

Abschlussbericht

WÄRMEPUMPEN IN BESTANDSGEBÄUDEN

ERGEBNISSE AUS DEM FORSCHUNGS- PROJEKT „WP_{SMART} IM BESTAND“



Öffentliche Förderung und Projektträger

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektleitung



Projektpartner



WP_{SMART} IM BESTAND

Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid)

Danny Günther, Jeannette Wapler, Robert Langner, Sebastian Helmling, Dr.-Ing. Marek Miara, Dr.-Ing. David Fischer, Dirk Zimmermann, Tobias Wolf, Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Projektpartner: ait-deutschland GmbH, Bosch Thermotechnik GmbH, Elektrizitätswerk Mittelbaden GmbH, Glen Dimplex Wärmepumpentechnik GmbH, Heliotherm Wärmepumpentechnik GmbH, Lechwerke AG, Max Weishaupt GmbH, Stadtwerke Stuttgart GmbH, Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Viessmann Werke GmbH & Co. KG

Förderkennzeichen: 03ET1272A

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Zusammenfassung / <i>Summary</i>.....	6
2	Einleitung.....	13
2.1	Projektziele und Rahmenbedingungen	13
2.2	Anmerkungen zum Bericht	14
3	Monitoring Konzept	16
3.1	Die Monitoring Prozessschritte	16
3.2	Stammdatenerhebung	18
3.3	Methodik zur Bewertung der Gebäude	19
3.4	Messtechnik.....	21
3.4.1	Elektroenergiezähler	23
3.4.2	Wärmemengenzähler.....	23
3.4.3	Gas- und Ölzähler	24
3.4.4	Temperaturfühler	25
3.5	Fehlergrenzen der Messtechnik	25
3.6	Das Messdatenerfassungssystem	28
3.7	Erweiterung des Monitoring-Konzeptes zur Untersuchung der Lastflexibilität	29
3.7.1	Erweiterung der Messtechnik	29
3.7.2	System	29
3.7.3	Server	30
3.7.4	Feldanlage	30
4	Charakterisierung der untersuchten Anlagen und Gebäude	32
4.1	Datenverfügbarkeit und Definition der Datenbasis	32
4.2	Gebäude.....	34
4.2.1	Gebäudetyp und –fläche.....	34
4.2.2	Baualter	35
4.2.3	Sanierungsgrad	36
4.3	Wärmequellenanlage	39
4.4	Wärmepumpengeräte.....	40
4.5	Wärmenutzungsanlage	45
4.5.1	Wärmeübergabesystem	45
4.5.2	Heizungsspeicher	47
4.6	Weitere Wärmeerzeuger	48
4.7	Witterungsbedingungen im Messzeitraum	51
4.8	Wärmenutzung für Raumheizung und Trinkwassererwärmung	53
4.9	Heizkreistemperaturen	56
4.9.1	Methodik der Analyse	57
4.9.2	Ergebnisse.....	59
5	Ergebnisse zur Forschungsfrage 1: Effizienz von Wärmepumpen in bestehenden Einfamilienhäusern	63
5.1	Definition der Bilanzgrenzen für die Berechnung der Arbeitszahlen.....	63
5.2	Effizienz und Einflussgrößen	66
5.2.1	Wärmequellen Außenluft sowie Außenluft und Raumluft	66
5.2.2	Wärmequelle Erdreich und Wärmequellenanlage Eisspeicher	77
5.3	Effizienz und Betriebsbedingungen vor dem Hintergrund von Baualter und Sanierungsgrad der Gebäude.....	82

