

Endbericht, 12. Dezember 2018

FELDTEST VON FÜNF WARMWASSER-WÄRMEPUMPEN



energie sch

Unser Engagement: uns



Freiburg 12.12.2018

Dipl.-Ing Sebastian Helmling
Projektleiter

Dipl.-Ing (FH) Jeannette Wapler
Projektmitarbeiterin

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

**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 und Rahmenbedingungen.....	6
3	Durchführung des Projektes	7
3.1	Auswahl der Anlagen und Installation der Messtechnik.....	7
3.2	Charakteristik der Wärmepumpen	7
3.3	Messkonzept.....	10
3.4	Messdatenerfassungssystem	12
3.5	Sensorkonfiguration der einzelnen Anlagen	12
3.6	Fehlerrechnung	13
4	Auswertung.....	16
4.1	Zapfverhalten.....	16
4.1.1	Charakteristik der Zapfung.....	16
4.1.2	Temperaturen Zapfungen	22
4.1.2.1	Kaltwasser	25
4.2	Betriebsverhalten und Effizienz: Anlage 1 bis 4	26
4.2.1	Tageszeitlicher Verlauf des Wärmepumpenbetriebes.....	26
4.2.2	Wärmepumpenlaufzeiten und Speichertemperaturen	31
4.2.3	Speicherverluste	35
4.2.4	Legionellenschaltung	37
4.2.5	Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung	38
4.2.6	Elektrische, thermische Energie und Anlageneffizienz	39
4.2.6.1	Bilanz der Auswertungsperiode August 2016 bis September 2017	39
4.2.6.2	Wöchentliche Arbeitszahlen	41
4.3	Betriebsverhalten und Effizienz Anlage 5.....	44
4.3.1	Betriebsmodi.....	45
4.3.2	Betriebsverhalten Wärmepumpe und Heizstab	46
4.3.3	Elektrische, thermische Energie und Anlageneffizienz	48
4.3.4	Bilanz der Auswertungsperiode August 2016 bis Oktober 2018.....	49
4.4	Betriebsverhalten und Effizienz: Optimierungsmaßnahmen	50
4.4.1	Anlage 1	50
4.4.2	Anlage 2: Empfehlungen	52
4.4.3	Anlage 3: Empfehlungen	54
4.4.4	Anlage 4: Empfehlungen	55
4.5	Aufstellraum	59
5	Abbildungsverzeichnis	62
6	Literaturverzeichnis	64

Die Auswertung der Messdaten der in diesem Feldtest untersuchten fünf Warmwasser-Wärmepumpen (Speichervolumen 266 Liter bis 308 Liter) gibt einen Aufschluss über das Betriebsverhalten dieser Geräte beim Endkunden. Das Betriebsverhalten wird zum einen vom Hersteller durch die Wahl des Anlagendesigns und dem Regelungskonzept, zum anderen vom Installateur durch die Parametrierung der Regelung beeinflusst. Die Nutzer üben durch die Warmwasserentnahme und die eventuell von ihnen gewählten Reglereinstellungen einen Einfluss auf das Anlagenverhalten aus. Zudem ist das vom Planer/Installateur den Nutzern ausgewählte Speichervolumen im Verhältnis zum Warmwasserbedarf ein bedeutender die Effizienz beeinflussender Faktor.

Während das Speichervolumen aller Anlagen in etwa die gleiche Größe aufweist, unterscheidet sich der Warmwasserbedarf bei den Anlagen teilweise erheblich. Der Haushalt mit dem größten Warmwasserbedarf benötigt fünf Mal mehr Warmwasser als der Haushalt mit dem kleinsten Bedarf. Nur bei dem Haushalt mit dem größten Warmwasserbedarf werden an wenigen Tagen Energiemengen gezapft, die in der Größenordnung dem Testprofil XL nach EN 16147, das häufig den COP-Angaben der Hersteller zu Grunde liegt, entsprechen. Die Zapfmengen der anderen vier vermessenen Anlagen - und an vielen Tagen auch die der Anlage mit dem höchsten Warmwasserbedarf - liegen zum Teil weit unter diesem Wert in den Bereichen S, M und L. Das Zapfprofil XL ist mit einer fast doppelt so großen Menge an gezapfter Energie verbunden als Profil L und einer vier Mal größere als M.

Die folgende Eigenschaft haben alle Technologien zur Wassererwärmung, die einen Speicher nutzen gemein, unabhängig davon wie die Wassererwärmung durchgeführt wird: Kleine Mengen an gezapfter Energie gehen mit einem hohen relativen Anteil an Speicherverlusten einher. Bei diesbezüglich untersuchten Anlagen (vier der fünf Anlagen) belaufen sich diese Verluste auf ein Drittel bis auf mehr als das Doppelte der Energiemenge, die letztendlich gezapft wurde.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Effizienz des Systems sind die – im Tagesgang möglicherweise unterschiedlich eingestellten Temperatur-Sollwerte und Betriebsmodi für den Wärmepumpenbetrieb. Wird die Solltemperatur des Speichers beispielsweise für eine gewisse Zeit während des Tages verringert, kann u.U. ein größerer Anteil des Speicherwassers gezapft werden, bevor der nächste Wärmepumpenbetrieb startet. Der Speicher wird besser ausgenutzt; genauer gesagt in einem größeren Bereich mit Kaltwasser beladen. Diese niedrige Wassertemperatur wirkt sich positiv auf die Effizienz der Wärmepumpe aus, wenn das Wasser erwärmt wird. Wird der Zeitbereich des Absenkbetriebes dem üblichen Verhalten der jeweiligen Nutzer angepasst, so wird die gewünschte Warmwassertemperatur im oberen Bereich nicht unterschritten. Ähnliche Auswirkungen wie die tageszeitabhängige Wahl des Speichersollwertes hat die Positionierung des Regelungssensors. Ist der Sensor im unteren Bereich eingebaut, wird die Wärmepumpe im Standardmodus bereits nach Zapfung eines geringen Speichervolumens in Betrieb genommen. Bei höherer Positionierung des Sensors (z.B. in Speichermitte) wird der Bereich um den Kondensator vor dem nächsten Wärmepumpenbetrieb weiter abgekühlt als bei einem unten eingebauten Sensor. Dies ist bei Anlagen möglichen, bei denen keine – im Verhältnis zum Speichervolumen – hohen Zapfmengen – in Bezug auf die erforderliche Nachheizzeit- kurzen Zeiträumen auftreten. Bei drei der vermessenen Anlagen wird im Laufe eines Tages an fast allen Tagen (teils deutlich) weniger als das halbe Speichervolumen gezapft.

Weiterhin hat die Untersuchung gezeigt, dass das Regelungskonzept für den Wärmepumpen- und Heizstabbetrieb einiger Anlagen durch das Anwenden einfacher Maßnahmen verbessert werden kann. Bei drei der fünf Anlagen wird der Heizstab unnötigerweise zugeschaltet. So könnte z.B. in der Legionellenschaltung der Heizstab erst zugeschaltet werden, wenn die Einsatzgrenztemperatur des Verdichters erreicht ist.

Dies und andere Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des Heizstabeinsatzes (wie z.B. Regelungsansätze, die eine weniger „prophylaktische“ sondern genauer „bedarfsgerechte“ Heizstabunterstützung ermöglichen) liegen auf Seite der Hersteller. Optimierungsmöglichkeiten an den Reglereinstellungen, die vom Nutzer umgesetzt werden können, wurden den Anlagenbetreibern erläutert und gemeinsam mit diesen umgesetzt. Bei vier der fünf Anlagen wurden Änderungen vorgenommen. Es wurden für jede Anlage Optimierungsmöglichkeiten bei dem Regelungsalgorithmus - hinsichtlich des Beginns der Legionellenschaltung- und an den Reglereinstellungen – hinsichtlich des Betriebszeitfensters, Sollwert bzw. Hysterese, Freigabe des Heizstabes und der Sensorhöhe - erstellt. Die Reglereinstellungen wurden den Anlagenbetreibern erläutert und in vier der fünf Anlagen - im Rahmen der Möglichkeiten - gemeinsam mit den Anlagenbetreibern umgesetzt. Im Vergleich zu dem Effizienz mindernden Faktor der überdimensionierten Speicher nehmen sich die Möglichkeiten der Änderungen der Reglerparametrierung gering aus. Die größte Verbesserung konnte bei einer Anlage erzielt werden, bei der im Rahmen der Optimierungsmaßnahmen der Heizstab deaktiviert wurde. Hier konnte eine Effizienzverbesserung von rund 8% ohne eine Einschränkung des Nutzerkomforts realisiert werden. Bei den anderen Anlagen fielen die Effizienzverbesserungen geringer aus oder konnten wegen eines zufällig in etwa zeitgleich geänderten Nutzerverhaltens nicht analysiert werden.

2 Projektziele und Rahmenbedingungen

Die Absatzzahlen von Wärmepumpen zur Trinkwassererwärmung befinden sich seit einigen Jahren auf einem hohen Niveau. So wurden 2017 in der Schweiz 5746 Warmwasser-Wärmepumpen verkauft. Die Wachstumsrate gegenüber 2016 beträgt dabei 10.4 % [1].

Für die Anschaffung von Warmwasserwärmepumpen zum Ersatz von Elektroboilern können je nach Region Fördermittel bei den Kantonen oder bei Projektträgern entsprechender Programme im Rahmen der Wettbewerblichen Ausschreibungen ProKilowatt beantragt werden. Eine Übersicht über laufende Programme befindet sich auf der Webseite des Bundesamtes für Energie ([http://www.bfe.admin.ch/prokilowatt/04346/i\)ndex.html?lang=de&dossier_id=05769](http://www.bfe.admin.ch/prokilowatt/04346/i)ndex.html?lang=de&dossier_id=05769)). Im Rahmen der Wettbewerblichen Ausschreibungen wurde bisher mit einer pauschalen Einsparung pro Installation gerechnet. Erste Analysen des Bundesamtes für Energie haben jedoch ergeben, dass die in der Praxis erreichbaren Energieeinsparungen deutlich unter diesen Annahmen liegen. Dies gilt gleichermaßen auch für die Leistungskennziffern, die in der Praxis deutlich unterhalb von Laborwerten liegen. Deshalb hat das Bundesamt für Energie einen Feldtest beauftragt, mit dessen Hilfe detaillierte und hochaufgelöste Messdaten aus dem realen Anlagenbetrieb ermittelt werden, um Optimierungspotentiale bei der Installation und dem Anlagenbetrieb zu identifizieren. Bei den Feldversuchen die zu dem Thema bisher durchgeführt worden sind wurde keine automatisierte Messwerterfassung eingesetzt. Vielmehr erfolgte die Datenabfrage durch manuelles Ablesen der Zählerstände.

Ziel dieses neuerlichen Feldtests ist es mit dem Einsatz von Präziser Messtechnik und einer automatisierten Messwerterfassung ein möglichst genaues Bild über das Verhalten von Warmwasserwärmepumpen zu gewinnen. Durch den Einsatz dieser Messtechnik sollen zudem die Ursachen für die schlechten Effizienzwerte der Anlagen im Feld untersucht werden.

Während des Projektverlaufs konnten Optimierungspotentiale an den Reglereinstellungen der Wärmepumpen identifiziert werden. So wurden bei 4 der 5 Anlagen Änderungen bezüglich der Zeitprogramme und der Heizstabfreigabe durchgeführt. Der Einfluss dieser Änderungen auf die Effizienz der Anlage wurde untersucht.

3.1 Auswahl der Anlagen und Installation der Messtechnik

Die Auswahl der Anlagen erfolgte in Kooperation von Fraunhofer ISE und BFE. Die Anlagenbetreiber wurden, als diese sich um eine Zufinanzierung im Rahmen eines Anreizprogrammes beworben haben gefragt ob sie einer Vermessung ihrer Anlage im Rahmen eines Feldtests zustimmen würden. Die Anlagen die letztendlich für den Feldtest herangezogen wurden rekrutieren sich aus der Menge der Anlagenbetreiber die einer potentiellen Vermessung zugestimmt hatten. Folgende weitere Kriterien wurden für die Auswahl der Anlagen herangezogen. Zum einen sollte eine Vergleichbarkeit der Anlagen untereinander, zumindest bezüglich der Speichergröße gewährleistet sein. Daher wurden nur Anlagen ausgewählt, deren Speichervolumen ca. 300 L beträgt. Durch den Feldtest soll ein möglichst repräsentatives Bild über die Situation im Feld abgebildet werden. Aus diesem Grund wurden nur Anlagen von Herstellern für die Vermessung ausgewählt deren Verbreitung ausreichend hoch ist. Es wurden nur Anlagen ausgewählt, die in der Liste der Anmeldungen zur Förderung im Rahmen von ProKilowatt mindestens zehn Mal auftauchen.

Weiterhin wurden Anlagen in der Nordschweiz ausgewählt um die Anfahrt aus dem Raum Freiburg möglichst kurz zu halten und somit eine kurze Reaktionszeit bei Störungen und Ausfällen zu ermöglichen.

Im Anschluss an das Auswahlverfahren wurde eine detaillierte Installationsanleitung für die Messtechnik erstellt. Mit Hilfe dieser Installationsanleitung konnten in einem weiteren Schritt Angebote für den Einbau der Sensorik in die Wärmepumpenanlage eingeholt werden. Für die Arbeiten an der Hydraulik wurden Sanitärbetriebe, für die Arbeiten an der Elektrik wurden Elektroinstallationsbetriebe angefragt und beauftragt. Nachdem die Sensorik an den einzelnen Anlagen installiert war wurde das Messwerterfassungssystem durch das Fraunhofer ISE in Betrieb genommen. Hierbei wurden alle Sensoren auf ihre Funktion hin überprüft und mit dem Messdatenerfassungssystem verbunden. Weiterhin wurde der automatische Datentransfer an das Fraunhofer ISE eingerichtet. Bei der Inbetriebnahme des Messdatenerfassungssystems wurde ebenfalls eine Fotodokumentation der Einbausituation der Warmwasserwärmepumpe durchgeführt.

3.2 Charakteristik der Wärmepumpen

Alle fünf Warmwasserwärmepumpen die in diesem Feldtest vermessen werden ersetzen einen elektrischen Warmwassererhitzer mit Speicher. Die Warmwasserwärmepumpen wurden an der gleichen Stelle wie der bisherige Wassererhitzer aufgestellt und an die bestehenden Rohrleitungen angeschlossen.

Bei den Wärmepumpen handelt es sich um direkt kondensierende Luft Wasser Wärmepumpen zur Innenraumaufstellung. Die Geräte bestehen aus einem gedämmten Warmwasserspeicher. Oberhalb des Speichers ist die Wärmepumpeneinheit bestehend aus Steuerung, Verdichter, Ventilator, Expansionsventil und Verdampfer positioniert. Der Kondensator befindet sich im unteren Drittel des Speichers auf dessen Innenseite. Alle Geräte verfügen über einen elektrischen Zusatzheizer welcher sich in Etwa in der Mitte des Speichers befindet. Die Anlagen 1, 2, 4 und 5 verfügen über Tauchhülsen in denen sich die Temperatursensoren der Wärmepumpenregelung befinden. Bei Anlage 3 sind diese Temperatursensoren auf der Oberfläche des Speichers befestigt.

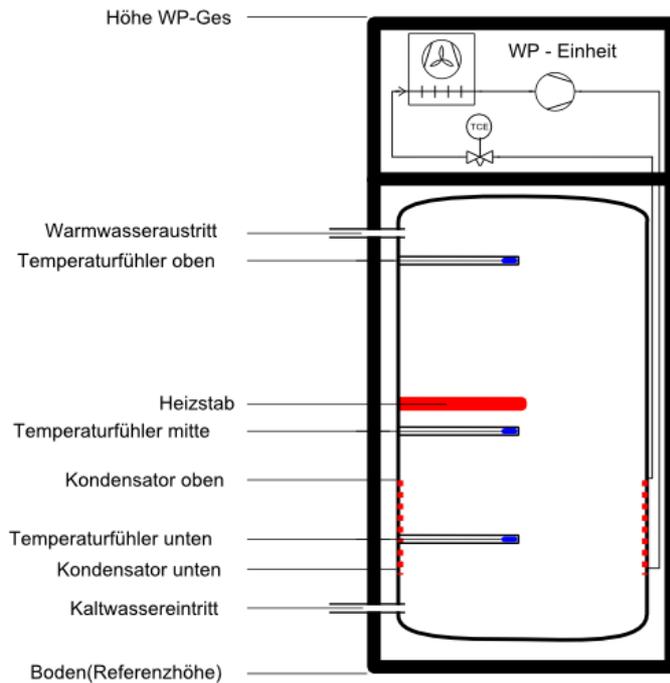


Abbildung 1: Schnittzeichnung Warmwasser-Wärmepumpe

die Abmessungen, sowie die Positionen der Temperaturfühler können der folgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Abmessungen und Sensorpositionen (einige Daten standen in Datenblättern direkt zur Verfügung; andere wurden anhand der Schemata in den Datenblättern abgeschätzt)

Anlage		1	2	3	4	5
Durchmesser	m	0,53	0,55	0,50	0,54	0,53
OK Speicher	m	1,41 100 %	1,39 100 %	1,44 100 %	1,34 100 %	1,31 100 %
Sensor						
Messtechnik oben	m	0,86 58 %	0,88 62 %	1,35 93 %	1,06 78 %	1,16 88 %
Höhe Heizstab	m	0,86 58 %	0,79 55 %	0,82 54 %	0,53 37 %	0,84 61 %
Sensor						
Messtechnik Mitte	m	-	0,61 41 %	0,82 54 %	-	0,77 55 %
Sensor						
Messtechnik unten	m	0,30 15 %	0,28 16 %	0,22 10 %	0,42 29 %	-
Sensor Regelung						
WP	m	0,30 15 %	0,88 62 %	0,22 10 %	0,42 29 %	0,77 55 %
UK Speicher	m	0,11 0 %	0,07 0 %	0,09 0 %	0,05 0 %	0,10 0 %

Die technischen Daten der vermessenen Geräte können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 2: Technische Daten der Geräte

Anlage	1	2	3	4	5
Nennvolumen	285	308	270	295	266
Warmhalteverluste in Watt	-	37	34	39	23
Speicherverluste in kWh/Tag	-	2,5	0,67	1,9	0,7
Speicherverluste nach ...	-	EnV	EN 255	EnV	DIN 8947
COP nach DIN	3,2 (EN 255)	3,11 (EN 16147)	2,94 (EN 16147)	2,9 (EN 16147)	3,3 (EN 16147)
Quellen-/Senktemperatur	A15/W15-45	A15/W10-55	A15/W10-55	A15/W10-55	A20/W10-55
Zapfprofil	k.A.	XL	XL	XL	XL
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
max T WP in °C	55	65	60	60	55
max T WP und HS in °C	65	65	k.A.	70	65
Position des Regelungssensors (in % der Speicherhöhe über Speicherboden)	~ 15 %	~ 63 %	~ 10 %	~ 29 %	~ 55 %

Anlage 1

Die Warmwasserwärmepumpe ist im Erdgeschoss des Gebäudes in einem etwa 25 m² großen Raum aufgestellt. Der Raum verfügt über ein Fenster, sowie über eine Türe nach Draußen. Der Aufstellraum wird gleichzeitig als Waschküche und Trockenraum für Wäsche genutzt. Die Warmwasserleitung ist ab dem Abgang an der Wärmepumpe gedämmt. Die Absperrarmatur in der Warmwasserleitung zwischen Wärmepumpe und Verteiler ist nicht wärmedämmend. Es ist kein Thermosiphon installiert.

Anlage 2

Die Warmwasserwärmepumpe ist im Kellergeschoss des Gebäudes in einem etwa 20 m² großen Raum aufgestellt. Der Raum verfügt über ein Fenster. Der Aufstellraum wird gleichzeitig als Waschküche und Trockenraum für Wäsche genutzt. Die Warmwasserleitungen sind ab dem Abgang an der Wärmepumpe gedämmt. Die Absperrarmatur in der Warmwasserleitung zwischen Wärmepumpe und Verteiler ist nicht wärmedämmend. Weiterhin ist der Abgang mit einem Thermosiphon ausgeführt.

Anlage 3

Die Warmwasserwärmepumpe ist im Untergeschoss des Gebäudes in einem etwa 20 m² großen Raum aufgestellt. Der Raum verfügt über ein Fenster. Der Aufstellraum wird gleichzeitig als Lagerraum genutzt. Die Warmwasserleitungen und die Absperrarmatur sind nicht gedämmt. Der Wärmeverlust über die einen Meter lange Rohrstrecke zwischen dem Abgang an der Wärmepumpe und der Position der Absperrarmatur in welchem sich der Temperaturfühler des Wärmemengenzählers befindet wird in dieser Untersuchung vernachlässigt. Es ist kein Thermosiphon installiert.

Die Warmwasserwärmepumpe ist im Untergeschoss des Gebäudes in einem etwa 20 m² großen Raum aufgestellt. Der Raum verfügt über ein Fenster. Der Aufstellraum wird gleichzeitig als Waschküche und Trockenraum für Wäsche genutzt. Die Warmwasserleitungen sind ab dem Abgang an der Wärmepumpe gedämmt. Die Absperrarmatur in der Warmwasserleitung zwischen Wärmepumpe und Verteiler ist nicht wärmegeklämt. Es ist kein Thermosiphon installiert.

Anlage 5

Die Warmwasserwärmepumpe ist im Untergeschoss des Gebäudes in einem etwa 20 m² großen Raum aufgestellt. Der Raum verfügt über ein Fenster. Der Aufstellraum wird gleichzeitig als Waschküche und Trockenraum für Wäsche genutzt. Die Warmwasserleitungen sind nicht gedämmt. Der Wärmeverlust über die einen Meter lange Rohrstrecke zwischen dem Abgang an der Wärmepumpe und der Position der Absperrarmatur in welchem sich der Temperaturfühler des Wärmemengenzählers befindetet wird in dieser Untersuchung vernachlässigt. Es ist kein Thermosiphon installiert.

3.3 Messkonzept

Die Vermessung der Geräte in diesem Feldtest orientiert sich an dem Messkonzept bei einer Vermessung von Warmwasser-Wärmepumpen nach DIN EN 16147. Die vom Gerät bereitgestellte thermische Energie wird mit Hilfe eines Wärmemengenzählers gemessen. Der Wärmemengenzähler besteht aus jeweils einem Temperaturfühler in der Kaltwasserzuleitung und der Warmwasserleitung, einem magnetisch induktiven Volumenstromgeber in der Kaltwasserzuleitung und einem Rechenwerk. Die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Energie wird mit Wechselstromzählern gemessen. Um die aufgenommene elektrische Energie den einzelnen Komponenten der Warmwasser-Wärmepumpe zuordnen zu können wurden mehrere Stromzähler eingesetzt. So umfasst die Stromzählerkonfiguration die folgenden Zähler: WP_Gesamt, Verdichter, Ventilator, Heizstab. Der Energieverbrauch der Steuerung der Wärmepumpe kann dann durch Subtraktion der Zähler Verdichter, Ventilator, Heizstab vom Zähler WP_Gesamt berechnet werden. Weiterhin werden die Lufttemperatur und die Luftfeuchte im Aufstellraum mit einem entsprechenden Sensor gemessen. Das folgende Bild beschreibt den Messaufbau in der Standardkonfiguration.

