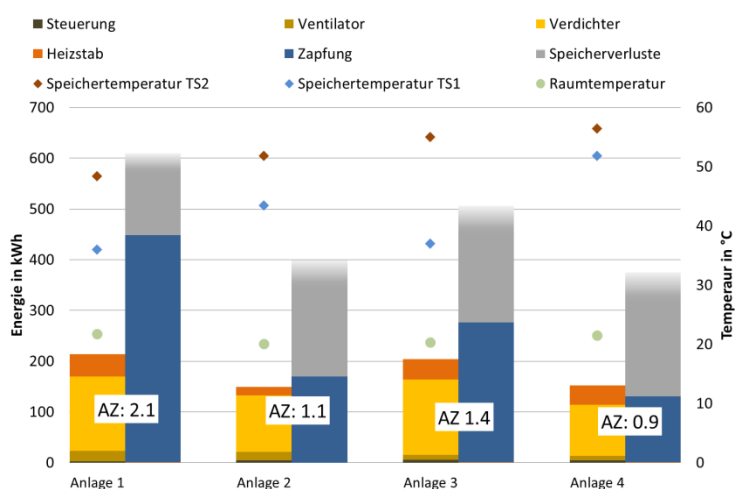


Abbildung 7: Arbeitszahl, thermische und elektrische Energie sowie mittlere Temperaturen (Auswertungszeitraum: 1.8.2016 – 30.11.2016)

Quellen

- [1] Feldtest von fünf Warmwasser Wärmepumpen, Zwischenbericht, Energie Schweiz, Bern 2017
- [2] EN 16147 Heat pumps with electrically driven compressors - Testing and requirements for marking of domestic hot water units, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Brüssel 2016