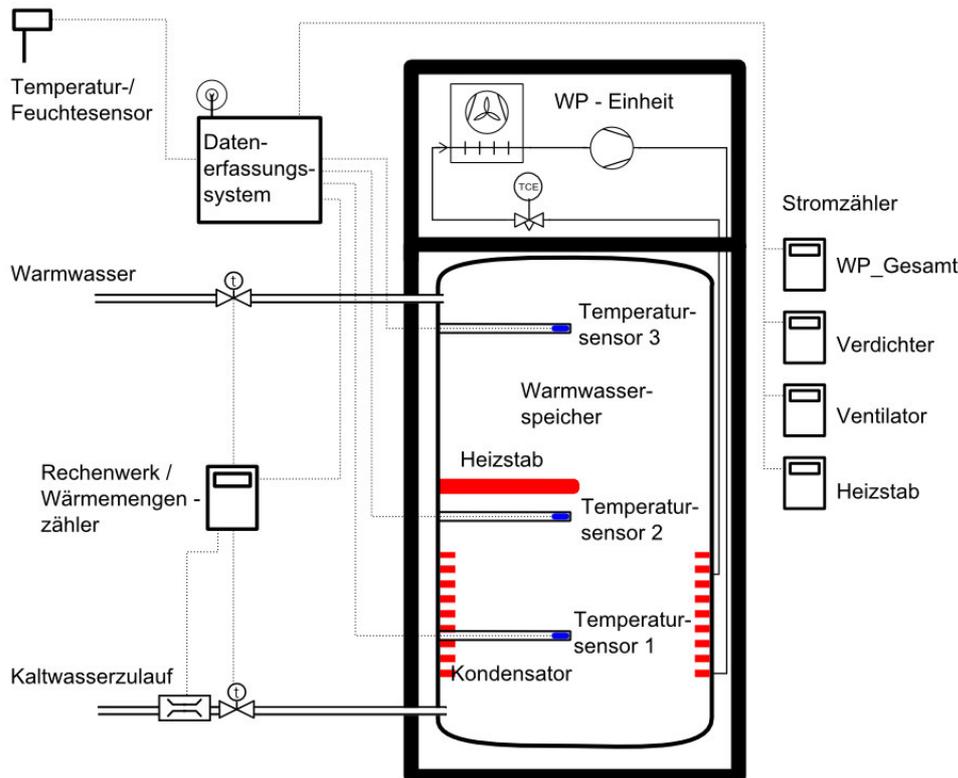


Abbildung 2: Messkonzept

Stromzähler

Als Stromzähler kommt der Elektronische Wechselstromzähler KDK COUNT1 Professional im Direktanschluss zum Einsatz. Der Zähler verfügt über eine S0-Schnittstelle mit einer Auflösung von 10.000 Impulsen pro kWh. Die Stromzähler sind in der Genauigkeitsklasse 1/B eingeordnet ($\pm 2\%$)

Wärmemengenzähler

Als Wärmemengenzähler kommt ein Gerät der Firma Aquametro zum Einsatz. Als Rechenwerk wird ein Calec ST verwendet. Als Temperaturfühlerpaar kommen gepaarte, direkttauchende PT500 Temperatursensoren der Klasse B zum Einsatz. Die Temperatursensoren werden in Kugelhähne mit Impfstellen eingeschraubt, so dass sie das Medium Wasser direkt berühren. Bei dem Volumenstromgeber handelt es sich um magnetisch induktives Gerät mit einer vom Hersteller angegebenen Genauigkeit kleiner $\pm 0,5\%$ vom Messwert. Der Volumenstromgeber liefert einen Impuls pro 5 ml Durchfluss, so dass auch kleinste Zapfungen erfasst werden können. In Summe liegt die Fehlergrenze des Wärmemengenzählers nach EN 1434 bei $3,5\%$.

Temperatur- / Feuchtesensor

Zur Messung des Zustandes der Innenraumluft kommt ein kombinierter Temperatur-/Feuchtesensor zum Einsatz. Die Genauigkeit des Feuchtesensors liegt bei $\pm 2,5\%$, die des Pt100 Temperatursensors bei $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Der Sensor wird über eine RS 232 Schnittstelle per Modbus-Protokoll ausgelesen.

3.4 Messdatenerfassungssystem

Das Messdatenerfassungssystem ist mit einem Embedded System ausgestattet. Dies umfasst einen Rechner mit dem Betriebssystem Linux, auf welchem das Messdatenerfassungsprogramm läuft. Es hat die Aufgabe, die Messwerte im 5-Sekundentakt vom Wärmemengen- und den Elektrozählern, sowie dem Temperatur-/Feuchtesensor abzufragen. Diese Messwerte werden in einer Datei für jeden Messtag abgespeichert. Der Server des Fraunhofer ISE fragt das Messdatenerfassungssystem täglich nach neuen Datensätzen ab und überträgt diese per GSM an das Institut. Der Zeitstempel der aufgezeichneten Messdaten entspricht dem UTC-Zeitformat. Dies bedeutet, dass die Messwerterfassung keine Sommer- / Winterzeitumstellung vornimmt. Die Aufzeichnung erfolgt immer in Winterzeit. Die Messwerte könnten somit den Anschein erwecken, als ob die Bewohner bzw. die Wärmepumpe ihr Verhalten ändern was allerdings nicht der Fall ist.

3.5 Sensorkonfiguration der einzelnen Anlagen

Die Abschnitt 3.3 dargestellte Sensorkonfiguration gilt als Standardkonfiguration. Aufgrund der technischen und räumlichen Gegebenheiten vor Ort konnte diese Konfiguration nicht bei allen Wärmepumpen gleichermaßen realisiert werden. Abweichungen von der Standardkonfiguration werden nachfolgend erläutert.

Anlage 1

Die Sensoranordnung entspricht der Standardkonfiguration.

Anlage 2

Der Temperatur/ -Feuchtesensor wird von der Abluft der Wärmepumpe im Betrieb beeinflusst.

Anlage 3

Der Temperatur/ -Feuchtesensor wird von der Abluft der Wärmepumpe im Betrieb beeinflusst.

Anlage 4

Der Temperatur/ -Feuchtesensor wird von der Abluft der Wärmepumpe im Betrieb beeinflusst. Weiterhin war es bei dieser Anlage nicht möglich neben dem Stromzähler für den Stromverbrauch der gesamten Wärmepumpe weitere Zwischenzähler für den Stromverbrauch der einzelnen Komponenten wie Verdichter, Ventilator und Heizstab einzubauen. Oberhalb der Wärmepumpe ist der Verteiler für Warmwasserleitungen in die einzelnen Stockwerke des Hauses befestigt. Aus diesem Grund konnte der Deckel der Wärmepumpe nicht abgenommen und die Zwischenzähler installiert werden. Anhand der charakteristischen Leistung der einzelnen Verbraucher konnte allerdings eine Trennung der einzelnen Verbraucher mit Hilfe eines Auswertungsalgorithmus vorgenommen werden.

Anlage 5

Die Sensoranordnung entspricht der Standardkonfiguration. Zusätzlich wurde ein Sensor verbaut welcher aufzeichnet wann sich die Wärmepumpe im PV-Extra Modus befindet. Im PV-Extra Modus erhält die Wärmepumpe ein Signal von der PV-Anlage des

Hauses. Übersteigt das Stromangebot von der PV-Anlage den Schwellwert von 3 Ampere, so wird der Sollwert für die Speichertemperatur angehoben was i.d.R ein Anlaufen der Wärmepumpe zur Folge hat.

3.6 Fehlerrechnung

In diesem Abschnitt wird eine vollständige Fehlerrechnung für eine beispielhafte, jedoch typische, Messsituation zur Berechnung der Jahresarbeitszahl durchgeführt.

Der Berechnung der Jahresarbeitszahl liegt sowohl die von der Wärmepumpe bereitgestellte thermische Energie als auch die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Energie zu Grunde. Die thermische Energie wird mit einem Wärmemengenzähler, die elektrische Energie mit einem Stromzählerverfasst.

Nach DIN EN 1434-1 ergibt sich die Fehlergrenze eines vollständigen Wärmehälers aus der arithmetischen Summe der Fehlergrenzen der Teilgeräte. Ein vollständiger Wärmemengenzähler besteht aus Rechenwerk, Temperaturfühlerpaar und Volumenstromsensor. Die nachfolgend vorgestellten Fehlergrenzen geben die nach jeweiliger technischer Vorschrift maximal zulässigen Fehler an.

Für das Rechenwerk ergibt sich der Fehler zu:

$$E_C = 0,5 + \frac{dt_{\min}}{dt} \quad (1)$$

Für das Temperaturfühlerpaar ergibt sich der Fehler zu:

$$E_t = 0,5 + 3 * \frac{dt_{\min}}{dt} \quad (2)$$

Für den Volumenstromsensor ergibt sich der Fehler zu:

$$E_V = 3 + 0,05 * \frac{q_p}{q} \quad (3)$$

Der für diese Berechnung herangezogene Wärmemengenzähler Calec ST benötigt eine minimale Temperaturdifferenz dt_{\min} von 3 K und hat einen Nennvolumenstrom q_p von 5,0 m³/h.

Neben dem Fehler des Wärmemengenzählers muss der Fehler des Stromzählers zur Ermittlung der vom Verdichter, des Primärantriebs und der Steuerung aufgenommenen elektrischen Energie berücksichtigt werden.

Es wird ein Stromzähler nach DIN EN 62053-21 Klasse 2 eingesetzt. Der maximale Fehler EP, der bei der Messung der aufgenommenen elektrischen Energie auftritt, liegt bei 2 % des Messwertes.

Die Jahresarbeitszahl berechnet sich nach folgender Formel:

$$AZ = \frac{Q_{th}}{P_{el}} \quad (4)$$

mit

$$Q_{th} = \dot{V} * \rho * c_p * \Delta T * t \quad (5)$$

Da sich die Fehler der einzelnen Messgrößen sowohl gegenseitig verstärken als auch aufheben können, wird für die Berechnung einer Fehlergrenze der Jahresarbeitszahl ebenfalls die arithmetische Summe der Fehlergrenzen aller in die Berechnung einfließender Einzelgrößen herangezogen. Für die Fehlergrenze bei der Berechnung der Jahresarbeitszahl ergibt sich über die Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta AZ = \sqrt{\left(\frac{\partial AZ}{\partial c_p} * \Delta c_p\right)^2 + \left(\frac{\partial AZ}{\partial \rho} * \Delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial AZ}{\partial \Delta T} * \Delta \Delta T\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\partial AZ}{\partial V} * \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial AZ}{\partial E_{el}} * \Delta E_{el}\right)^2} \quad (6)$$

mit

$$V = \dot{V} * t \quad (7)$$

Die Fehlerrechnung wird beispielhaft für eine Arbeitszahlberechnung mit den in der Tabelle 3 angenommenen, fiktiven Messdaten durchgeführt.

Tabelle 3: Für die Fehlerrechnung angenommene Bedingungen

Messinstrument	Größe	Wert	Einheit
Wärmemengenzähler	Temperaturdifferenz	35,0	K
	Volumenstrom	240	l/h
	Zapfzeit	310	h
Stromzähler	elektrische Arbeit	1200	kWh

Entsprechend der Formel 6 wirken sich zudem auch die Wärmekapazität sowie die Dichte des Wassers auf den Fehler der Arbeitszahl aus. Einen kompletten Überblick über alle benötigten Größen, deren absolute und relative Fehler sowie die entsprechenden Ergebnisse für die Arbeitszahl enthält die folgenden Tabelle 4.

Tabelle 4: Ausgangswerte sowie die Ergebnisse für relative und absolute Fehler der Teilgrößen- sowie der Arbeitszahl

Durchführung des Projektes

Größe	Formel- zeichen	Fehlergr enze	gemessener Wert	Einheit	Fehler absolut	Fehler relativ
Temperatur- differenz	dT	E _t	35,0	K	0,27	
Volumenstrom	\dot{V}	E _v	240	m ³ /h	0,01	3,0 %
Wärmekapazität Wasser (15 °C)	c _p	E _c	4184,0	J/kg*K	24,51	0,6 %
Dichte Wasser (15 °C)	ρ	E _c	999,1	kg/m ³	5,85	0,6 %
elektrische Energie	E _{el}	E _p	1200,0	kWh	52,00	2,0 %
Arbeitszahl	AZ	-	2,52	-	0,09	3,7 %

Für die Berechnung der Arbeitszahl ergibt sich demnach ein maximaler Fehler von 3,7 %. An dieser Stelle sei explizit darauf hingewiesen, dass es sich bei den einzelnen Fehlergrenzen um den maximal zulässigen Fehler handelt. Hersteller von Messgeräten geben i.d.R. eigene, geringere Fehlergrenzen für ihre Produkte an.

4 Auswertung

Der Messzeitraum beginnt mit dem 1. August 2016 und endet zum 31. Oktober 2018.

4.1 Zapfverhalten

In diesem Kapitel wird die Warmwasserzapfung bei den einzelnen Anlagen näher untersucht. Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kenngrößen (Volumen, Energie, Temperatur) der Zapfung. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Größen detaillierter ausgewertet. Zusätzlich sind die Anzahl der Bewohner in der Tabelle angegeben.

Tabelle 5: Übersicht Zapfung

Anlage	1	2	3	4	5
Anzahl der Bewohner	4	2	2	2	4
Ø Zapfung pro Tag in Liter	132.4	55.9	76.6	47.4	190.3
Ø Zapfung pro Tag in kWh	5.4	2.4	3.6	2.0	9.6
Ø Temperatur Warmwasser in °C ¹	50.2	53.3	57.1	51.2	58.3
Ø Temperatur Kaltwasser in °C ²	15.6	15.8	16.1	15.9	16.0
Ø delta T in K	34.6	37.5	41.0	35.3	42.3

4.1.1 Charakteristik der Zapfung

Nachfolgend wird die Häufigkeitsverteilung der gezapften Menge pro Tag dargestellt. Die Menge der Zapfung wird dabei in Klassen mit der Klassenbreite von 10 Liter pro Tag eingeteilt. Tage an denen keine Zapfung stattgefunden hat, tauchen in Klasse 1 (0-10 Liter/Tag) auf.

Anschließend wird die Energiemenge der gezapften Warmwassermenge dargestellt. Es wird eine Häufigkeitsverteilung der gezapften Energiemenge pro Tag dargestellt. Die Breite der Klasse sind dabei 0,15 kWh/Tag. Zum Vergleich sind die Energiemengen der Normzapfprofile S, M, L und XL, die bei den jeweiligen Prüfroutinen für Warmwasserwärmepumpen nach DIN EN 16147 entnommen werden, gezeigt.

¹ Für Zapfungen größer 2 Liter

² Für Zapfungen größer 2 Liter

Anlage 1

Auswertung

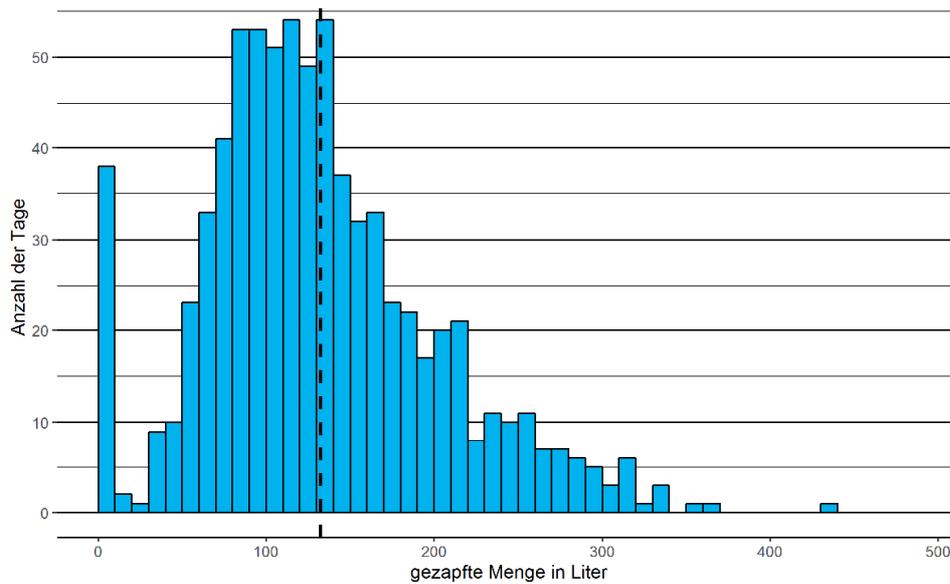


Abbildung 3: Anlage 1 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 758 Messtage)

Die Menge an gezapftem Warmwasser in Anlage 1 reicht von 0 bis 489 L/Tag. Der Mittelwert der Zapfung ist durch die gestrichelte Linie dargestellt und liegt bei 132 L/Tag.

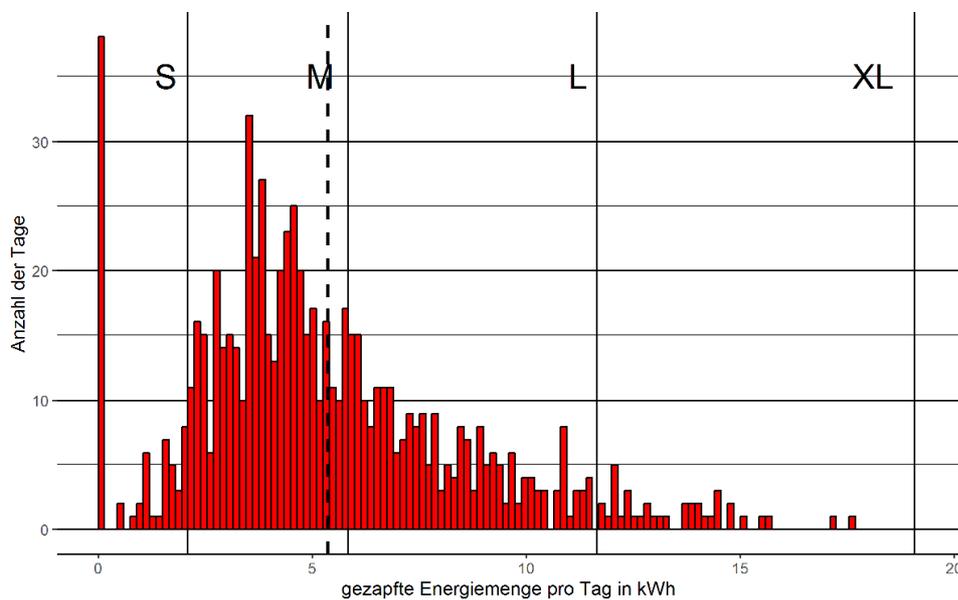


Abbildung 4: Anlage 1 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 758 Messtage)

Die Energiemenge, die pro Tag gezapft wird, reicht von 0 bis 17,6 kWh/Tag. Der Mittelwert (gestrichelte Linie) liegt bei 5,4 kWh/Tag. An 721 Tagen (95 %) ist die gezapfte Energiemenge geringer als im Zapfprofil L (11,7 kWh/d).

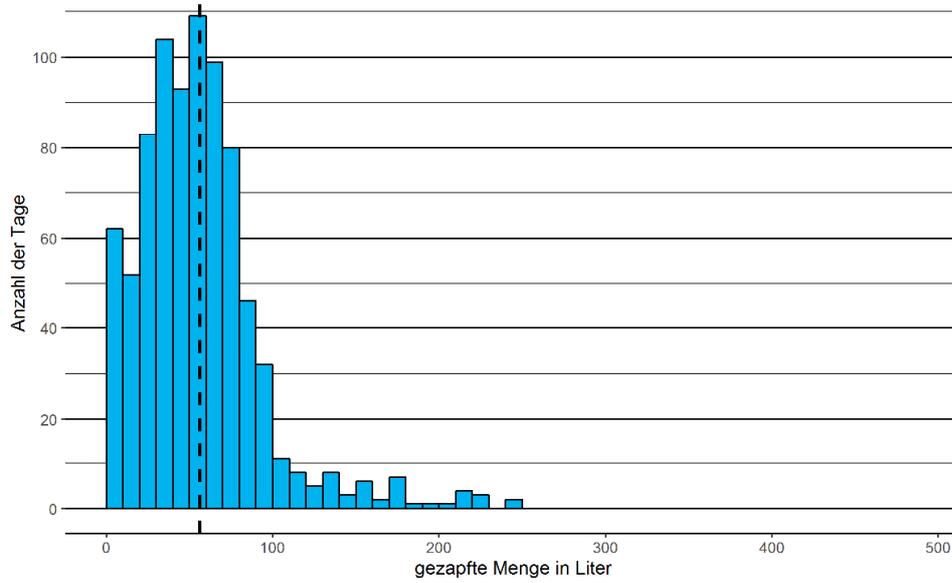


Abbildung 5: Anlage 2 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 822 Messtage)

Die Menge an gezapftem Warmwasser reicht von 0 bis 246 L/Tag. Der Mittelwert der Zapfung ist durch die gestrichelte Linie dargestellt und liegt bei 55 L/Tag.

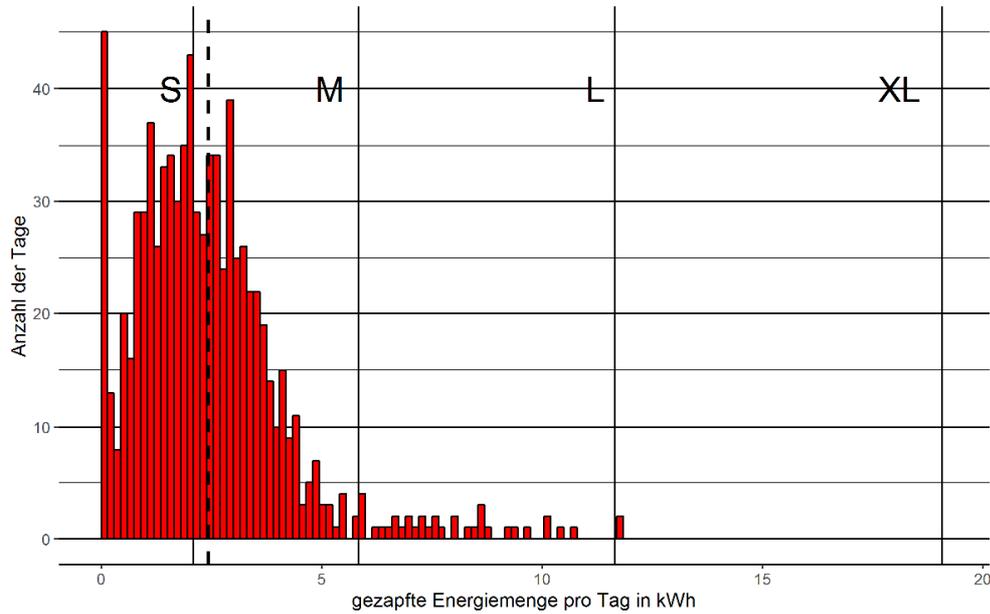


Abbildung 6: Anlage 2 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 822 Messtage)

Die Energiemenge, die pro Tag gezapft wird, reicht von 0 bis 11,8 kWh/Tag. Der Mittelwert (gestrichelte Linie) liegt bei 2,3 kWh/Tag. An 786 Tagen (96 %) ist die gezapfte Energiemenge geringer als im Zapfprofil M (5,8 kWh/a).

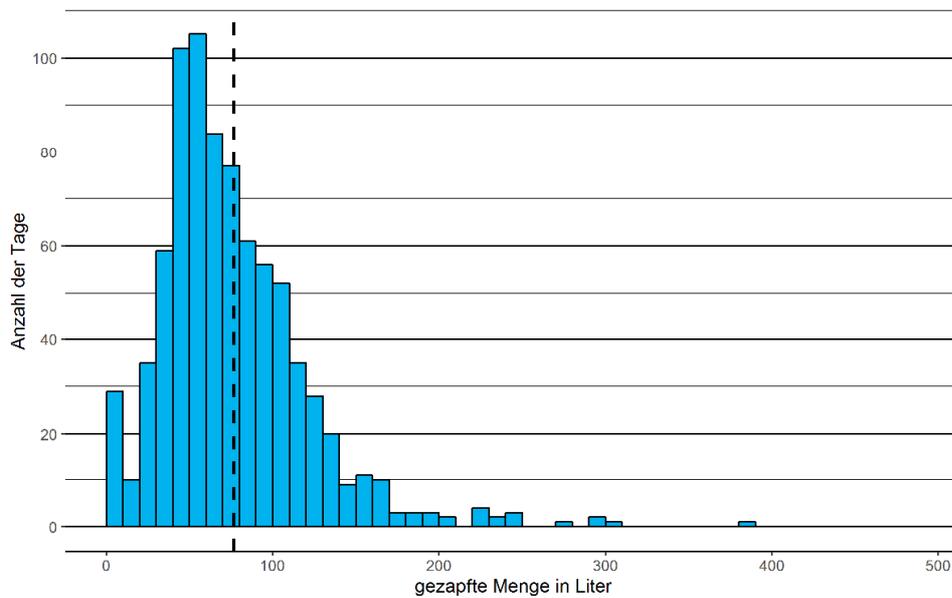


Abbildung 7: Anlage 3 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 807 Messtage)

Die Menge an gezapftem Warmwasser reicht von 0 bis 382 L/Tag. Der Mittelwert der Zapfung ist durch die gestrichelte Linie dargestellt und liegt bei 77 L/Tag.

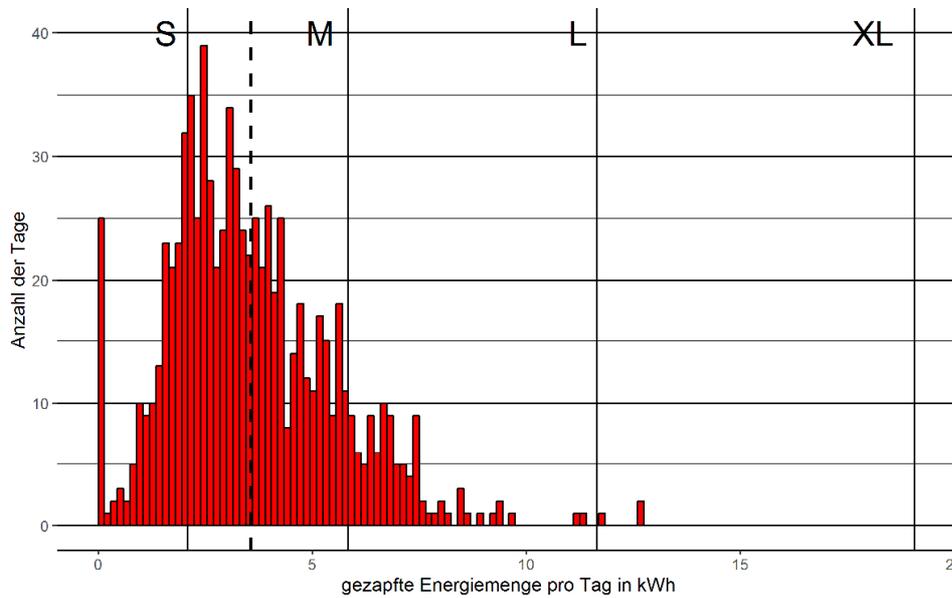


Abbildung 8: Anlage 3 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 807 Messtage)

Die Energiemenge, die pro Tag gezapft wird, reicht von 0 bis 12,7 kWh/Tag. Der Mittelwert (gestrichelte Linie) liegt bei 3,6 kWh/Tag. An 709 Tagen (88 %) ist die gezapfte Energiemenge geringer als im Zapfprofil M (5,8 kWh/a).

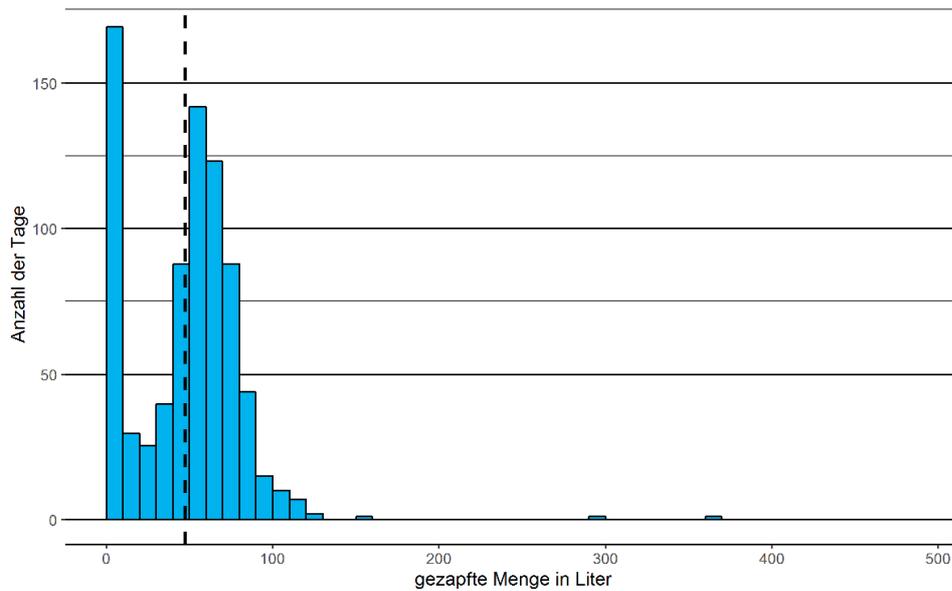


Abbildung 9: Anlage 4 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 784 Messtage)

Die Menge an gezapftem Warmwasser reicht von 0 bis 365 L/Tag. Der Mittelwert der Zapfung ist durch die gestrichelte Linie dargestellt und liegt bei 47 L/Tag.

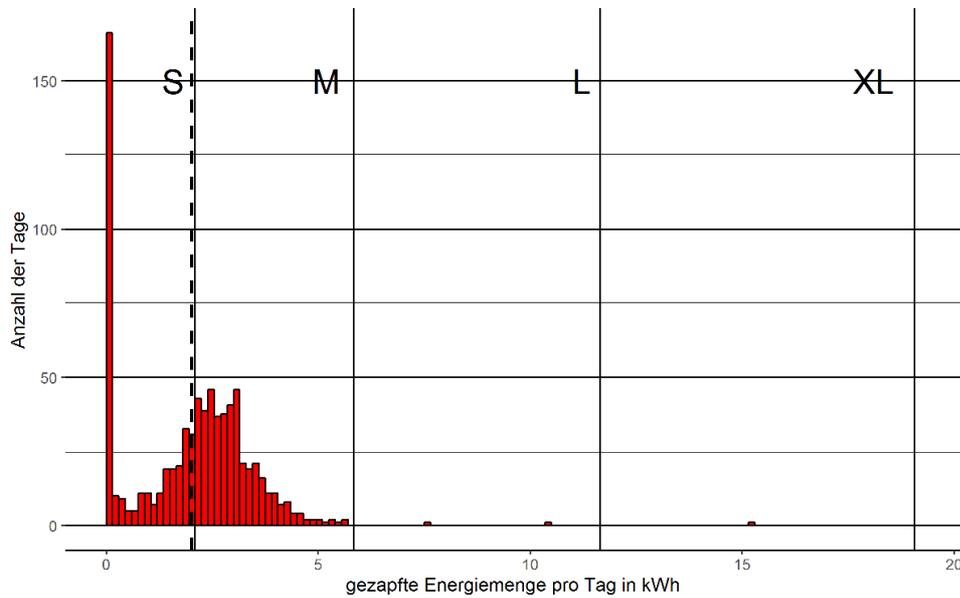


Abbildung 10: Anlage 4 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 784 Messtage)

Die Energiemenge, die pro Tag gezapft wird, reicht von 0 bis 15,3 kWh/Tag. Der Mittelwert (gestrichelte Line) liegt bei 2,0 kWh/Tag. An 781 Tagen (99 %) ist die gezapfte Energiemenge geringer als im Zapfprofil M.

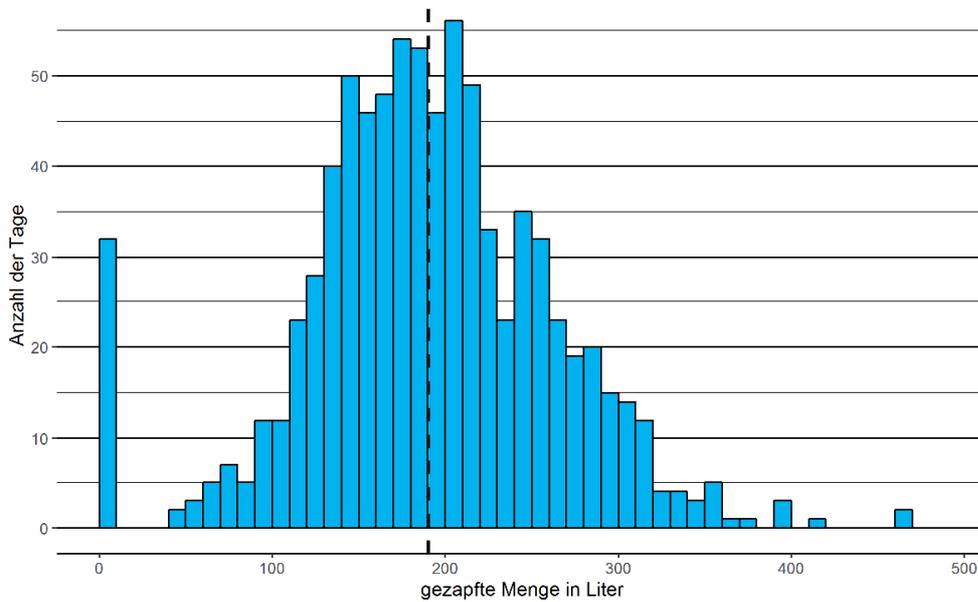


Abbildung 11: Anlage 5 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 821 Messtage)

Die Menge an gezapftem Warmwasser reicht von 0 bis 465 L/Tag. Der Mittelwert der Zapfung ist durch die gestrichelte Linie dargestellt und liegt bei 190 L/Tag.

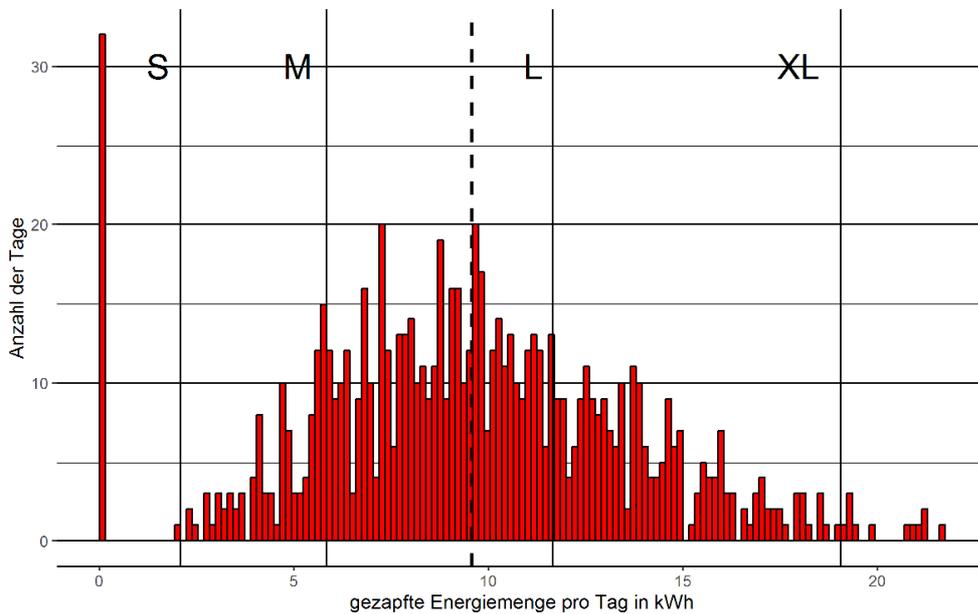


Abbildung 12: Anlage 5 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 821 Messtage)

Die Energiemenge, die pro Tag gezapft wird, reicht von 0 bis 21,7 kWh/Tag. Der Mittelwert (gestrichelte Linie) liegt bei 9,6 kWh/Tag. Die Tage sind nahezu normalverteilt um diesen Mittelwert. An 809 Tagen (99 %) ist die gezapfte Energiemenge geringer als im Zapfprofil XL (19,1 kWh/d).

4.1.2 Temperaturen Zapfungen

Im folgenden Abschnitt werden die Temperaturen der einzelnen Zapfungen näher betrachtet. Es werden nur Zapfungen betrachtet, deren Volumen mindestens 2 Liter beträgt. Für kleinere Zapfungen ist die gemessene Temperatur stark von der Temperatur des Wassers beeinflusst, welches sich während des Stillstandes in der Leitung befindet. Dargestellt werden die mittlere Kaltwassertemperatur und die Warmwassertemperatur am Ende des Zapfvorgangs. Die Warmwassertemperatur am Ende des Zapfvorgangs gibt einen Aufschluss darüber, ob die Warmwasser-Wärmepumpe immer in der Lage ist, die Komfortgrenzen einzuhalten, also Warmwasser bei der gewünschten Zieltemperatur bereitzustellen.

Anlage 1

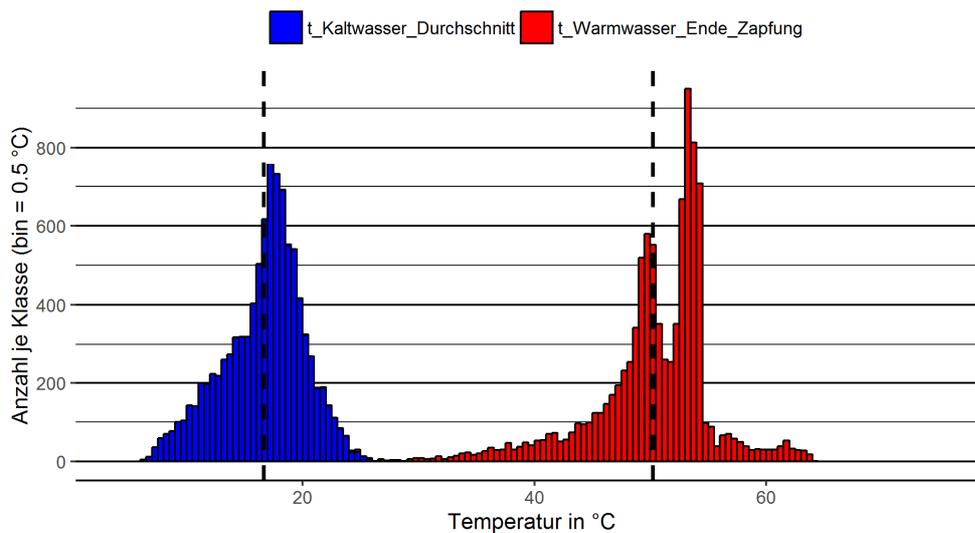


Abbildung 13: Anlage 1 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 758 Messtage)

Die mittlere Temperatur des Kaltwasserzulaufs reicht von 6,2 °C bis 27,9 °C. Die Temperatur zeigt eine Normalverteilung um den Mittelwert von 16,8 °C. Die Warmwassertemperatur am Ende der Zapfung reicht von 16,1 °C bis 64,3 °C. Der Mittelwert liegt bei 50,2 °C. In 6% der 9.719 Zapfungen mit einem Zapfvolumen über 2 Liter lag die Zapfendtemperatur unter 40 °C. Die Zapfungen, deren Temperatur 55 °C überschreitet, erfolgten in Zeiten, in denen der Speicher aufgrund der Legionellenschaltung eine höhere Temperatur hatte.

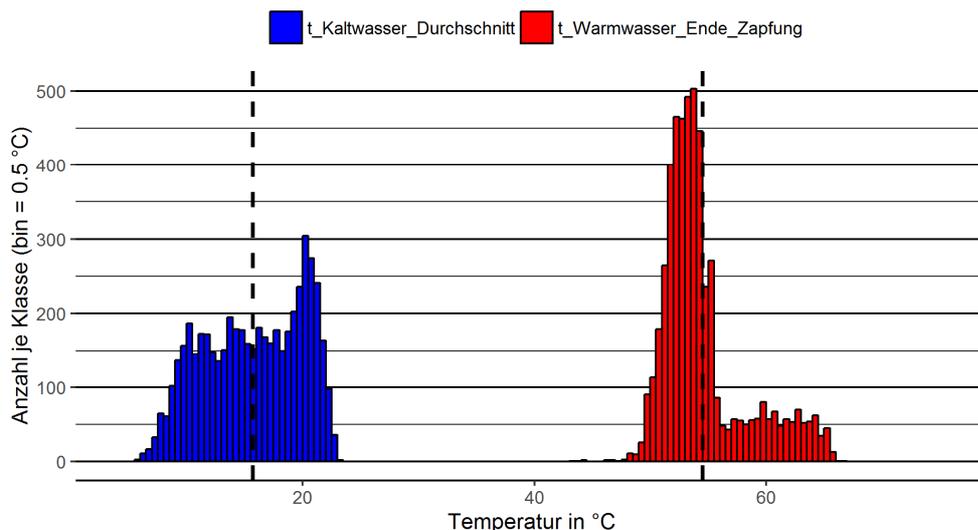


Abbildung 14: Anlage 2 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)

Die mittlere Temperatur des Kaltwasserzulaufs reicht von 5,9 °C bis 24,5 °C. Der Mittelwert liegt bei 15,8 °C. Die Warmwassertemperatur am Ende der Zapfung reicht von 43,2 °C bis 66,8 °C. Der Mittelwert liegt bei 54,5 °C. Die Zapfungen, deren Temperatur 55 °C überschreitet, erfolgten in Zeiten, in denen der Speicher aufgrund der Legionellenschaltung eine höhere Temperatur hatte.

Anlage 3

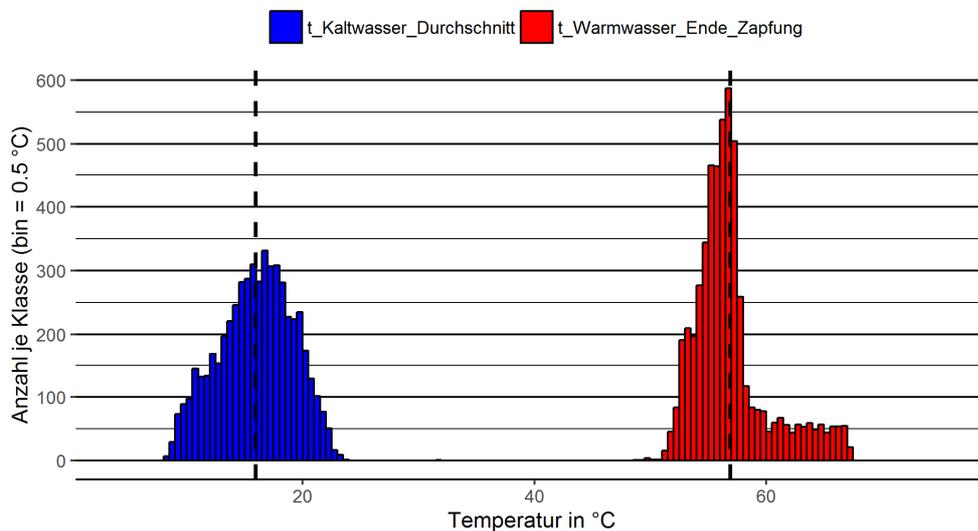


Abbildung 15: Anlage 3 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)

Die mittlere Temperatur des Kaltwasserzulaufs reicht von 3,9 °C bis 24,5 °C. Der Mittelwert liegt bei 16,0 °C. Die Warmwassertemperatur am Ende der Zapfung reicht von 25,1 °C bis 64,1 °C. In 1 % der 10.542 Zapfungen mit einem Zapfvolumen über 2 Liter lag die Zapfendtemperatur unter 40 °C. Der Mittelwert liegt bei 58,1 °C. Am 14.6. 2018 wurde der Sollwert von 60 auf 62,5 °C angehoben.

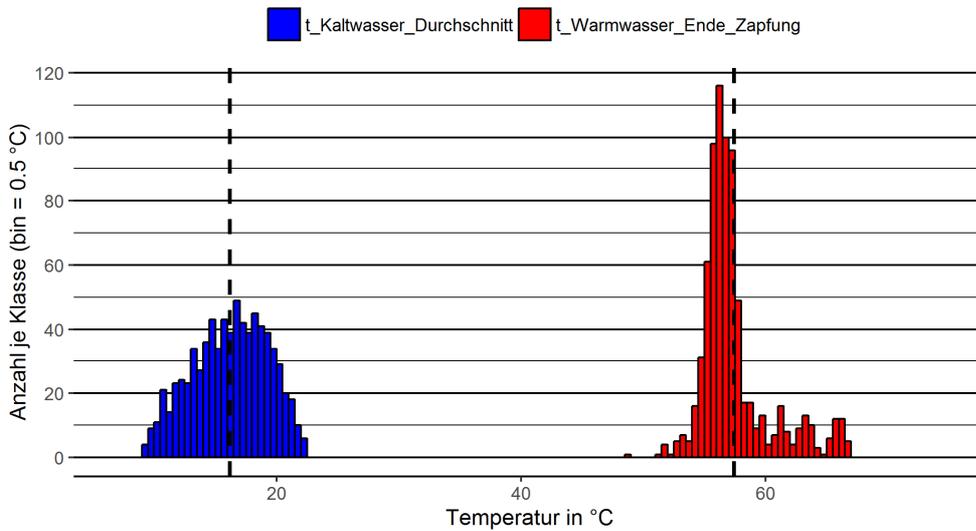


Abbildung 16: Anlage 4 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)

Die mittlere Temperatur des Kaltwasserzulaufs reicht von 8,2 °C bis 24,3 °C. Der Mittelwert liegt bei 16,1 °C. Die Warmwassertemperatur am Ende der Zapfung reicht von 11,5 °C bis 67,3 °C. Der Mittelwert liegt bei 56,9 °C. Die Temperatur von 40 °C wurde bei 3 von 5.329 Zapfungen mit einem Zapfvolumen über 2 Liter nicht erreicht. Die Zapfungen, deren Temperatur 55 °C überschreitet, erfolgten in Zeiten, in denen der Speicher aufgrund der Legionellenschaltung eine höhere Temperatur hatte.

Anlage 5

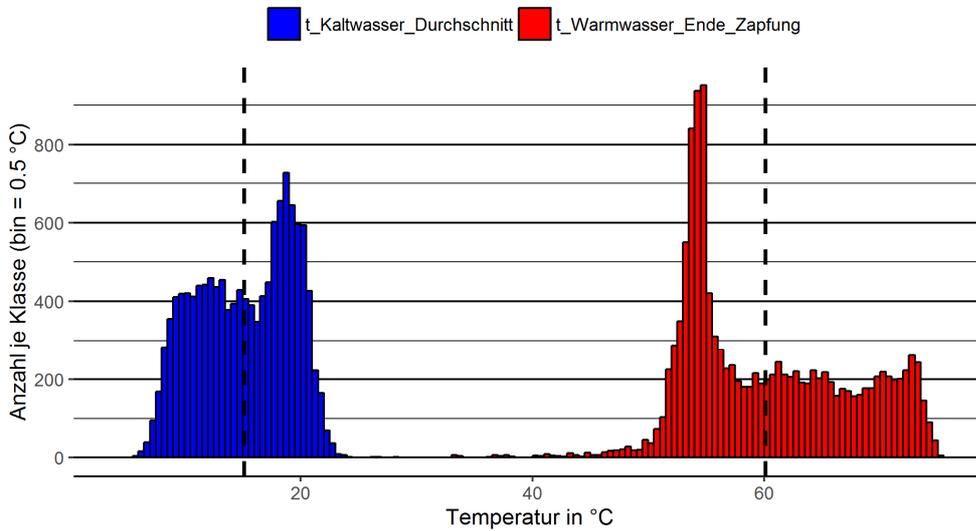


Abbildung 17: Anlage 5 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)

Die mittlere Temperatur des Kaltwasserzulaufs reicht von 5,7 °C bis 24,7 °C. Der Mittelwert liegt bei 15,6 °C. Die Warmwassertemperatur am Ende der Zapfung reicht von 21,1 °C bis 75,5 °C. Der Mittelwert liegt bei 60,1 °C. Die Temperatur von 40 °C wurde bei 47 von 12819 Zapfungen größer 2 Liter nicht erreicht. Die hohen

Zapftemperaturen von bis zu 75°C sind auf den erhöhten Sollwert des Heizstabes in Zeiten eines hohen PV-Ertrages zurückzuführen.

Auswertung

4.1.2.1 Kaltwasser

Die folgende Abbildung 18 zeigt die mittlere Zulauftemperatur des Frischwassers für Zapfungen größer 2 L als Mittelwert pro Monat.

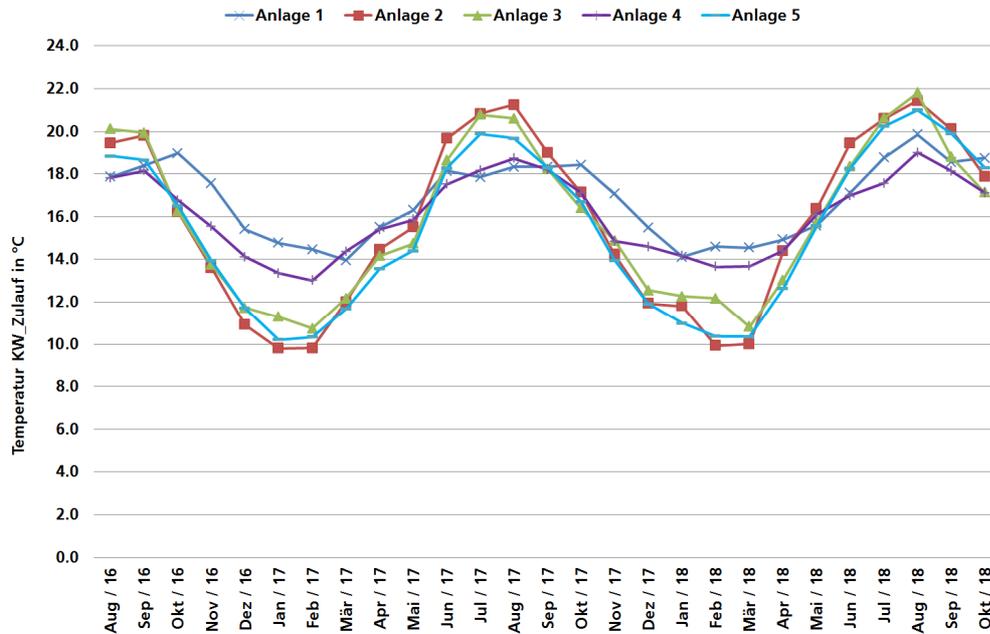


Abbildung 18: Temperatur Kaltwasserzulauf

Die Monatsmittelwerte des Kaltwasserzulaufs reichen von 9,8 °C im Januar 2017 bis 21,2 °C im August 2017 (Anlage 2). Der Temperaturverlauf über die Monate bei den Anlagen 2, 3 und 5 zeigt ein nahezu identisches Verhalten. Bei den beiden Anlagen 1 und 4 sind die Ausschläge in den Sommer und Wintermonaten wesentlich geringer ausgeprägt. Bei einem eingestellten Sollwert von 55 °C muss die Wärmepumpe (Anlage 2) in den Sommermonaten das Wasser im Mittel um 35 K erwärmen; in den Wintermonaten um 45 K (20 % mehr).

Bei der Einordnung der Effizienz in Abhängigkeit der Jahreszeit sind zwei gegenläufige Effekte zu berücksichtigen.

1. Wie gezeigt ist die Kaltwassertemperatur in den Wintermonaten niedriger als in den Sommermonaten. Dies führt (in geringem Maße) zu einer höheren Effizienz, da die Effizienz der Wärmepumpe beim Erwärmen von kaltem Wasser geringfügig höher ist als beim Erwärmen von warmem Wasser. Da jedoch – unter Annahme eines gleichen Warmwasservolumens, die Wärmemenge höher ist, ergibt sich ein höherer Elektroenergiebedarf. Denn nur die gegenüber dem Sommer zusätzlich anfallende Trinkwassererwärmung erfolgt bei günstiger Effizienz.
2. Wie in Kapitel 4.5 ausgeführt, liegt die Wärmequellentemperatur (Raumtemperatur) in den Wintermonaten etwas niedriger als in den Sommermonaten. Dies wirkt sich – im Gegensatz zu Punkt 1 auf den gesamten Wärmepumpenbetrieb – effizienzreduzierend gegenüber den Sommermonaten aus.

Der Einfluss der beiden genannten Effekte auf die Arbeitszahl lässt sich an den Messungen – u.a. aufgrund der Varianz weiterer Einflussgrößen auf die Effizienz – nicht aufzeigen.

Auswertung

4.2 Betriebsverhalten und Effizienz: Anlage 1 bis 4

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 (und die zeitliche Abstimmung mit dem Wärmepumpenbetrieb) zu nennen. In den folgenden Kapiteln (4.2.1 bis 4.2.6) werden das Betriebsverhalten der einzelnen Anlagen sowie deren Effizienz eingehend untersucht.

4.2.1 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 war der Sollwert den ganzen Tag über konstant, im Zuge der Optimierungsmaßnahmen (siehe Kapitel 4.4.4) wurde hier ebenfalls ein Zeitfenster eingerichtet.

Die Rasterdiagramme in den folgenden Abbildungen (Abbildung 19 (Anlage 1) bis Abbildung 22 (Anlage 4)) zeigen den täglichen Verlauf des Wärmepumpen- und Heizstabbetriebes (grün (nur Wärmepumpe), rot (Wärmepumpe und Heizstab) und gelb (nur Heizstab) während der Auswertungsperiode von August 2016 bis Oktober 2018. Die Zeitangaben in den folgenden Diagrammen und im Text sind in Weltzeit UTC angegeben. Die Mitteleuropäische Zeit ergibt sich durch Addition von einer Stunde, bzw. die Mitteleuropäische Sommerzeit durch Addition von zwei Stunden.

Anlage 1

Bei Anlage 1 wurden die Einstellungen am Regler der Wärmepumpe vom Benutzer, während der untersuchten Periode verändert. Die Bewohner haben das Fraunhofer ISE auf Anfrage per Mail über die geänderten Einstellungen informiert. An der Wärmepumpe ist der „Standardmodus“ in der meisten Zeit der untersuchten Periode tagsüber (vom Vormittag bis in den frühen Nachmittag) aktiviert. Im Zeitraum Dezember 2016 /Januar 2017 wurde das Zeitfenster des „Standardmodus“ werktags in der Nacht und nur am Wochenende tagsüber gewählt. Im Januar 2017 wurde der

Standardmodus an Wochentagen und am Wochenende von 09:00 bis 17:00 gelegt. Im Januar 2018 wurde der Standardmodus auf 09:00 bis 15:00 gelegt. 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 5K eingestellt ist, liegt die Speichertemperatur dort zu Beginn des „Standard-Zeitfensters“ immer unter dem Einschaltwert (Sollwert minus Hysterese); somit ist der Beginn des Zeitfensters anhand des Wärmepumpenbetriebes gut ablesbar (siehe Abbildung 19). Zunächst ist das „Standard-Zeitfenster“ vom Wochentag abhängig eingestellt (Mo – Fr ab 9:40 bzw. später ab 8:40 und Sa/So ab 7:40 Uhr; jeweils für 7h) und ab Oktober 2016 wochentags unabhängig (ab 8:40 Uhr; für 4h). Im Dezember 2016 wurde das Zeitprogramm erneut geändert: werktags ist der „Standardmodus“ nun in der Nacht freigegeben (Mo – Fr 19:40 bzw. später 17:40 bis 3:40 Uhr) und am Wochenende tagsüber (Sa/So 5:40 bis 17:40 bzw. später 14:40 Uhr). Anfang Januar 2017 wird das „Standard-Zeitfenster“ unabhängig vom Wochentag auf 08:40 bis 14:40 eingestellt. Anfang März 2017 wird der Beginn des „Standard-Zeitfenster“ an Arbeitstagen auf 07:40 vorverlegt. Am Wochenende beginnt das „Standard-Zeitfenster“ um 08:40, ist dafür aber erst bis 19:40 begrenzt, da die Familie am Wochenende einen höheren Bedarf an Warmwasser erwartet. Ende Juni 2017 wird das „Standard-Zeitfenster“ an Werktagen um weitere 60 Minuten auf 06:40 vorverlegt. Ab Anfang August 2017 wird das „Standard-Zeitfenster“ für alle Wochentage auf 09:00 verlegt.

Die Legionellenschaltung ist seit Beginn der Messperiode bis Anfang Januar 2018 einmal wöchentlich samstags um 12:00 Uhr aktiviert. Im Zuge der Optimierungsmaßnahmen sollte die Legionellenschaltung so gelegt werden, dass diese sich nicht mit dem normalen Wärmepumpenbetrieb überschneidet. Aus diesem Grund wurden Anfang Januar 2018 die Reglereinstellungen erneut geändert. Hierbei ist ein Fehler unterlaufen, so dass der Heizstab aktiviert wurde, sobald die Temperatur am oberen Sensor unter 55 °C gefallen ist. Am 14.4.2018 wurde der Heizstab im „Standardmodus“ wieder deaktiviert, so dass dieser nur noch zur Legionellenschaltung (einmal wöchentlich um 14 Uhr) aktiviert wurde. Im Februar und im September 2018 gab es jeweils einen längeren Messdatenausfall aufgrund einer Fehlfunktion der Messwerterfassung.

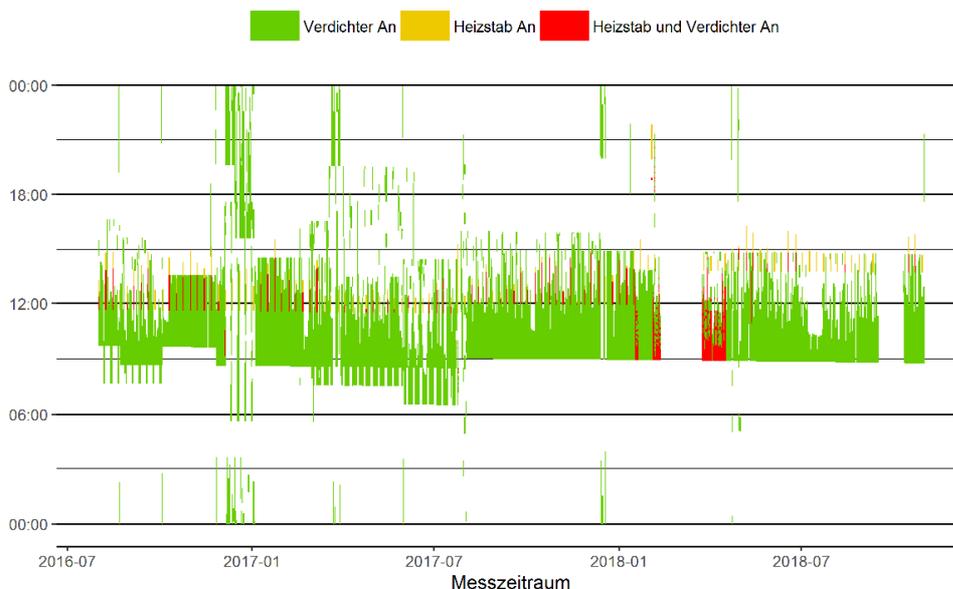


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 1

Der Wärmepumpenbetrieb zeigt - abhängig von dem Zapfverhalten der Nutzer am jeweiligen Tag und der tageszeitlichen Lage des „Standardmodus“ - folgende Charakteristik:

Auswertung

- Die Wärmepumpe startet je zu Beginn des „Standard-Zeitfensters“ und ist anschließend für i.d.R. zwei bis sechs Stunden durchgehend in Betrieb.
- Zeitfenster mit Beginn um 7:40/8:40/9:40 Uhr und Dauer von 7h: An den meisten Tagen läuft die Wärmepumpe 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 Tage läuft die WP ein zweites Mal; für einige Minuten¹ 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.

Die zeitliche Lage des Wärmepumpenbetriebs in Bezug auf das „Standardzeitfenster“ (zu Beginn oder währenddessen) hat bei dieser Anlage, bei der ein relevanter Anteil des täglichen Zapfvolumens außerhalb des „Standardzeitfensters“ liegt und der Regelungssensor unten im Speicher positioniert ist, einen Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmesenke und damit den COP (siehe Kapitel 4.2.2).

¹ Der nur ein paar Minuten andauernde Betrieb ergibt sich, 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.

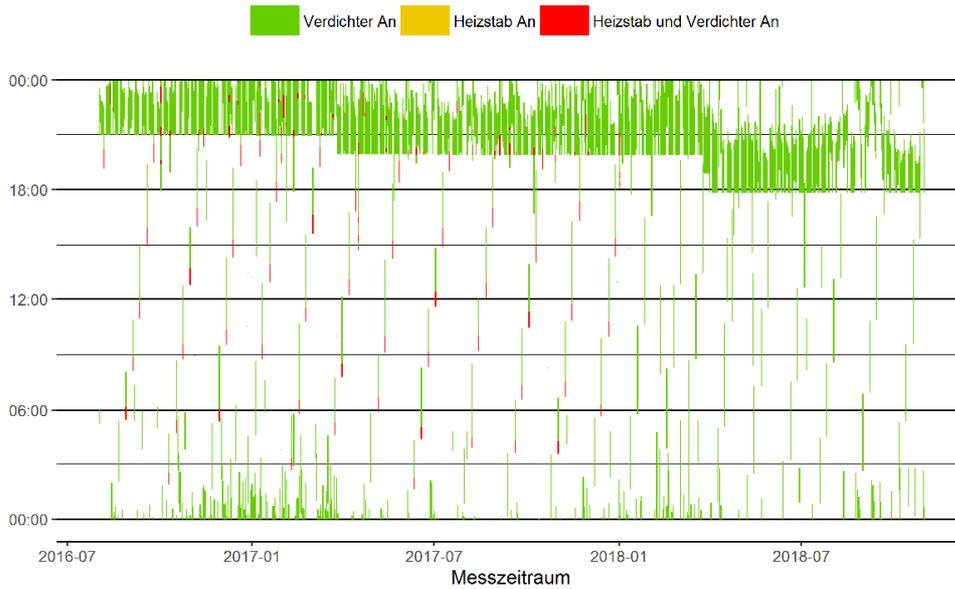


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 2

Bei Anlage 2 ist der Standardmodus während der Nachtstunden aktiviert. Zunächst ist ein „Standard-Zeitfenster“ von 22:00 bis 7:00 Uhr eingestellt. Am 27.3.2017 wird das Zeitfenster auf 20:00, am 26.3.2018 auf 19:00 und einige Tage später auf 18:00 vorverlegt. Außerhalb dieses Zeitfensters ist der Sollwert um 7 K reduziert. Die morgendliche Zapfung fällt meist noch in das „Standard-Zeitfenster“. Dies verursacht jedoch keinen Start der Wärmepumpe, da der Regelungssensor im oberen Bereich des Speichers positioniert ist und das morgendliche Zapfvolumen i.d.R. unter 50 L liegt.¹ Meist startet der Wärmepumpenbetrieb zu Beginn des Standard-Zeitfensters. An Tagen, an denen der Speicher auf den erhöhten Sollwert der Legionellenschaltung erwärmt wurde, startet die Wärmepumpe teilweise erst in der zweiten Nachthälfte (nach Absenkung der Temperaturen durch Zapfung, Speicherverluste und u.U. interne Wärmeleitung).

Die Legionellenschaltung wird einmal die Woche aktiviert; jeweils 7 Tage und 2 bis 5 Stunden nach dem Beginn der vorherigen Legionellenschaltung (siehe Kapitel 4.2.4). Im Jahr 2016 und 2017 gehen mit dem Start der Legionellenschaltung die Wärmepumpe und der Heizstab in Betrieb. Am 01.01.2018 wird der Heizstab sowohl für die Legionellenschaltung und als auch für den Standardbetrieb deaktiviert.

¹ Erläuterung zur Grafik des Verlaufes des Wärmepumpenbetriebes der Anlage 2:

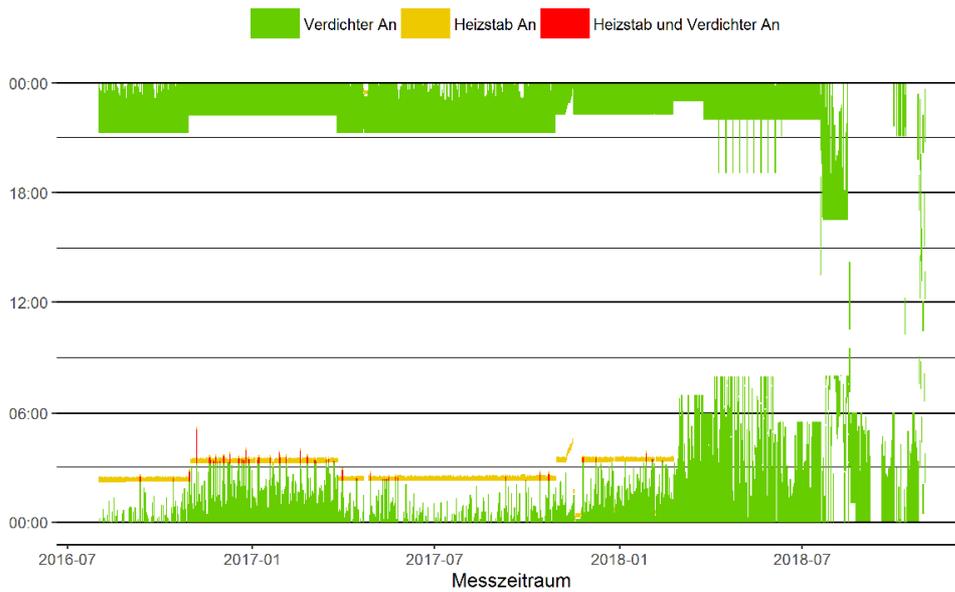


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 3

Bei Anlage 3 ist der Standardmodus ebenfalls während der Nachtstunden (21:15 bis 4:14) aktiviert. Außerhalb dieses Zeitfensters ist der Wärmepumpenbetrieb deaktiviert. Die Wärmepumpe läuft nur einmal am Tag. Die Verschiebung der Startzeit des Verdichter- und Heizstabbetriebes Ende Oktober 2016 bzw. 2017 und Ende April 2017 um jeweils eine Stunde ist auf die Sommer/Winter-Zeitungstellung zurückzuführen. Die Messwerterfassung speichert die Daten immer im UTC Zeitformat und nimmt damit keine Zeitumstellung vor. In Bezug auf die jeweils gültige Uhrzeit liegt das Zeitfenster somit stets zur gleichen Zeit.

Am 24.2.18 wurde der Heizstab deaktiviert und das Zeitfenster auf 23:00 bis 07:00 gelegt. Am 25.3.18 wurde das Zeitfenster auf 22:00 bis 06:00 gelegt. Am 09.04.18 wurde das Zeitfenster immer an jedem Montag auf 19:00 bis 05:00 gelegt. Ab 05.06. wurde das Montagsprogramm wieder deaktiviert und das Zeitfenster von 22:00 bis 05:00 gelegt. Am 20.7. wurde das Zeitfenster auf 16:40 bis 06:00 gelegt, da der Bewohner jetzt bis zu 200 Liter täglich entnommen hat. Ab 16.8.18 wurde das Zeitfenster auf 00:00 bis 08:00 gesetzt. Am 30.09.18 erfolgte eine Umstellung auf 21:00 bis 04:00. Am 25.10.18 wurde das Zeitfenster deaktiviert, so dass die Wärmepumpe immer laufen kann.

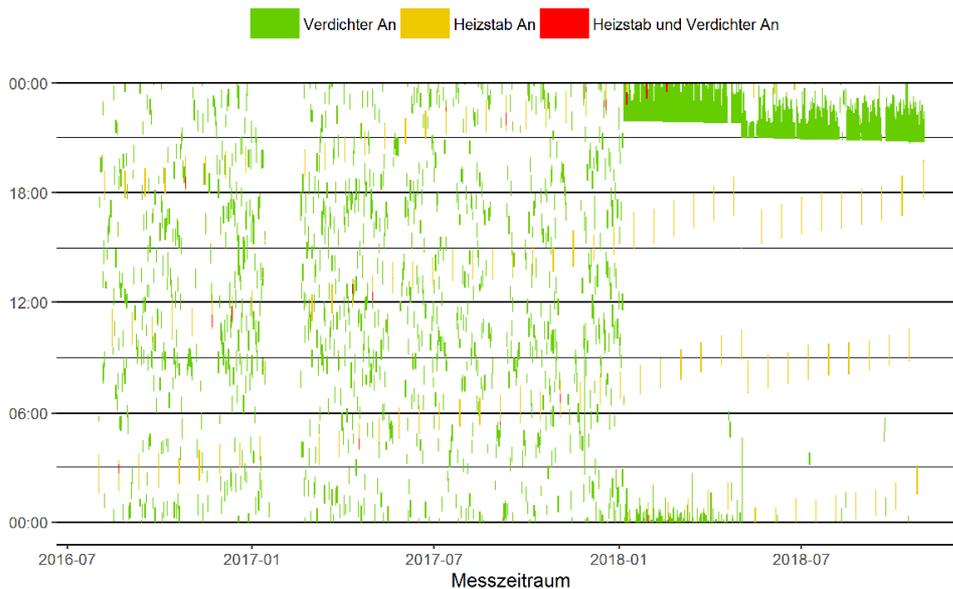


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 4

Die Anlage 4 zeigt eine deutlich andere Betriebscharakteristik als die Anlagen 1 bis 3. Im Jahr 2016 und 2017 ist die Wärmepumpe zwei- oder drei mal täglich für rund 1h 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 Regelungssensor im unteren Drittel des Speichers positioniert. Die Wärmepumpe startet bereits nachdem weniger als 30 Liter seit dem Ende der letzten Wärmepumpenbetriebsphase gezapft wurden. Ab dem 6.1.2018 wurde das Betriebsfenster der Wärmepumpe auf 22:00 bis 06:00 gelegt und die Hysterese auf 8 K erhöht. In der Folge läuft die Wärmepumpe nur noch einmal am Tag. Die Legionellenschaltung wird weiterhin einmal wöchentlich aktiviert.

4.2.2 Wärmepumpenlaufzeiten und Speichertemperaturen

Die folgenden vier Abbildungen geben einen näheren Einblick in die einzelnen Wärmepumpenbetriebszyklen (Auswertungszeitraum August bis November 2016). Separat für jede Wärmepumpenanlage ist die Dauer jeder Wärmepumpenbetriebsphase (rechte y-Achse) in Bezug auf das Trinkwasservolumen, welches seit dem Ende der letzten Wärmepumpenbetriebsphase gezapft wurde bzw. ggf. (noch) während der betrachteten Wärmepumpenbetriebsphase gezapft wird (x-Achse), dargestellt. Diese Angabe des gezapften Trinkwasservolumens verdeutlicht wie weit der Speichervolumen jeweils „ausgenutzt“ wird. Die Länge der Wärmepumpenbetriebsphasen zeigt die zu erwartende Korrelation zum Zapfvolumen. Wurde bei den Anlagen z.B. ein Volumen von rund 100 L seit dem Ende des vorherigen Wärmepumpenbetriebes gezapft, so beträgt die Laufzeit der Wärmepumpe bei diesen Anlagen üblicherweise 3,5 bis 4 Stunden. Abweichung von der Korrelation treten in den Wärmepumpenbetriebszyklen auf, bei denen der Speicher in der vorherigen Wärmepumpenbetriebsphase über den Standard-Sollwert erwärmt wurde (Legionellenschaltung) oder der betrachtete Wärmepumpenbetrieb vor Erreichen des Sollwertes durch das Ende des „Standardmodus“ beendet wird. Zudem verkürzt der Einsatz des Heizstabes die Wärmepumpenlaufzeiten.

Ergänzend zu den Wärmepumpenlaufzeiten ist in den vier Grafiken die Temperatur in unterschiedlichen Speicherhöhen zu Beginn jeder Wärmepumpenbetriebsphase 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 Wärmepumpenbetriebsphase gezapft wurde, aufgetragen. In den Grafiken lassen sich u.a. erkennen, wie weit der 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 Wärmepumpenbetriebes ist und inwiefern der obere Speicherbereich noch im Solltemperaturbereich liegt. Bei den Anlagen mit zeitlich eingeschränkt aktivierten „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 Wärmepumpenbetriebsphase mit einem niedrigen und damit günstigen Temperaturniveau auf der Wärmesenkenseite.

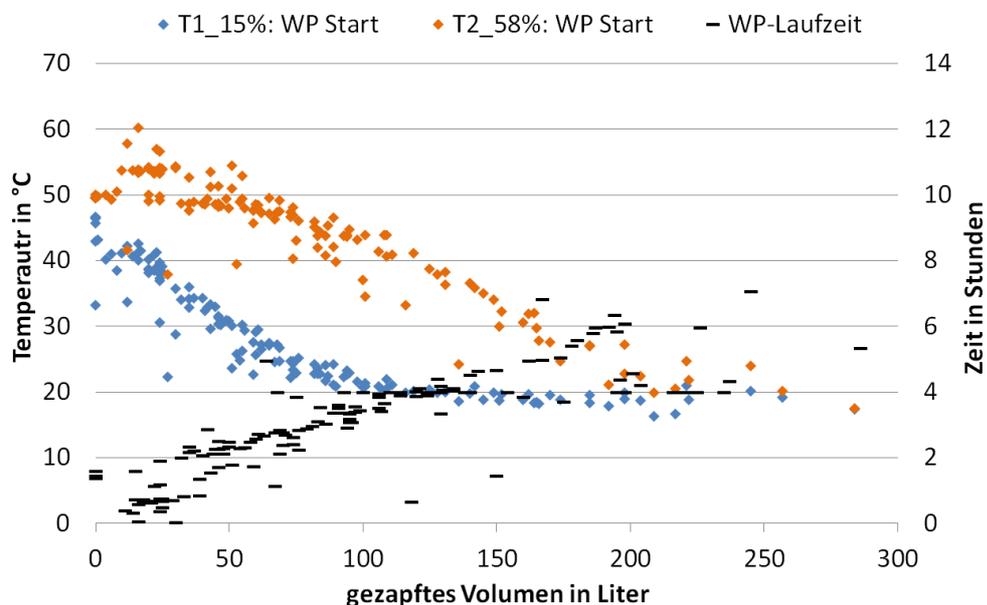


Abbildung 23: Anlage 1: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe¹

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

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

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.

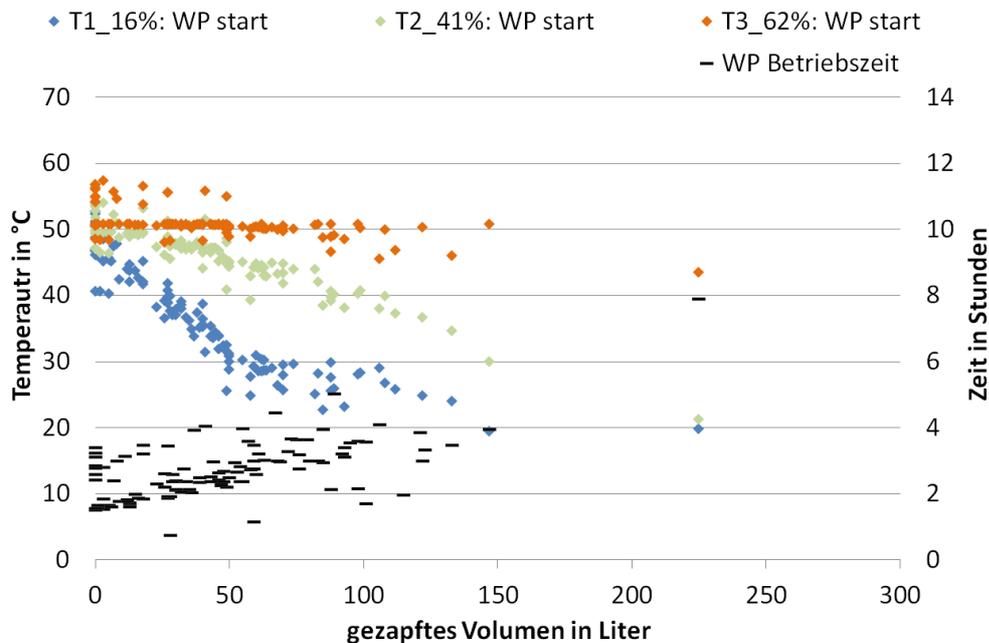


Abbildung 24: Anlage 2: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe¹

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

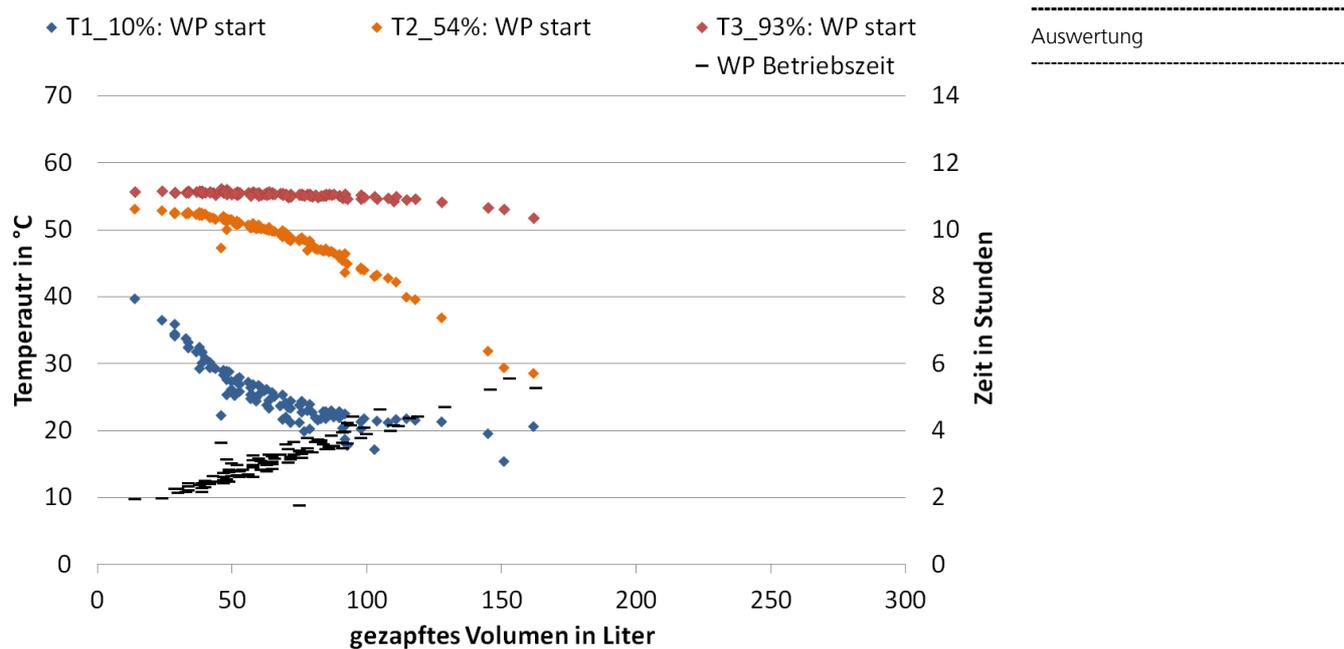


Abbildung 25: Anlage 3: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe¹

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.

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

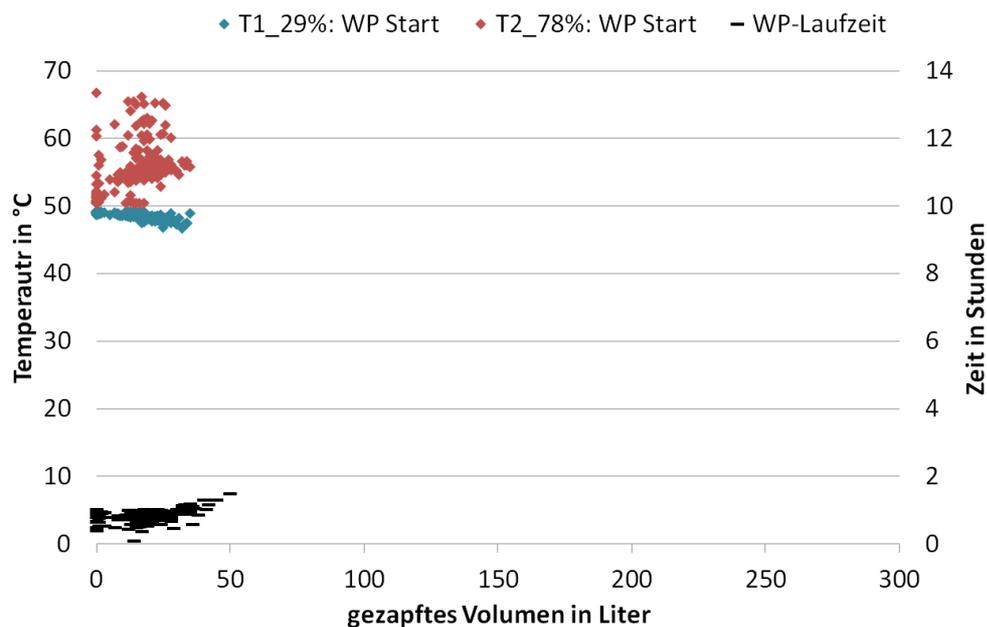


Abbildung 26: Anlage 4: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe¹

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.

4.2.3 Speicherverluste

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse der Speicherverluste der Anlage 1 vorgestellt. Während der Auswertungsperiode (drei Wärmepumpenbetriebszyklen in Reihe; Dauer jeweils 23,9 h) liegt die mittlere oberflächengewichtete Speichertemperatur ($TS_{12,avg,surf*}$) bei 50,7 °C und die mittlere Raumtemperatur bei 24,5 °C. Bei diesen Randbedingungen ist eine mittlere elektrische Leistungsaufnahme $P_{stand-by}$ von 31 W erforderlich, um die Speicherverluste auszugleichen. 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

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

rund 150 L/Tag gezapft werden, betragen die Verluste geschätzt nicht mehr als ein Viertel der Nutzenergie.

Ergänzend wird ein fiktiver $\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$ entsprechend der folgenden Formel ermittelt:

$$\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}} = \frac{Q_{\text{Zapf}} + Q_{\text{Verluste,est}}}{E_{\text{Verdichter}} + E_{\text{Ventilator}} + E_{\text{Steuerung}}} \quad (8)$$

$\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$ schätzt die Effizienz allein der Wärmepumpe ab und bezieht sich somit auf die "fiktive" (hier nicht direkt messbare) Bilanzgrenze beim Wärmeübergang von Kondensator zu Speicher. Wie oben ausgeführt, ist die verwendete Methode zur Ermittlung der Speicherverluste mit nicht unerheblichen Unsicherheiten verbunden. Dies sollte stets berücksichtigt werden wenn die in Abbildung 27 dargestellten Ergebnisse bewerten werden. Die in der Abbildung erkennbaren Unterschiede zwischen $\text{COP}_{\text{Anlage,Zyklus}}$ (ausgefüllte Rechtecke) und $\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$ (umrandete Rechtecke) verdeutlichen einmal mehr den Einfluss der Speicherverluste.

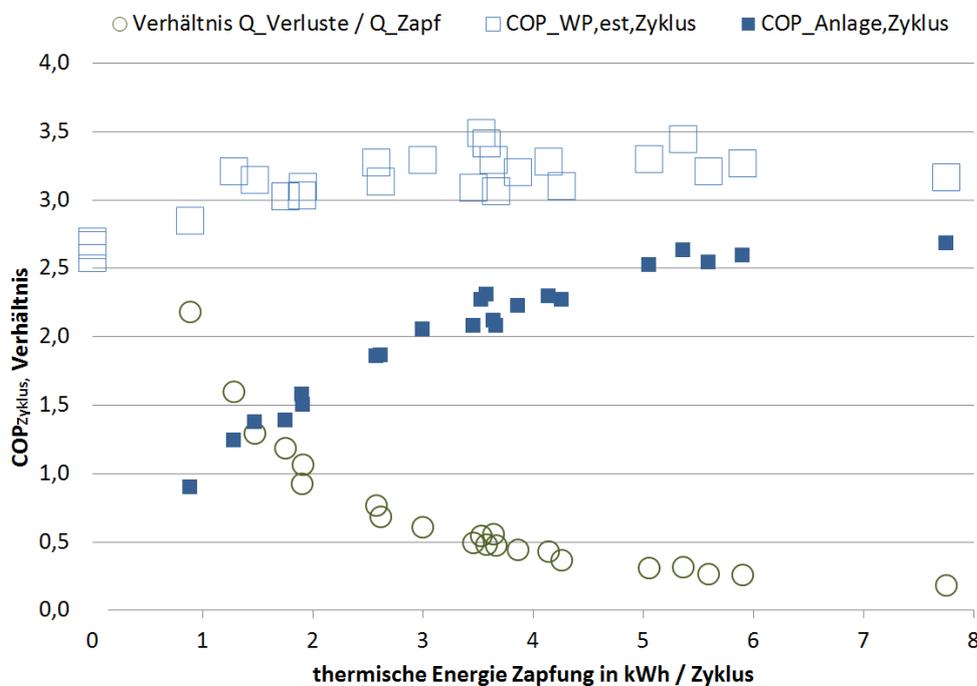


Abbildung 27: $\text{COP}_{\text{Anlage,Zyklus}}$ und $\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$ je Wärmepumpenzyklus (Ende Wärmepumpenbetrieb bis Ende folgender Wärmepumpenbetrieb; Zyklendauer 23h ... 25h ohne Betrieb des Heizstabes)

Die Effizienz der Wärmepumpe alleine ($\text{COP}_{\text{WP,est,Zyklus}}$) liegt im Bereich von 3,0 und 3,5; 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" zeitweise günstigere Temperaturbedingungen an der Wärmesenkenseite.

4.2.4 Legionellenschaltung

Bei drei der untersuchten Anlagen ist eine Legionellenschaltung freigegeben und der Speicher wird einmal die Woche auf 65 °C (Anlage 1 und Anlage 2) bzw. 67.5 °C 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)

Anlage 1

Im Messzeitraum 2016/2007 wird die Legionellenschaltung jeden Montag um 11:40 gestartet. Der Heizstab erwärmt den Speicher auf 65 °C. Da bei dieser Anlage das Zeitfenster des „Standardmodus“ häufiger verändert wurde, werden für zwei Zeiträume exemplarisch betrachtet. 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 19). 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 in Betrieb. 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.

Im Dezember 2016 wurde das Zeitfenster des „Standardmodus“ in die Nacht verlegt und es 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 vor 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 einer direkt an das Ende des Wärmepumpenbetriebes anschließenden Legionellenschaltung.

Im Zuge der Optimierungsmaßnahmen (siehe Kapitel 4.4). wurden das Zeitfenster für den Wärmepumpenbetrieb und der Beginn der Legionellenschaltung Im Januar 2018 aufeinander angepasst. So wurde das Zeitfenster für den „Standardmodus“ auf 09:00 bis 15:00 gelegt. In der Regel war der Speicher nach 4 Stunden vollständig beladen. Die Legionellenschaltung wurde ab 14:00 aktiviert.

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 Legionellenschaltung¹. Zu Beginn der Legionellenschaltung ist die Wärmepumpe ebenso wie der Heizstab in Betrieb; genauer gesagt startet die Wärmepumpe zwei 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 der Legionellenschaltung auf der Hand. Der Heizstab arbeitet während die Speichertemperatur in einem Bereich liegt, welcher von dieser Wärmepumpe auch bedient wird. Zudem ist kein Grund offensichtlich, weshalb der Speicher schnell erwärmt werden müsste.

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.

Im Zuge der Optimierungsmaßnahmen (siehe Kapitel 4.4) wurde mit Beginn des Jahres 2018 der Heizstab für die Legionellenschaltung und im „Standardmodus“ deaktiviert.

Anlage 4

Bei Anlage 4 wird die Legionellenschaltung alle 160 Stunden (6 Tage und 16 Stunden) aktiviert. Im Messjahr 2016/2017 erwärmt der Heizstab den Speicher im Schnitt um 12 K auf 66,5°C (TS2_54%). Die Wärmepumpe ist i.d.R. nicht zeitgleich in Betrieb. Der Energiebezug des Heizstabes liegt im Bereich von 2,1 kWh bis 3,3 kWh; abhängig von der Speichertemperatur beim Start des Heizstabbetriebes. Da bis in den Januar 2018 der „Standardmodus“ durchgehen 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 2). 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.

4.2.5 Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung

Im Auswertungszeitraum 2016/2017 ist der Heizstab bei zwei der vier Anlagen (Anlage 2 und Anlage 3) auch außerhalb der Legionellenschaltung in Betrieb. In Anlage 1 ist der Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung deaktiviert. Ob bei Anlage 4 der Heizstab außerhalb der Legionellenschaltung deaktiviert ist oder lediglich die Einschaltbedingungen nie unterschritten werden, ist nicht bekannt. Im Rahmen der 2018 durchgeführten Änderungen an der Anlagenreglung bei Anlage 1, 2 und 3 wurden auch Regelungsparameter hinsichtlich des Heizstabbetriebes verändert.

¹ in wenigen Fällen ist der zeitliche Abstand etwas kürzer oder länger als hier angegeben.

Anlage 1

Auswertung

Der Heizstab war zunächst außerhalb der Legionellenschaltung deaktiviert. Bei Änderungen der Regelung am 19.01.2018 wurde versehentlich der Heizstab im „Standardmodus“ freigegeben. Der Heizstab wurde zeitgleich mit der Wärmepumpe betrieben. Nachdem diese Fehleinstellung aufgefallen war, wurde der Heizstab am 14.04.18 wieder deaktiviert.

Anlage 2

Im Auswertungszeitraum 2016/2017 wird der Heizstab außerhalb der Legionellenschaltung selten, an weniger als 10% der Tage, genutzt. Der Betrieb des Heizstabes startet in Situationen, in denen 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). Der Heizstabbetrieb endet, wenn die Speichertemperatur auf 3 K über den Wärmepumpensollwert angestiegen ist. Der elektrische Energiebezug hierfür beträgt weniger als 1 % des Gesamtenergiebezuges der Anlage während des (vor der Deaktivierung des Heizstabes am 1.1.2018) Auswertungszeitraumes.

Anlage 3

Im Auswertungszeitraum 2016/2017 ist der Heizstab bei der Anlage 3 täglich - meist für einen kurzen Zeitraum von 12 bis 18 Minuten und an wenigen Tagen länger - in Betrieb. Zum Hintergrund: Die Wärmepumpe startet täglich mit Beginn des „Standardmodus“ um 21:15 (bzw. 22:15 nach der Zeitumstellung Ende Oktober) und ist für 1,7 bis 6,9 Stunden in Betrieb bis der Speicher auf 54 °C im unteren Bereich (TS1_10 %) und 60 °C im oberen Bereich (TS3_93 %) erwärmt wurde. An rund der Hälfte der Tage lag die Laufzeit der Wärmepumpe unter 3 Stunden und zu rund 90 % unter 5 Stunden. Der Heizstab wird stets 5 Stunden nach dem Beginn des „Standardmodus“ eingeschaltet und erwärmt den Speicher auf 59,9 °C im mittleren Bereich (TS2_54 %) und 61,6 °C im oberen Bereich (TS3_93 %). Wenn der Wärmepumpenbetrieb - wie an den meisten Tagen - vorher endet, bedeutet dies im Mittel eine Erwärmung 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.

Im Zuge der Optimierungsmaßnahmen (siehe 4.4) wurde der Heizstab bei dieser Anlage deaktiviert.

4.2.6 Elektrische, thermische Energie und Anlageneffizienz

4.2.6.1 Bilanz der Auswertungsperiode August 2016 bis September 2017

Im folgenden Abschnitt wird die Anlagen-Arbeitszahl der vier Anlagen jeweils über den Auswertungszeitraum August 2016 bis September 2017 ermittelt, gegenübergestellt und in den Kontext der oben untersuchten Einflussfaktoren gesetzt.

Der Einfluss der Optimierungsmaßnahmen auf die Effizienz der Anlagen wird in Kapitel 4.4 gesondert untersucht.

Zur Berechnung der geschätzten Speicherverluste wird für alle Anlagen 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 Diagramm angegebenen Temperaturen ist zu beachten, dass die Sensoren nicht alle in der gleichen Höhe angeordnet sind (siehe Tabelle 1).

Anlage 1

Die Arbeitszahl der Anlage 1 beläuft sich auf 2,1, dem höchsten (besten) Wert der untersuchten Anlagen. Der Warmwasserbezug der Bewohner ist mit einem Durchschnitt von 134 Liter pro Tag deutlich höher als in den anderen drei Gebäuden. Demnach ist der Effizienz mindernde 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 Effizienz-Einflussfaktor, 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 18% am Gesamtenergiebezug der Anlage.

Anlage 2

Bei Anlage 2 ergibt sich für den Auswertungszeitraum eine Arbeitszahl von 1,4. Die im Vergleich zu Anlage 1 deutlich geringere 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 in der gleichen Größenordnung wie 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 7 % der geringste unter den untersuchten vier Anlagen ohne PV-orientierten Betrieb.

Anlage 3

Bei Anlage 3 ergibt sich eine Arbeitszahl von 1,4. Im Mittel liegt das tägliche Zapfvolumen mit 67 Liter pro Tag bei rund der Hälfte von Anlage 1 und rund 30 % über dem von Anlage 2. Damit haben die Speicherverluste einen ähnlich negativen Einfluss auf die Anlageneffizienz wie bei Anlage 2. Neben dem Nutzerverhalten unterscheidet sich Anlage 3 noch in drei weiteren Punkten von Anlage 1. Der Speicher wird auf rund 5 K höhere Temperaturen erwärmt, es ist keine Legionellenschaltung aktiviert und der Heizstab wird (unnötiger Weise) betrieben. Der erste Aspekt wirkt sich mindernd auf die Anlageneffizienz aus, der zweite Punkt verbessernd. Der Anteil des Energiebezuges des Heizstabes liegt bei 12 % des gesamten Energiebezuges der Wärmepumpe. Dieser wird hier jedoch nicht von der Legionellenschaltung sondern einem (anscheinend überflüssigen) Heizstabbetrieb benötigt. Dies ist als dritter Punkt wiederum als Effizienz mindernd festzuhalten.

Anlage 4

Die Nutzer von Anlage 4 haben im Vergleich zu den Nutzern der anderen Anlagen den geringsten Warmwasserbedarf (durchschnittlich 47 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.

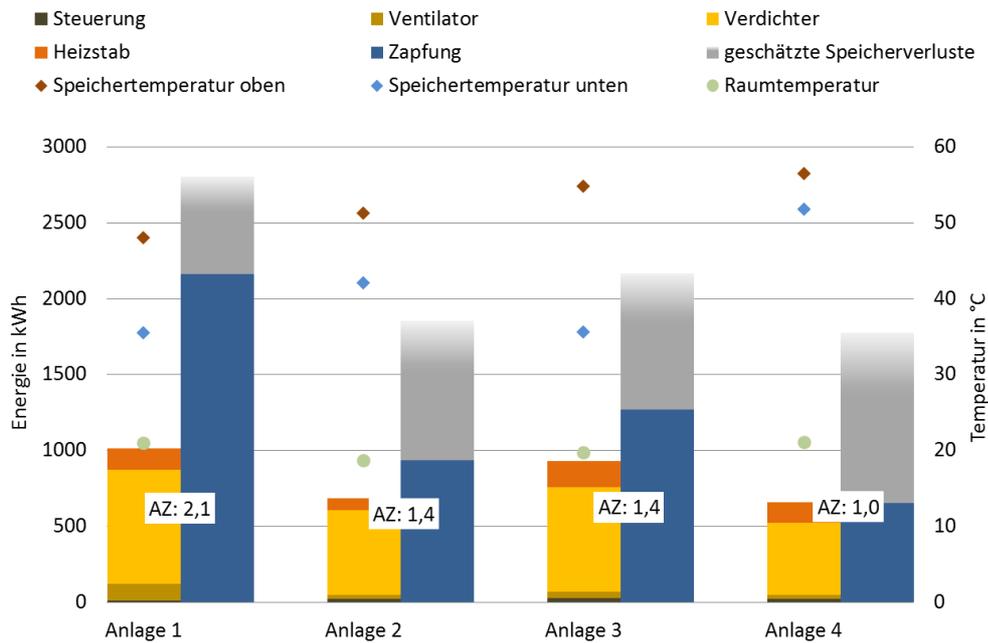


Abbildung 28: Arbeitszahl, thermische und elektrische Energie sowie mittlere Temperaturen im Zeitraum 1. August 2016 bis 31. Oktober 2018

Die nachfolgende Tabelle 6 stellt die in Abbildung 28 dargestellten Ergebnisse noch einmal in Zahlenform dar.

Tabelle 6: Energie und Arbeitszahl Auswertungszeitraum

Größe	Anlage 1		Anlage 2		Anlage 3		Anlage 4	
Heizstab Energie in kWh	141	14%	79	12%	175	19%	135	20%
Ventilator Energie in kWh	113	11%	23	3%	45	5%	24	4%
Steuerung Energie in kWh	11	1%	23	3%	26	3%	24	4%
Verdichter Energie in kWh	747	74%	559	82%	685	74%	474	72%
TW Zapfung Energie in kWh	2160		935		1268		652	
Arbeitszahl	2,1		1,4		1,4		1,0	

4.2.6.2 Wöchentliche Arbeitszahlen

In diesem Abschnitt wird auf die wöchentlichen Arbeitszahlen eingegangen. Der Auswertungszeitraum erstreckt sich über den gesamten Messzeitraum vom 1.8.1016 bis zum 31.10.1018. Die wöchentliche Arbeitszahl berechnet sich nach folgender Formel:

$$AZ_w = \frac{Q_{Zapf_w}}{E_{WP_{ges_w}}} \quad (9)$$

mit:

Q_{Zapf_w} : Energie des gezapften Warmwassers in der betrachteten Woche

$E_{\text{WP}_{\text{ges}_w}}$: Von der Wärmepumpe aufgenommene Strommenge in der betrachteten Woche.

Auswertung

In Abbildung 29 bis Abbildung 32 sind die wöchentlichen Arbeitszahlen über der in der jeweiligen Woche gezapften Warmwassermenge aufgetragen. Der Anteil des Stromverbrauchs des Verdichters am Gesamtstromverbrauch von Verdichter und Heizstab bestimmt die Farbe des Punktes der Wochenarbeitszahl. Es ist zu beachten, dass sich der Skalenbereich sich von Grafik zu Grafik unterscheidet.

Es wird die - in Kapitel 4.2.3 erläuterte - Abhängigkeit der Arbeitszahl der Anlagen von der gezapften Warmwassermenge deutlich. Einen weiteren Einfluss auf die wöchentliche Arbeitszahl hat die Art und Weise wie das Wasser erwärmt wurde. Je höher der Anteil des Heizstabes umso niedriger die wöchentlichen Arbeitszahl. Dies wird gut bei Anlage 1 und Anlage 2 sichtbar. Bei der Anlage 3 scheint das Paradoxon aufzutreten, dass die Reduzierung des Heizstabeinsatzes mit einer Minderung der Anlageneffizienz einhergeht. Die Minderung der Arbeitszahl ist jedoch auf die - zeitgleich mit der Deaktivierung des Heizstabes umgesetzte - Erhöhung der Speichersolltemperatur von 60 °C auf 65 °C zurückzuführen.

Die Varianz der Arbeitszahlen bei gleichem Zapfvolumen und gleichem Heizstabeinsatz bei ein und derselben Anlage sind auf unterschiedliche Effekte zurückzuführen:

- Der Speicherladezustand zu Beginn und Ende der Woche kann unterschiedlich sein. Diese Unterschiede wirken sich jedoch nur bei geringen Zapfvolumen aus.
- Unterschiede der Raumtemperatur im Jahresgang. Bei einer Änderung der Wärmequellentemperatur (Raumlufttemperatur) ändert sich der COP der Wärmepumpe um 1 bis 2 % je K.
- Unterschiede der Frischwassertemperatur im Jahresgang.
- Änderungen der Reglereinstellungen (Betriebszeitfenster, Sollwerte)

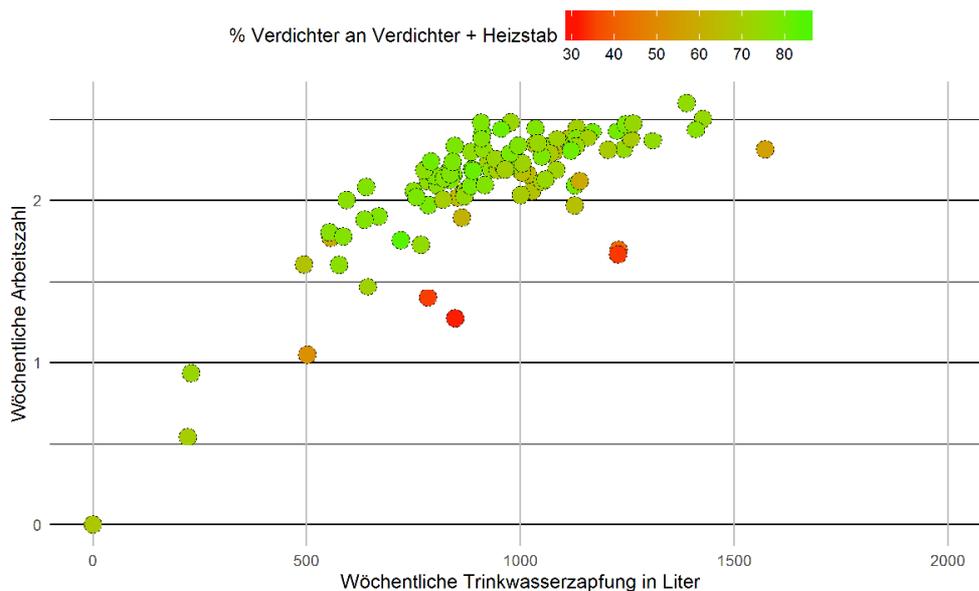


Abbildung 29: Anlage 1 wöchentliche Arbeitszahl

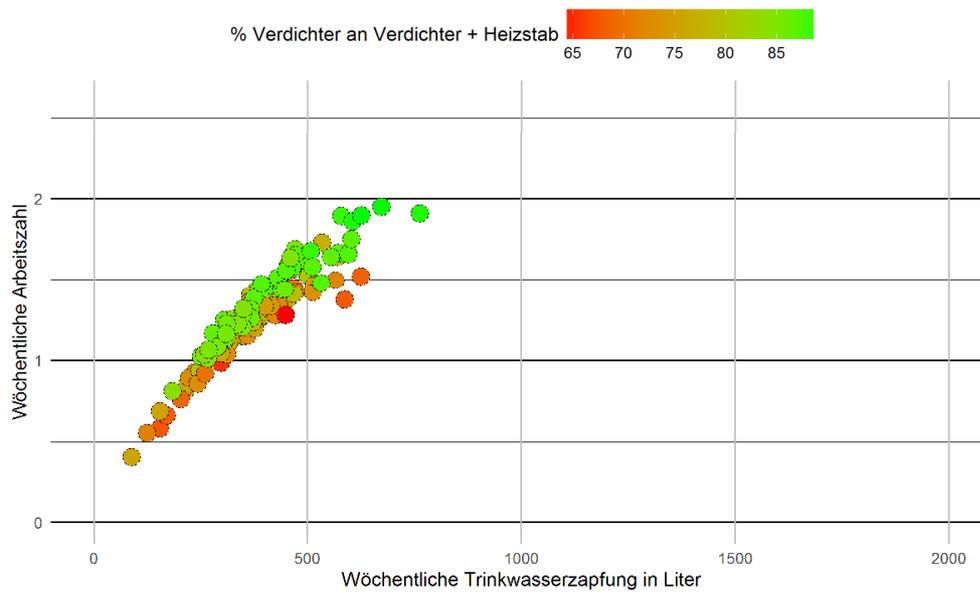


Abbildung 30: Anlage 2 wöchentliche Arbeitszahl

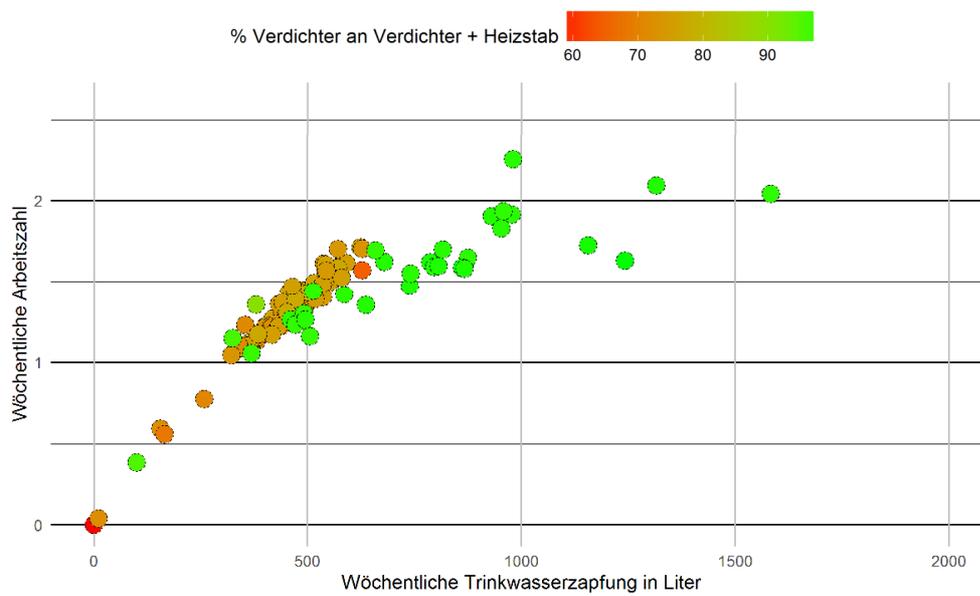


Abbildung 31: Anlage 3 wöchentliche Arbeitszahl

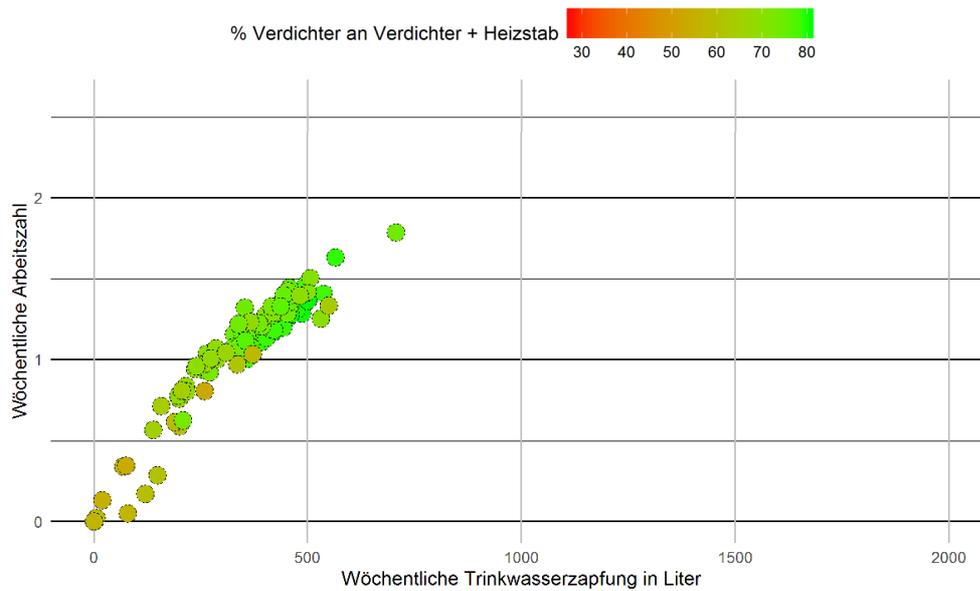


Abbildung 32: Anlage 4 wöchentliche Arbeitszahl

4.3 Betriebsverhalten und Effizienz Anlage 5

Bei der Anlage 5 sind mehr Betriebsmodi der Wärmepumpe bzw. des Heizstabes freigeschaltet als bei den anderen Anlagen; z.B. ist hier ein „PV-orientierter“ Betrieb realisiert. Somit lassen sich die Einflüsse der unterschiedlichen Wärmepumpen- bzw. Heizstab-„Betriebsgründe“ nicht so gut getrennt betrachten wie bei den o.g. Anlagen. Daher erfolgt hier eine andere Gliederung der Auswertung.

Aufgrund der Komplexität des Betriebsverhaltens dieser Anlage werden hier die „Betriebsereignisse“ der Wärmepumpen bzw. des Heizstabes nicht den „Betriebsgründen“ einwandfrei zugeordnet, da dies mit im Projekt nicht abgebildeten Zusatzaufwand verbunden wäre. Die in den folgenden Kapiteln aufgeführten Ergebnisse der „Betriebsmodi abhängigen Betriebsereignisse“ beruhen daher nicht auf einer allumfassenden Auswertung aller Events des jeweiligen Betriebsmodus, sondern entstammen vielmehr einer „manuellen“ exemplarischen Auswahl.

Tabelle 7: Regelungsparameter der Anlagen 5

Auswertung

Anlage	5
Position des Regelungssensors (in % der Speicherhöhe über Speicherboden)	~ 55 %
Standardmodus (Zeitfenster Sollwert & Hysterese)	durchgehend 55 °C; +1K & -3 K
Position des Heizstabes (Volumen oberhalb des Heizstabes)	~ 186 L (63 % of $V_{storage}$)
Legionellenschaltung (Zieltemperatur, Häufigkeit)	WP: 64 °C (TS1_55 %) & Heizstab: 73 °C (TS2_88 %), gehalten bis WP aus ⁽¹⁾ ; einmal in der Woche; rund alle 7d 4h
Heizstabbetrieb zusätzlich zum Legionellenschaltung (Einschaltwert / Ausschaltwert)	40 °C (TS1_55 %) / nicht bekannt ⁽²⁾ ;
„PV-Betrieb“	WP: wie im Standardmodus Heizstab: 55 °C +/-1 K (TS1_55 %) & 74 °C (TS2_88 %),

(1) aufgeführte Angaben aus Messdaten abgeleitet; Datenblatt-Angaben: WP & Heizstab: 62 °C, anschl. nur Heizstab: 65 °C?

(2) Ausschaltkriterium ist aus Messwerten nicht definitiv ersichtlich; siehe Erläuterungen im Text

4.3.1 Betriebsmodi

In

Tabelle 2 und Tabelle 7 sind die zentralen Kennwerte des Anlagendesigns und der Regelungsparameter der Anlage 5 aufgeführt und im Folgenden wird das bei dieser Anlage realisierte Regelungskonzept kurz erläutert. Die Informationen entstammen dem Datenblatt, soweit sich diese anhand der aus den Messdaten ersichtlichen Betriebsverhaltens bestätigen lassen. Sollte es Unterschiede geben, so wird das aus der Analyse des Anlagenbetriebes abgeleitete Konzept vorgestellt.

- „Standardmodus“ Wärmepumpe:

Der Sollwert der Speichertemperatur für den Wärmepumpenbetrieb ist im Laufe des Tages konstant (55 °C; +1 K & -3 K). Als Regelungssensor wird ein Sensor in Höhe von TS1_55 % verwendet.

- „Standardmodus“ Heizstab (außerhalb der „Legionellenschaltung“ und außerhalb des „PV-Modus“):

Der Heizstab wird eingeschaltet, wenn die Temperatur in Höhe von TS1_55 % unter 40 °C sinkt. Bei vielen der Heizstabbetriebe, die von niedrigen Speichertemperaturen ausgelöst wurden, endet der

Heizstabbetrieb, wenn das Einschaltkriterium wieder überschritten wurde. Teils läuft der Heizstab länger (ob dies aus einer Überschneidung mit einem anderen Modus oder einem zweiten Ausschaltkriterium begründet ist, war nicht ersichtlich)

- „Legionellenschaltung“

Wärmepumpen und Heizstab starten zeitgleich zu Beginn der Legionellenschaltung, die einmal pro Woche (rund alle 7d & 4h) aktiviert wird. Die Wärmepumpe erwärmt den Speicher auf 64 °C (TS1_55 %) und der Heizstab bis 74 °C (TS2_88). Der Heizstab bleibt so lange in Betrieb bis auch der Wärmepumpenbetrieb abgeschlossen ist.

- „PV-Modus¹“

Im PV-Modus ist für die Wärmepumpe das gleiche Regelungskonzept und die gleichen Sollwerte eingestellt wie im „Standardmodus“. Der Heizstab geht im „PV-Modus“ ebenfalls in Betrieb: Der Sollwert ist identisch, die Hysterese kleiner (+/- 1 K). Zudem wird der Heizstab mittels des Regelungsthermostates des Heizstabes geregelt und taktet bei TS2_88 % bei 73 °C solange die zuvor genannten Betriebskriterien erfüllt sind.

4.3.2 Betriebsverhalten Wärmepumpe und Heizstab

Das Rasterdiagramm in Abbildung 33 zeigt den täglichen Verlauf des alleinigen Wärmepumpenbetriebes (grün), des alleinigen Heizstabbetriebes (gelb) sowie des zeitgleichen Betriebs von Wärmepumpe und Heizstab (rot) während der Auswertungsperiode von August 2016 bis Oktober 2018.

Zum Verständnis des Betriebsverhaltens ist zum einen die Kenntnis des Regelungskonzeptes (siehe vorheriges Kapitel 4.3.1) als auch des Zapfverhaltens (siehe Kapitel 4.1.1) hilfreich. Die Bewohner zapfen im Mittel rund 190 Liter pro Tag (und damit weit mehr als die Bewohner in den anderen Gebäuden). Knapp die Hälfte der täglichen Zapfungen erfolgt vor 10:00.

Die Wärmepumpe startet täglich zwischen im Laufe des Morgens/Vormittags, wenn der Einschaltwert von 52 °C in der Speichermitte unterschritten ist, und ist dann für einige Stunden in Betrieb. Teilweise ist der Betrieb nicht durchgehend, sondern es stellt sich ein taktendes Betriebsverhalten ein mit Laufzeitpausen von rund 5 min; in Abbildung 33 erkennbar als kurzer Wechsel von grün / weiß bzw. gelb / rot (die Erklärung dafür erfolgt weiter unten im Text im Zusammenhang mit dem PV-Betrieb). An vielen Tagen wird der Sollwert erneut am Abend / in der Nacht unterschritten, so dass die Wärmepumpe erneut den Speicher auf 55 °C bei TS1_55 % erwärmt.

Die Legionellenschaltung, während der die Wärmepumpen den Speicher auf 64 °C (TS1_55 %) und der Heizstab bis 74 °C (TS2_88 %) erwärmt, dauert i.d.R. gut 2,0 bis

¹ Bei der untersichten Anlage wird das PV-Signal an der Wärmepumpe aktiviert, sobald der Strom von der PV-Anlage des Gebäudes einen Wert von 3 Ampere übersteigt.

2,5 Stunden. Der Energiebezug des Heizstabes liegt üblicherweise in der Größenordnung von rund 3 kWh.

Auswertung

Der Heizstab geht an knapp der Hälfte der Tage im Auswertungszeitraum aufgrund von „niedrigen“ Speichertemperaturen im mittleren Speicherbereich ($TS_{1,55} \% < 40 \text{ °C}$) in Betrieb, sofern seit dem letzten Wärmepumpenbetrieb Zapfungen mit einem entsprechend hohen Gesamtvolumen auftraten. Betrachtet man das Zapfverhalten der Nutzer so liegt nahe, dass dieser Heizstabbetrieb nicht notwendig wäre. Der Energieinhalt bzw. die Temperatur im oberen Speicherbereich sollten vermutlich ausreichen um die Zeit der Erwärmung mittels der Wärmepumpe zu überbrücken.

Bei vielen dieser Heizstabbetriebe endet der Heizstabbetrieb, wenn das Einschaltkriterium wieder überschritten wurde. Die Laufzeit liegt dann üblicherweise im Bereich von 1 Stunde bis 3 Stunden (geringere und längere Laufzeiten treten seltener auf); abhängig von der Speichertemperatur beim Start und möglicher Zapfungen während der Betriebszeit. Der Energiebezug liegt im Bereich von 1,5 kWh bis 4 kWh. In wenigen Fällen läuft der Heizstab auch noch dann, wenn die Einschalttemperatur bereits wieder überschritten wurde. Ob dies aus einer Überschneidung mit einem anderen Modus oder einem zweiten Ausschaltkriterium begründet ist, wurde nicht untersucht.

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, ist das Betriebskonzept für die Wärmepumpen während ein „PV-Signal“ anliegt identisch zu dem Standardbetrieb. Daher wirkt sich das Signal nicht verlängernd auf den Wärmepumpenbetrieb aus. Vielmehr kann die Laufzeit der Wärmepumpe ggf. durch den zeitgleichen Betrieb des Heizstabes gegenüber dem „Standardbetrieb“ etwas eingeschränkt werden. Der Umfang der Laufzeitreduzierung (und damit dem Betrag der Wärmepumpe an der Speichererwärmung) ist abhängig von der Temperatur im oberen Speicherbereich bei Start des Heizstabes und damit nur von Relevanz, wenn die dortige Temperatur (deutlich) unter dem Ausschaltwert der Wärmepumpe liegt. Das PV-Signal scheint bei der Wärmepumpe einen taktenden Betrieb zu verursachen (Beschreibung siehe oben), da das Takten im Zusammenhang mit Änderungen des PV-Signales aufzutreten scheint. Eine genauere Analyse müsste diese These prüfen. Weshalb der Signalwechsel ein Takten verursacht sollte, ist nicht offensichtlich, da sich die Wärmepumpe „im normalen Speicheraufwärmbetrieb befindet“ ($TS_{1,55} \% < (T_{\text{soll}} + dt)$), wenn es auftritt. Wie oben beschrieben ist der Heizstab im PV-Modus ebenfalls in Betrieb, wenn die mittlere Speichertemperatur unter 55 °C ($\pm 1 \text{ k}$) und die obere Temperatur unter 73 °C liegt. Der Heizstabbetrieb, der durch „niedrige“ Speichertemperaturen ausgelöst wird (siehe oben), fällt an den Tagen, an denen ein „PV-Signal“ anliegt, häufig in den gleichen Zeitbereich.

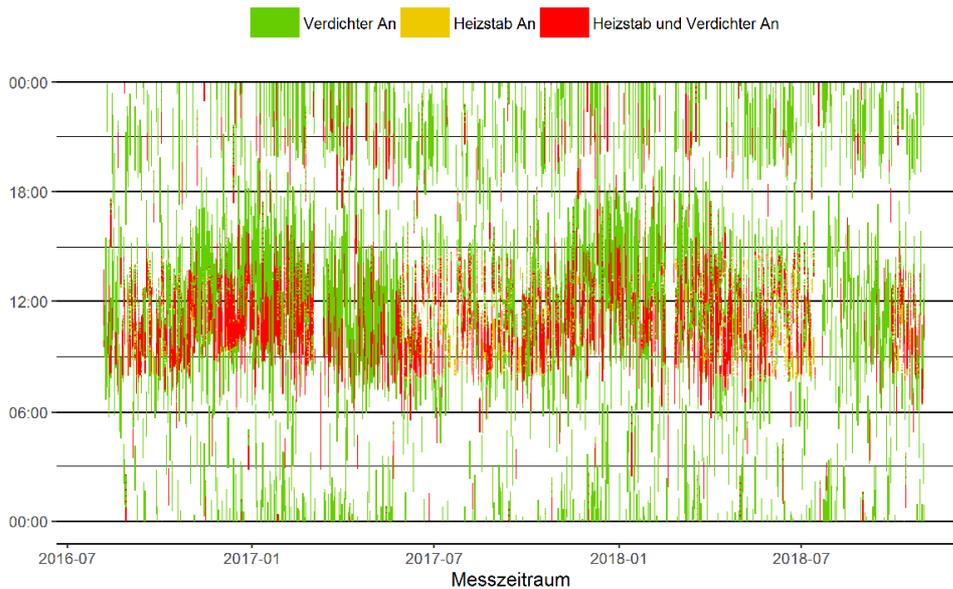


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 5

4.3.3 Elektrische, thermische Energie und Anlageneffizienz

Anlage 5 hat aufgrund des hohen Warmwasserbedarfes der Bewohner, im Mittel rund 190 Liter pro Tag und damit 30 % mehr als Anlage 1 – die Anlage mit dem höchsten Warmwasserbedarf der anderen vier Anlagen –, gute Voraussetzungen eine „hohe“ Arbeitszahl zu erreichen. Jedoch liegt die Arbeitszahl (berechnet über den Auswertungszeitraum 1.8. bis 31.10.2018) mit 1,6 unter dem Wert von Anlage 1 (2,1); siehe Abbildung 35. Der Grund für die „geringe“ Arbeitszahl ist der hohe Heizstabeinsatz dieser Anlage. Der Heizstab hat einen Anteil von 50 % am Gesamtenergiebezug der Anlage. Er ist an rund der Hälfte der Tage aufgrund der Unterschreitung des Sollwertes für dessen Betrieb (40 °C in Speichermitte) in Betrieb. Zusätzlich wird der Heizstab in Betrieb genommen, wenn das PV-Signal anliegt und der Speicher im mittleren Bereich unter 55 °C liegt. Im Gegensatz zu diesen beiden Einsatzzwecken des Heizstabes, ist der durch die Legionellenschaltung verursachte Heizstabbetrieb von geringerem Einfluss.

Auch die Auswertung der wöchentlichen Arbeitszahl (siehe Abbildung 34) zeigen deutlich den Einfluss des Heizstabeinsatzes auf die Arbeitszahl der Anlage.

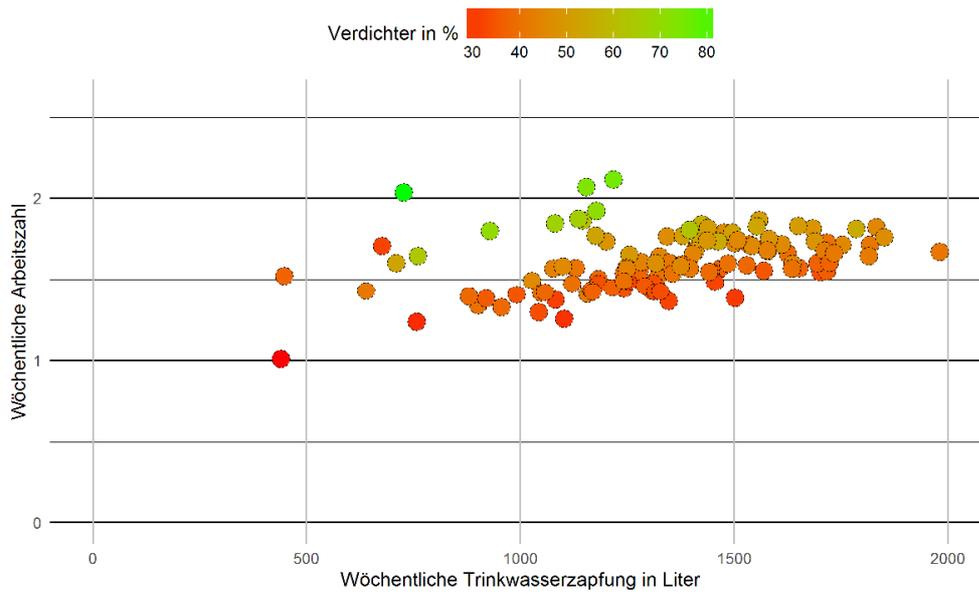


Abbildung 34: Wöchentliche Arbeitszahl der Anlage 5

4.3.4 Bilanz der Auswertungsperiode August 2016 bis Oktober 2018

Die folgende Abbildung 35 stellt die gemessenen Energiemengen, die Speicher und Raumlufttemperatur zusammenfassend für den gesamten Messzeitraum dar.

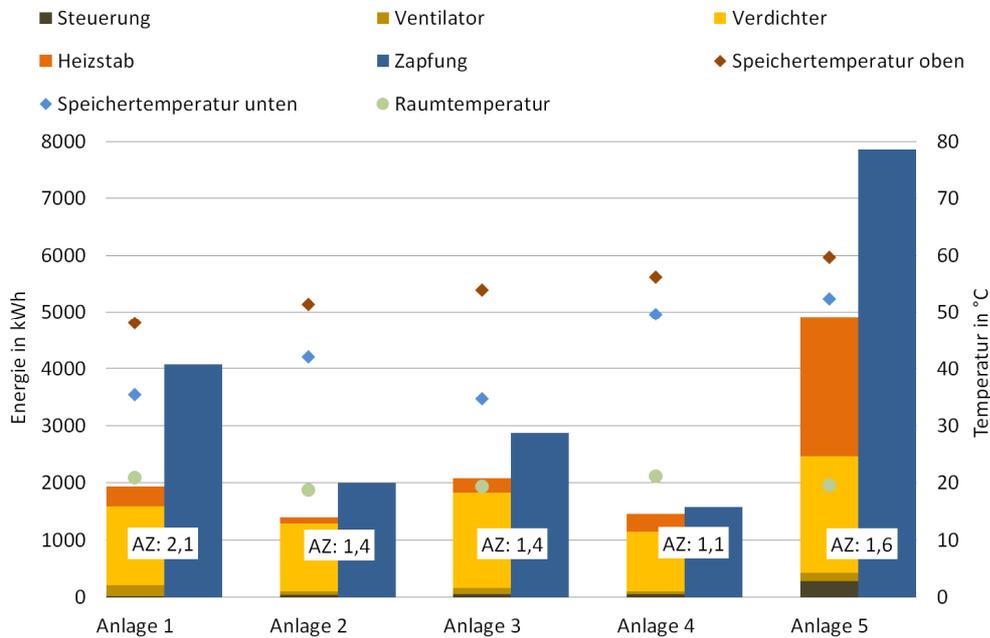


Abbildung 35: Arbeitszahl, thermische und elektrische Energie sowie mittlere Temperaturen im Zeitraum August bis 31. Oktober 2018

Die nachfolgende Tabelle 8 stellt die in Abbildung 35/Abbildung 28 dargestellten Ergebnisse noch einmal in Zahlenform dar.

Auswertung

Tabelle 8: Energie und Arbeitszahl Auswertungszeitraum

Größe	Anlage 1		Anlage 2		Anlage 3		Anlage 4		Anlage 5	
Heizstab										
Energie in kWh	354	18%	105	7%	249	12%	305	21%	2435	50%
Ventilator										
Energie in kWh	194	10%	50	4%	116	6%	53	4%	151	3%
Steuerung										
Energie in kWh	21	1%	50	4%	52	3%	53	4%	280	6%
Verdichter										
Energie in kWh	1371	71%	1196	85%	1664	80%	1041	72%	2041	42%
TW Zapfung										
Energie in kWh	4068		1994		2878		1577		7863	
Arbeitszahl	2,1		1,4		1,4		1,1		1,6	

4.4 Betriebsverhalten und Effizienz: Optimierungsmaßnahmen

Für die untersuchten Anlagen werden aus der Analyse des Anlagenbetriebes vom 1.8.2016 bis zum 31.12.18 die nachfolgend dargestellten Punkte zu einer Optimierung des Anlagenbetriebes abgeleitet.

Hinweis: Im Rahmen dieser Studie erfolgt keine Bewertung der Notwendigkeit einer Legionellenschaltung und deren Umsetzung hinsichtlich des erwärmten Volumens und eingestellter Ausschalttemperatur. Die hier getroffenen Anmerkungen zielen nur auf eine Energieeinsparung bei „gleichbleibenden Endresultat“ bzgl. der Speichertemperatur in dem in der Legionellenschaltung erwärmten Speicherbereich ab.

4.4.1 Anlage 1

Anlage 1: Empfehlungen

Bei dieser Anlage wurde von den Nutzern im Messzeitraum von 1.8.2016 bis zum 31.12.18 einige Male die tageszeitliche Lage, sowie die Dauer des „Standard-Zeitfensters“ verändert (siehe Kapitel 4.2.1). Es bedarf einer weitergehenden Analyse als es im Umfang dieser Studie möglich ist, um zu ermitteln, in wie weit sich die Anlageneffizienz bei den bisher eingestellten „Standard-Zeitfenstern“ unterscheidet. Aus den bisherigen Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten.

- Um den Komfort auch an Tagen mit hohen Zapfungen (in den meisten Fällen) zu gewährleisten, sollte das Zeitfenster für den Wärmepumpenbetrieb mind. 9 h betragen. An den sehr wenigen Tagen mit sehr hohen Zapfungen wäre die Speicherkapazität nicht ausreichend, wenn das „Standard-Zeitfenster“ so gelegen ist, dass die Zapfungen weitestgehend außerhalb dieses Zeitfensters anfallen. Sollte dies von den Nutzern nicht akzeptiert werden (oder möglicherweise durch manuelles, bedarfsabhängiges Ändern des Betriebsmodus oder Zuschalten des Heizstabes kompensiert werden), könnte das Zeitfenster so gewählt werden, dass es ein zeitliches Überlappen mit den Hauptzapfzeiten gibt. Hierbei würden sich jedoch meist „zusätzliche“ Wärmepumpenbetriebsphasen ergeben, die bereits nach geringen Zapfmengen starten, sollte die Hysterese nicht größer gewählt oder die höhere Position des Regelungssensors (in Speichermitte) gewählt werden.

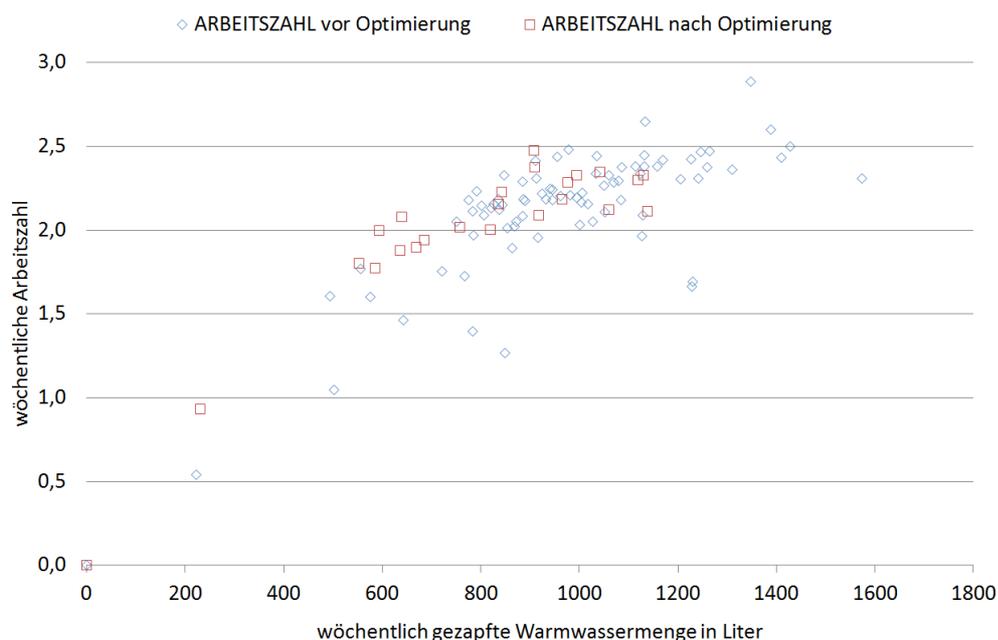
- Es wird vermutet, dass eine Erhöhung der Hysterese oder die Nutzung der höheren Position des Regelungssensors (bei einer geeigneten Wahl des „Standard-Zeitfensters“) ohne Einschränkungen des Nutzerkomforts zu leichten Effizienzverbesserungen führen kann. Deren Ausmaß lässt sich im Rahmen dieser Studie im Vorfeld nicht abschätzen.
- Aufgrund der fixen Uhrzeit des Beginns der Legionellenschaltung übernimmt der Heizstab - je nach zeitlicher Lage des „Standard-Zeitfensters“ und damit des Wärmepumpenbetriebes - einen Teil der Speichererwärmung, der auch von der Wärmepumpe bedient werden könnte (siehe Kapitel 4.2.4). Dieser Aspekt sollte bei der Wahl des „Standard-Zeitfensters“ im Blick behalten werden; jedoch ist die Abstimmung des „Standard-Zeitfensters“ alleine anhand der Zeit der Legionellenschaltung u.U. hinsichtlich der Gesamteffizienz nicht zielführend. Es wäre mit dem Hersteller zu klären, in wie weit sich durch die Änderung des Regelungsalgorithmus eine zeitflexible Legionellenschaltung realisieren ließe. Die Legionellenschaltung sollte sich an dem Wärmepumpenbetrieb orientieren und direkt nach Ende des Wärmepumpenbetriebes starten.

Anlage 1: Durchgeführte Maßnahmen

Am 19.01.18 wird der Beginn der Legionellenschaltung auf 15:00 verlegt. Das Zeitfenster für den Betrieb der Wärmepumpe reicht von 09:00 bis 15:00. Ziel ist es die Legionellenschaltung erst dann zu starten, wenn der Speicher durch die reguläre Aufheizung durch den Verdichter bereits abgeschlossen ist. Nach Rücksprache mit dem Hersteller ist es bei dieser Anlage nicht möglich den Algorithmus für die Legionellenschaltung so zu programmieren, dass die Legionellenschaltung automatisch am Ende des regulären WP-Betriebes einsetzt. Laut Aussage des Herstellers würde in einer neueren Version dieser WP die Legionellenschaltung ohnehin vom Verdichter übernommen werden.

Die Hysterese konnte nach Rücksprache mit den Bewohnern nicht verändert werden. Beim Ändern der Einstellungen ist versehentlich der Heizstab im Normalbetrieb freigegeben worden. Dies ist nach der Kontrolle der Messdaten erst am 14.04.18 aufgefallen und wurde dem Bewohner daraufhin mitgeteilt. Ab 14.04.18 sind die geänderten Einstellungen ohne Freigabe des Heizstabes im Normalbetrieb aktiv.

Anlage 1: Auswirkungen auf die Anlageneffizienz



Auswertung

Abbildung 36: Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 1

Um die Effizienz der Anlage vor und nach der Änderung vergleichen zu können, werden jeweils die Wochen-Arbeitszahlen in Zeiten annähernd gleicher Zapfmengen herangezogen. Bei diesem Bewertungsansatz werden weder der Speicherladezustand zu Beginn und zum Ende der Woche noch die Jahreszeit, die einen Einfluss auf die Raum- und Frischwassertemperatur hat, berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2.6.2)

In den Wochen mit einem Zapfvolumen geringer als 700 L liegen die Wochen-Arbeitszahlen nach Durchführung der Änderungen der Legionellenschaltung höher als zuvor. Bei höheren Zapfvolumen ist keine Änderung zu erkennen. Der Anteil des Heizstabes am Gesamtenergiebezug sinkt – sowohl in Wochen mit geringer als auch mit hoher Zapfung – im Mittel nicht bzw. nur geringfügig.

Da sich in Wochen mit einem geringen Zapfvolumen die unterschiedlichen Randbedingungen und Charakteristika der jeweiligen Zapfung und Beladung u.U. stärker auf die Effizienz des Wärmepumpenbetriebes auswirken können, lassen sich aus dieser Auswertung keine Rückschlüsse auf die Auswirkung der Änderungen der Startzeit der Legionellenschaltung ziehen.

4.4.2 Anlage 2: Empfehlungen

- Wahl des Zeitfensters des „Standard-Betriebes“, der Position des Regelungssensors sowie der Regelungshysterese für den Wärmepumpenbetrieb:

Der Nutzerkomfort konnte bei den gewählten Einstellungen eingehalten werden. Das „Standardzeitfenster“ könnte etwas früher enden, damit die Wärmepumpe nicht vereinzelt bei den morgendlichen Zapfungen in Betrieb geht (siehe Kapitel 4.2.1). Dieser Fall trat jedoch nur an wenigen Tagen auf. Der Umfang dieser Studie ermöglicht keine genaue Abschätzung der möglichen Energieeinsparungen. Es wird jedoch nur eine (sehr) geringe Verbesserung der Jahresarbeitszahl erwartet.

- Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung:

In Abstimmung mit den Bewohnern wäre eine Deaktivierung des Heizstabes zu überlegen oder eine Reduzierung des Sollwertes für den Heizstabbetrieb. Sollte kein deutlich höherer Warmwasserbedarf erwartet werden, ist der alleinige Wärmepumpenbetrieb ausreichend. Im bisherigen Messzeitraum wurde der Heizstab nur selten zur Nachheizung gestartet¹ (siehe Kapitel 4.2.1); somit wäre die Steigerung der Anlageneffizienz sehr gering. Eine Deaktivierung bzw. Reduzierung des Sollwertes vermindert somit u.U. lediglich das „potentielle Risiko“ eines unnötigen Heizstabbetriebes.

- Legionellenschaltung:

Der Anlagenbetrieb in der Legionellenschaltung zeigt einen Optimierungsbedarf (siehe Kapitel 4.2.4), der sich u.U. nur durch eine Änderung im Regelungsalgorithmus umsetzen ließe. Der Heizstab sollte nicht stets zeitgleich mit der Wärmepumpe betrieben werden. Wenn in der Legionellenschaltung die Erwärmung des Speichers bis hinab zum Kondensator gewünscht ist, so könnte der Heizstab während der Legionellenschaltung ausgeschaltet bleiben. Wenn jedoch eine Erwärmung nur des oberen Speicherbereiches erwünscht wäre, so ist der Energieaufwand für den Wärmepumpenbetrieb dem Energieaufwand für den Heizstabbetrieb (geringere Effizienz, jedoch kleineres zu erwärmendes Volumen) gegenüberzustellen. Darüber hinaus wäre mit dem Hersteller zu klären, in wie weit sich eine zeitflexible Legionellenschaltung realisieren ließe, die sich an dem regulären Wärmepumpenbetrieb orientiert und direkt mit Ende einer regulären Wärmepumpenbetriebsphase beginnt.

Anlage 2: Durchgeführte Maßnahmen

Am 01.01.2018 wird der Heizstab zur Unterstützung der Legionellenschaltung und für den Normalbetrieb deaktiviert. Das Zeitfenster für den Wärmepumpenbetrieb wurde nicht angepasst, da die hierdurch zu erwartende Effizienzverbesserung als zu gering eingeschätzt wird. Nach Rücksprache mit dem Hersteller ist es nicht möglich, die Legionellenschaltung so zu programmieren, dass diese direkt an eine normale Speicherbeladung anschließt.

¹ Zur Einhaltung der Komfortbedingungen war der Heizstabbetrieb nie notwendig. Diese wären auch ohne Heizstabbetrieb eingehalten worden.

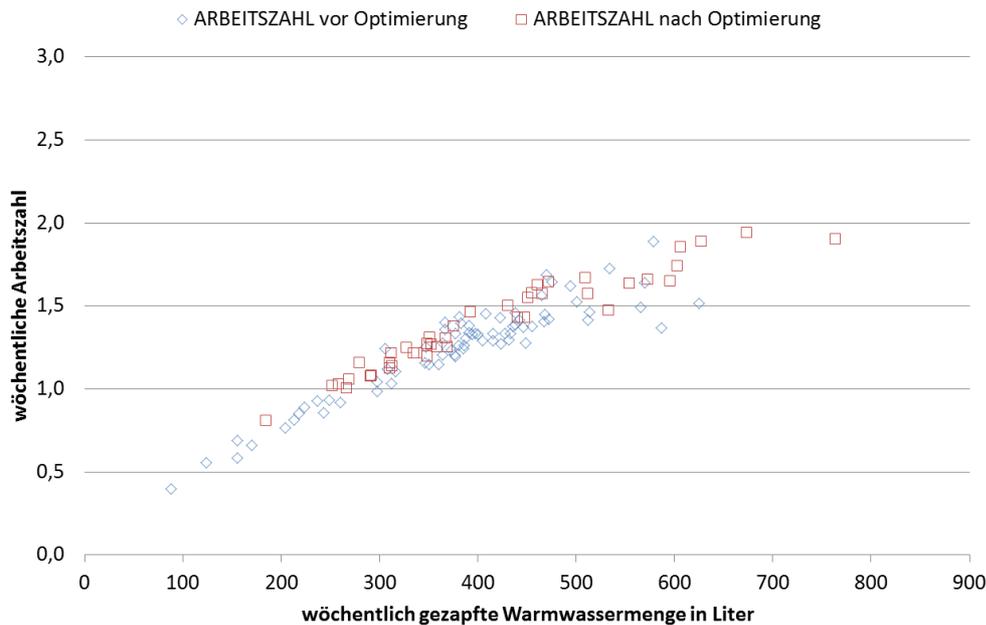


Abbildung 37 Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 2

Die durchgeführte Deaktivierung des Heizstabes bei der Legionellenschaltung und im Normalbetrieb übt einen leicht positiven Einfluss auf die Effizienz der Anlage aus. Um diese vergleichen zu können, werden jeweils Wochenwerte mit annähernd gleichen Zapfmengen herangezogen. Dabei wurde weder der Speicherladezustand zu Beginn der Woche noch die Jahreszeit, die einen Einfluss auf die Raum und Frischwassertemperatur hat, berücksichtigt. Im Schnitt stellt sich eine Verbesserung der Wochenarbeitszahl um 8 % heraus.

4.4.3 Anlage 3: Empfehlungen

- Wahl des Zeitfensters des „Standard-Betriebes“, der Position des Regelungssensors sowie der Regelungshysterese für den Wärmepumpenbetrieb:

Es besteht weder hinsichtlich des Komforts noch der Effizienz eine Notwendigkeit das „Standardzeitfenster“, die Position des Regelungssensors oder den Wert der Hysterese zu anpassen.

- Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung:

Mit dem Hersteller der Anlage ist der vermeintlich nicht notwendige tägliche Betrieb des Heizstabes zu klären (siehe Kapitel 4.2.1).

Anlage 3: Durchgeführte Maßnahmen

Auswertung

Leider war der Hersteller der Wärmepumpe für eine Rückfrage zum Heizstabbetrieb nicht zu erreichen, da dieser den Betrieb eingestellt hat. Am 24.2.2018 wurde der Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung nach Rücksprache mit dem Bewohner deaktiviert.

Im Zuge der Deaktivierung des Heizstabes wurde die Steuerung des Heizstabes im Rahmen einer Rückrufaktion ausgetauscht. Am 14.06.18 haben die Bewohner den Sollwert von 60 auf 62,5 °C angehoben. Diese Anhebung ist unabhängig von den im Rahmen dieser Studie kommunizierten Optimierungsmaßnahmen geschehen.

Anlage 3: Auswirkungen auf die Anlageneffizienz

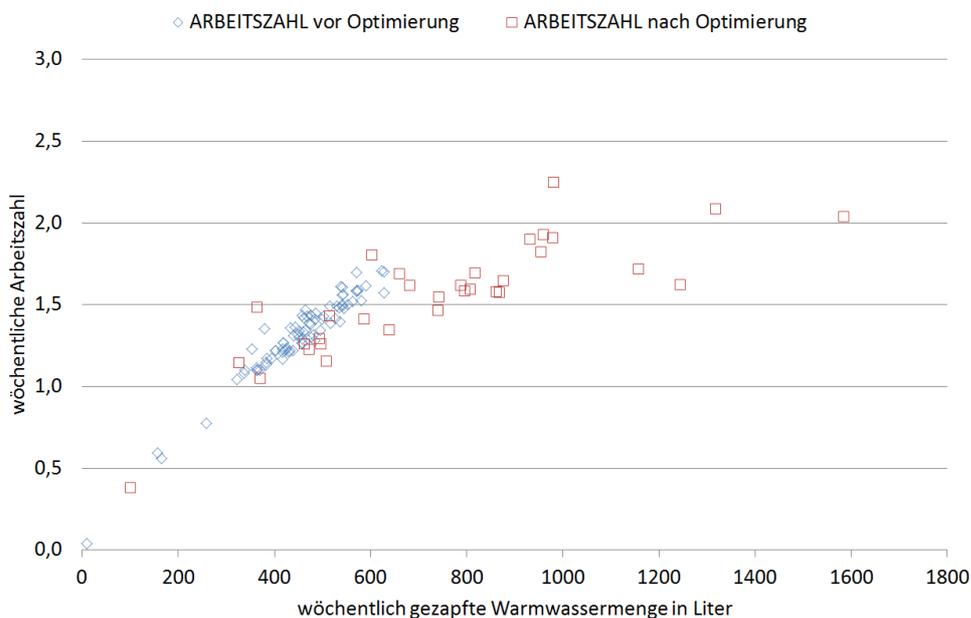


Abbildung 38: Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 3

Da neben der Optimierungsmaßnahme der Deaktivierung des Heizstabes außerhalb der Legionellenschaltung noch weitere Änderungen an der Regelung vorgenommen wurden (siehe oben), ist keine Bewertung der Auswirkung der Optimierungsmaßnahme möglich.

4.4.4 Anlage 4: Empfehlungen

- Wahl des Zeitfensters des „Standard-Betriebes“, der Position des Regelungssensors sowie der Regelungshysterese für den Wärmepumpenbetrieb:

In Anbetracht des geringen (täglichen) Zapfvolumens der Nutzer wird empfohlen, den Regelungssensor weiter oben zu positionieren, wenn dazu eine Möglichkeit am Speicher vorhanden ist. Alternativ könnte der Standardbetrieb auf ein tägliches Zeitfenster von wenigen Stunden begrenzt werden; z.B. in den nächtlichen Stunden, in denen üblicherweise nicht mehr bzw. noch nicht Warmwasser gezapft wird. Die Wärmepumpe könnte somit jeweils zu Beginn des Betriebes bei niedrigeren Senktemperaturen betrieben

werden. Der Umfang dieser Studie ermöglicht keine genaue Abschätzung der möglichen Energieeinsparungen.

Auswertung

- Legionellenschaltung:

Auch bei dieser Anlage wäre es interessant mit dem Hersteller zu klären, in wie weit sich eine zeitflexible Legionellenschaltung realisieren ließe, die sich an dem Wärmepumpenbetrieb orientiert und direkt mit Ende einer Wärmepumpenbetriebsphase beginnt.

Anlage 4: Durchgeführte Maßnahmen

Am 6.1.2018 wurde ein Betriebsfenster für den Betrieb der Wärmepumpe von 22:00 bis 06:00 festgelegt und die Einschalthysterese auf 8 K erhöht. Die Veränderung der Position des Regelungssensors war somit nicht nötig. Eine Anpassung des Regelungsalgorithmus für die Legionellenschaltung war seitens des Herstellers bei dieser Anlage nicht möglich.

Anlage 4: Auswirkungen auf die Anlageneffizienz

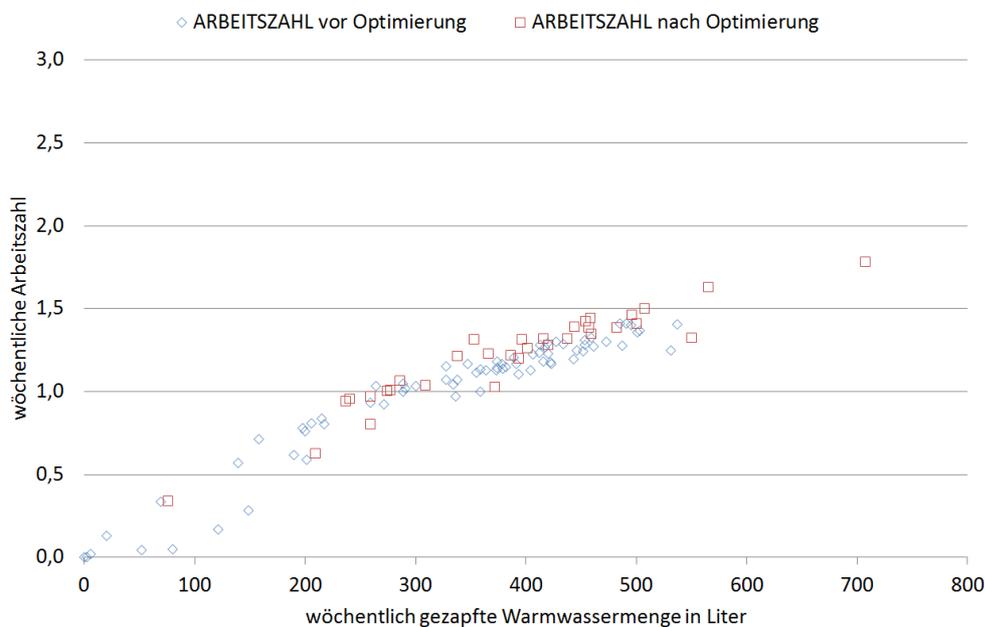
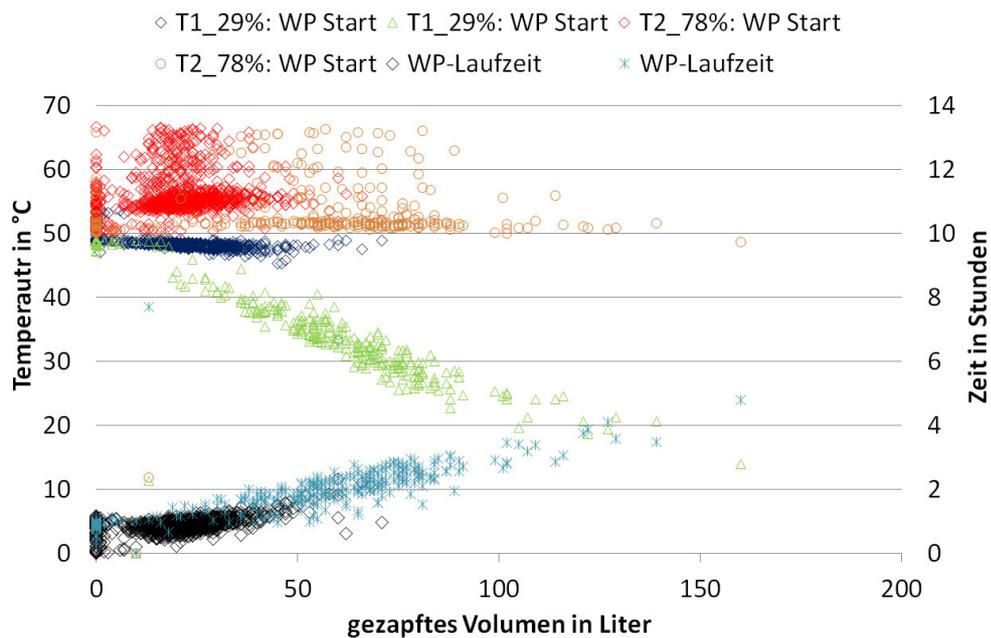


Abbildung 39: Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 4

Die durchgeführten Änderungen an den Reglereinstellungen haben einen leicht positiven Einfluss auf die Arbeitszahl. Die Änderungen bewirken, dass der Speicher in der Nacht beladen und während des Tages entladen wird. Während die Temperatur unten im Speicher zuvor nur bei größeren Zapfungen unter 48 °C gefallen ist, sinkt diese nun bis auf 10 °C ab. Die Wärmepumpe hat somit zum Beginn des Betriebes die Möglichkeit, bei günstigen Bedingungen zu laufen. Die Temperatur oben im Speicher fällt dagegen auch nach der Änderung nie unter 50 °C, so dass die Komfortgrenzen immer eingehalten werden können. Diese Zusammenhänge sind in der Nachfolgenden Abbildung 40 noch einmal dargestellt.



Auswertung

Abbildung 40 Anlage 4: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe¹ vor und nach Optimierung

Abbildung 40 zeigt die Temperatur am unteren Sensor im Speicher zu Beginn eines WP Betriebes in blau (vor der Optimierung) und in grün (nach der Optimierung). Während vor der Optimierung die Temperatur am unteren Sensor nicht unter 45 °C sinkt fällt diese nach der Optimierung auf bis zu 10 °C ab. Die Wärmepumpe hat somit die Möglichkeit einen Teil des Wassers bei niedrigen und somit für die Effizienz günstigen Bedingungen zu erwärmen. Die Speicherverluste fallen ebenfalls geringer aus da der Speicher nicht mit vollem Volumen auf der Solltemperatur gehalten wird. Die Temperatur am oberen Sensor ist in der Abbildung in rot (vor der Optimierung) und in orange (nach der Optimierung) dargestellt. Auch nach der Optimierung fällt die Temperatur auch bei Zapfungen größer 150 Liter nicht unter 45 °C. Die Komfortbedingungen konnten auch nach der Optimierung immer eingehalten werden. Die Laufzeiten eines Wärmepumpenbetriebes sind in schwarz (vor der Optimierung und in hellblau (nach der Optimierung dargestellt. Während die Laufzeit eines Wärmepumpenbetriebes vor der Optimierung i.d.R nicht länger als 60 Minuten dauerte erreicht die Laufzeit nach der Optimierung Werte von bis zu 5 Stunden. Eine längere Laufzeit bedeutet eine Reduzierung der Anfahrvorgänge der Wärmepumpe was sich ebenfalls positiv auf die Effizienz auswirkt.

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

- PV-Betrieb:

Die Bewertung des PV-Betriebes ist nicht Gegenstand dieser Studie. Jedoch legen die durchgeführten Auswertungen des Anlagenbetriebes nahe, gemeinsam mit dem Hersteller und dem Nutzer zu überdenken, ob es gewünscht ist, dass der „PV-Betrieb“ stets mit dem nahezu durchgehenden¹ Heizstabbetrieb verbunden ist - unabhängig davon, ob die Wärmepumpe zeitgleich in Betrieb ist, um den Speicher auf den Standard-Sollwert zu erwärmen. Zudem scheint im Gegensatz zu der Erhöhung des Sollwertes für den Heizstabbetrieb in den „PV-Phasen“ der Wärmepumpenbetrieb nicht forciert zu werden. Des Weiteren ist mit dem Hersteller der „taktende“ Betrieb der Wärmepumpe zu klären, welcher durch das „PV-Signal“ ausgelöst zu sein scheint (siehe Kapitel 4.3.2).

- Heizstabbetrieb außerhalb der Legionellenschaltung und außerhalb der „PV-Phasen“:

In Abstimmung mit dem Hersteller und dem Nutzer sind die Möglichkeiten der Änderungen der Regelung des Heizstabes zu diskutieren, um den (fast immer) nicht notwendigen Heizstabbetrieb zu minimieren. Eine Option wäre die Deaktivierung des Heizstabes. Sollte jedoch einmal eine kurzzeitige sehr hohe Entnahme auftreten, könnte es zu Komforteinbußen kommen. Dies scheint unter Berücksichtigung des Zapfverhaltens eher unwahrscheinlich, jedoch nicht ausgeschlossen. Als Alternative wäre eine deutliche Senkung des Einschaltwertes denkbar. Dies würde nicht jeglichen unnötigen Heizstabbetrieb unterbinden, jedoch die Anzahl der Heizstabbetriebe reduzieren. Wenn es die Regelung ermöglicht, wäre es eine gute Möglichkeit für die Regelung des Heizstabes einen Sensor in der Speicherhülse oben im Speicher zu platzieren, den Sensor für die Regelung der Wärmepumpe jedoch in der Mitte zu belassen. Generell wären durch Änderungen im Regelungsalgorithmus auch andere Regelungsansätze für den Heizstabbetrieb denkbar, welche die Häufigkeit des unnötigen Einsatzes minimieren, jedoch den Heizstab dann aktivieren, wenn dies tatsächlich notwendig sein sollte.

- Legionellenschaltung:

Der Anlagenbetrieb in der Legionellenschaltung zeigt ein Optimierungspotential, das sich u.U. nur durch Änderung im Regelungsalgorithmus umsetzen ließe. Der Heizstab sollte nicht stets zeitgleich mit der Wärmepumpe betrieben werden. Ein sequentieller Betrieb (zunächst Wärmepumpe bis zur oberen Einsatzgrenze und anschließend Heizstab) ist energetisch sinnvoller.

Anlage 5: Durchgeführte Maßnahmen

Leider war der Hersteller der Anlage für eine Umsetzung der von uns vorgetragenen Fragen und Verbesserungsvorschläge nicht zu erreichen.

¹ soweit der stark erhöhte Sollwert nicht erreicht ist

4.5 Aufstellraum

Im Aufstellraum der Wärmepumpe werden die Temperatur und die relative Feuchte der Raumluft gemessen. Die Sensoren sind im Abstand von 3 cm von der Raumwand befestigt. Leider ist es aufgrund der Gegebenheiten vor Ort nicht möglich, alle Sensoren so zu positionieren, dass die Messung der Raumluft nicht von der Abluft der Wärmepumpe während des Betriebes beeinflusst ist. So wird bei Anlage 1 und 5 die von der Wärmepumpe angesaugte Luft gemessen, bei den Anlagen 2, 3 und 4 ist die gemessene Lufttemperatur stark von dem ausströmenden Luftstrom der Wärmepumpe beeinflusst. Informationen über die Größe des Raumes und ob sich Türen und Fenster im geöffnetem oder geschlossenem Zustand befinden, liegen nicht vor.

Tabelle 9: Lufttemperatur und Luftfeuchte im Aufstellraum:

Anlage	Temp- eratur in °C: Mittelwert der MP	Temp- eratur in °C: WP- Start	Temp- eratur °C: WP-Stopp	Differenz Tempera- tur in K	rel. Luft- feuchte in %	rel. Luftfeu- chte WP- Start in %	rel. Luftfeu- chte WP- Stopp in %	Differenz rel. Luftfeu- chte
1*	20,8	20,8	19,2	-1,6	46,2	46,0	46,9	0,9
2**	18,7	19,3	14,2	-5,1	63,2	68,0	75,6	7,6
3**	19,4	20,7	13,4	-7,3	56,1	59,6	65,9	6,3
4**	21,1	21,5	15,0	-6,6	47,9	49,4	54,3	4,9
5*	19,6	19,7	18,5	-1,2	52,6	57,4	54,7	-2,7

*: Sensorposition vor Wärmepumpen-Lufteintritt;

** Sensorposition direkt durch Wärmepumpenauslass beeinflusst

Lufttemperatur

Die erste Spalte der Tabelle 9 zeigt die durchschnittliche Lufttemperatur im jeweiligen Aufstellraum, gemittelt über den gesamten Messzeitraum. Diese liegt zwischen 18,7 °C (Anlage 2) und 21,1 °C (Anlage 4).

In Spalte zwei bzw. drei sind die durchschnittliche Lufttemperatur im Aufstellraum zu Beginn bzw. am Ende der Wärmepumpen-Betriebszeiten notiert. Bei den Anlagen 1 und 5 kann eine Reduktion der Lufttemperatur von 1,6 K bzw. 1,2 K beobachtet werden. Bei den Anlagen 2,3 und 4 repräsentiert die gemessene Lufttemperatur nicht die Absenkung der Außenluft-Eintrittstemperatur (siehe Erläuterung zur Sensorposition oben).

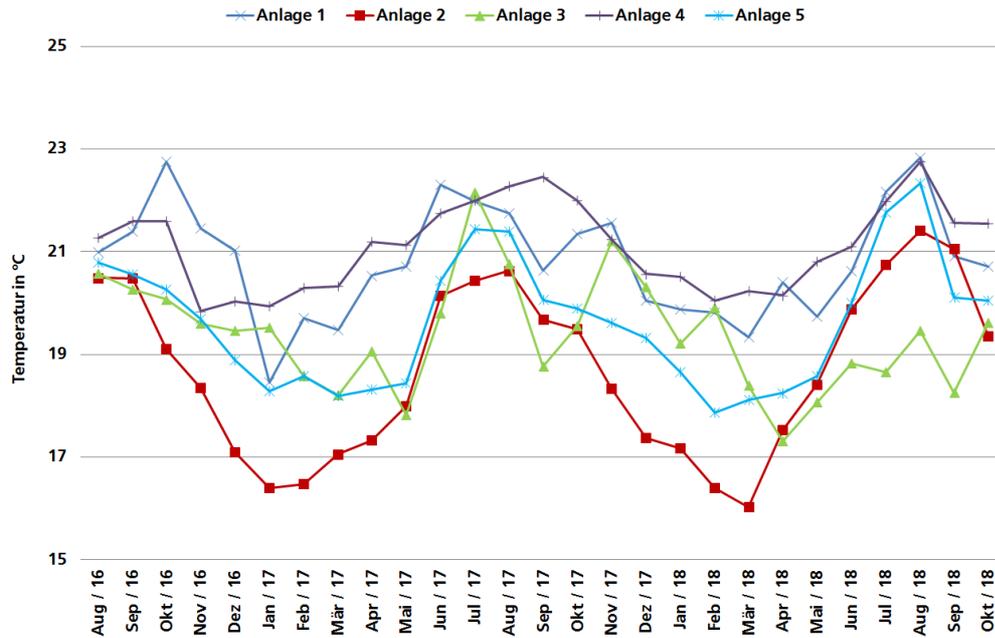


Abbildung 41: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Aufstellraum

In Abbildung 41 sind die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur dargestellt. Ein saisonaler Einfluss ist klar erkennbar. Bei Anlage 1, 3, 4 und 5 sinken die Monatsmitteltemperaturen im Winter auf 17,5 °C und steigen im Sommer auf 23 °C. Anlage 2 zeigt den gleichen saisonalen Verlauf wie die anderen Anlagen, liegt aber im Schnitt um 1 bis 2 K darunter.

Luftfeuchte

Die relative Feuchte in den Aufstellungsräumen ist in Tabelle 9 in der fünften Spalte angegeben. Sie liegt im Mittel der Auswertungsperiode zwischen 46 % (bei 20,8 °C, Anlage 1) und 63 % (bei 18,7 °C, Anlage 2). Die Differenz zwischen der relativen Luftfeuchte zu Beginn eines WP-Betriebes und der relativen Luftfeuchte am Ende eines WP-Betriebes zeigt bei Anlagen 1 und Anlage 5 unterschiedliche Werte. Bei Anlage 1 ist die relative Luftfeuchte nach dem WP Betrieb im Schnitt 0,9 % höher als vorher. Bei Anlage 5 liegt sie 2,7 % unter der gemessenen relativen Luftfeuchte vor dem WP Betrieb. Bei Anlage 2,3 und 4 ist die Messung der relativen Feuchte von der Abluft der WP im Betrieb beeinflusst und somit nicht aussagekräftig.

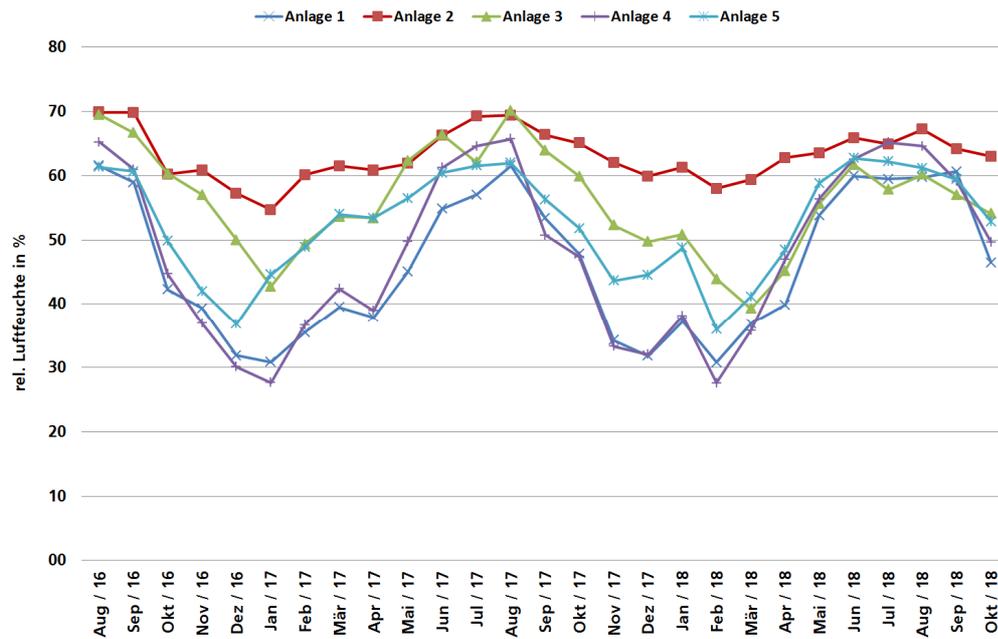


Abbildung 42: Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte Aufstellraum

Die durchschnittliche monatliche relative Luftfeuchte im Aufstellraum im Jahresverlauf ist in Abbildung 42 dargestellt und zeigt wie die Temperatur einen saisonalen Verlauf. In den Sommermonaten steigen die Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte auf 60 – 70 %. In den Wintermonaten sinken die Werte – außer bei Anlage 2 - auf 30 bis 40 %. Bei Anlage 2 - mit 1 bis 3 K niedrigeren Lufttemperaturen in den Wintermonaten im Vergleich zu den anderen Anlagen - reduziert sich die relative Feuchte auch in den Wintermonaten nicht unter 55 %. Bei dieser Anlage befindet sich eine Dusche im Aufstellraum der Wärmepumpe.

Abbildung 1: Schnittzeichnung Warmwasser-Wärmepumpe	8
Abbildung 2: Messkonzept	11
Abbildung 3: Anlage 1 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 758 Messtage)	17
Abbildung 4: Anlage 1 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 758 Messtage)	17
Abbildung 5: Anlage 2 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 822 Messtage)	18
Abbildung 6: Anlage 2 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 822 Messtage)	18
Abbildung 7: Anlage 3 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 807 Messtage)	19
Abbildung 8: Anlage 3 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 807 Messtage)	19
Abbildung 9: Anlage 4 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 784 Messtage)	20
Abbildung 10: Anlage 4 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 784 Messtage)	20
Abbildung 11: Anlage 5 Histogramm Volumen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 821 Messtage)	21
Abbildung 12: Anlage 5 Histogramm Energie Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 821 Messtage)	21
Abbildung 13: Anlage 1 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.10.18, 758 Messtage)	22
Abbildung 14: Anlage 2 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)	23
Abbildung 15: Anlage 3 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)	23
Abbildung 16: Anlage 4 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)	24
Abbildung 17: Anlage 5 Temperaturen Zapfung (Zeitraum 01.08.16 – 31.12.16, 153 Tage)	24
Abbildung 18: Temperatur Kaltwasserzulauf	25
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 1	27
Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 2	29
Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 3	30
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 4	31
Abbildung 23: Anlage 1: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe.....	32
Abbildung 24: Anlage 2: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe.....	33
Abbildung 25: Anlage 3: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe.....	34
Abbildung 26: Anlage 4: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe.....	35
Abbildung 27: $COP_{Anlage, Zyklus}$ und $COP_{WP, est, Zyklus}$ je Wärmepumpenzyklus (Ende Wärmepumpenbetrieb bis Ende folgender Wärmepumpenbetrieb; Zyklendauer 23h ... 25h ohne Betrieb des Heizstabes)	36
Abbildung 28: Arbeitszahl, thermische und elektrische Energie sowie mittlere Temperaturen im Zeitraum 1. August 2016 bis 31. Oktober 2018	41
Abbildung 29: Anlage 1 wöchentliche Arbeitszahl.....	42

Abbildung 30: Anlage 2 wöchentliche Arbeitszahl.....	43
Abbildung 31: Anlage 3 wöchentliche Arbeitszahl.....	43
Abbildung 32: Anlage 4 wöchentliche Arbeitszahl.....	44
Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf des Betriebes der Wärmepumpe und des Heizstabes in Anlage 5	48
Abbildung 34: Wöchentliche Arbeitszahl der Anlage 5	49
Abbildung 35: Arbeitszahl, thermische und elektrische Energie sowie mittlere Temperaturen im Zeitraum August bis 31. Oktober 2018.....	49
Abbildung 36: Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 1.....	52
Abbildung 37 Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 2.....	54
Abbildung 38: Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 3.....	55
Abbildung 39: Wöchentliche Arbeitszahl vor und nach den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen: Anlage 4.....	56
Abbildung 40 Anlage 4: Speichertemperatur und Laufzeit der Wärmepumpe vor und nach Optimierung.....	57
Abbildung 41: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Aufstellraum.....	60
Abbildung 42: Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte Aufstellraum	61

6 Literaturverzeichnis

- [1] european heat pump association Market and Statistics Report 2018, Thomas Nowak, Brussles 2018