5.3.1	Analyse Raumheizmodus - Baualter, Gebäudequalität, Heizkreistemperatur und Anlageneffizienz	82
5.3.2	Fokus Einzelanlagen – Baualter, Gebäudequalität, Heizkreistemperatur und Anlageneffizienz	86
5.4	Analyse bivalente Systeme	90
5.4.1	Jahresbilanz	90
5.4.2	Tagesbilanz	93
5.5	Bewertung der CO ₂ -Äq-Emissionen	101
6	Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen	106
6.1	Wärmepumpen im Smart Grid	106
6.2	Entwicklung von Geschäftsmodellen	110
6.2.1	Flexibilitätscontracting	111
6.2.2	Beziehungen der Akteure	111
6.2.3	Geschäftsmodelle	113
6.3	Simulation der Flexibilität von Wärmepumpen	115
6.3.1	Wärmepumpen Pool	115
6.3.2	Einfluss Größe des Pools:	118
6.3.3	Reaktion auf ein einzelnes Signal	119
6.3.4	Reaktion auf wiederholte Signale	120
6.3.5	Charakteristische Reaktion	121
6.3.6	Verschobene Energie und Effizienz im Laufe des Jahres einzelne Signale	122
6.3.7	Verschobene Energie, Effizienz im Laufe des Jahres wiederholte Signale	123
6.3.8	Fazit Simulation	124
6.4	Hochrechnung auf Ebene Deutschland	126
6.4.1	Simulierte Fälle	126
6.4.2	Ergebnis	127
6.5	Feldtest	129
6.5.1	Vorgehen und Testsequenzen	130
6.5.2	Implementierte SG-Ready Strategie	132
6.5.3	Beobachtete Reaktion der Wärmepumpen auf SG-Ready	132
6.5.4	Mittlere Leistungsaufnahme	135
6.5.5	Zuverlässigkeit der Ansteuerung	136
6.5.6	Fazit des Feldtests	137
7	Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Projektes	139
7.1	Projekt-Homepage	139
7.2	Vorträge, Veröffentlichungen, Medienbeiträge	139
7.3	Mitarbeit bei den VDI-Richtlinien	139
	Literatur- und Quellenverzeichnis zu Kapitel 1 bis 5	141
	Literatur- und Quellenverzeichnis zu Kapitel 6	142
	Abkürzungsverzeichnis	143
	Vorstellung der einzelnen Anlagen	144

1

Zusammenfassung / *Summary*

Forschungsfrage 1: "Welche Effizienzwerte erreichen elektrisch angetriebene Wärmepumpen bei unterschiedlich sanierten Bestandsgebäuden im Feld?"

Zur Beantwortung der Frage wurden insgesamt 56 Wärmepumpen messtechnisch im Feld untersucht. Hierzu zählen 32 Systeme mit der Wärmequelle Außenluft, bei der ein Wärmepumpengerät zur Raumheizung (RH) und Trinkwassererwärmung (TWE) eingesetzt wird, sowie neun Systeme, die jeweils ein Wärmepumpengerät mit der Wärmequelle Außenluft zur RH und ein Wärmepumpengerät mit der Wärmequelle Raumluft zur TWE nutzen. Ferner wurden 13 Wärmepumpen mit der Wärmequelle Erdreich (ausschließlich Erdwärmesonden) und zwei Wärmepumpen mit Eisspeichern als Wärmequellenanlage untersucht.

In 42 Fällen wurden die Wärmepumpen in Einfamilienhäusern mit einer mittleren¹ beheizten Fläche von 172 m² betrieben. Bei den übrigen Gebäuden handelt es sich um Zwei-, Drei-, bzw. Vier-Familienhäuser. Alle Gebäude zusammen betrachtet, liegt die beheizte Fläche im Mittel¹ bei 183 m². Es wurden 57 % der Wärmepumpen in Gebäuden mit Baujahren bis 1979, 32 % in Gebäuden mit Baujahren von 1980 bis 1995 und 11 % in Gebäuden der Baujahre 1996 bis 2005 betrieben. Von 45 der 56 Messobjekte konnte eine detaillierte Analyse der energetischen Qualität der Gebäude im Original- und im Istzustand realisiert werden, wobei jeweils der mittlere U-Wert ermittelt wurde. Die Analyse zeigt, dass die Gebäude mit Baujahren bis 1979 im Originalzustand mittlere U-Werte aufwiesen, die entsprechend ihres Baujahres (teilweise weit) unterhalb der Vorgaben der WSchV'77 lagen. Diese Gebäude wurden alle mehr oder weniger umfangreich saniert. Bei 89 % der Gebäude wurden die Fenster getauscht, bei 86 % das Dach und bei 57 % die Außenwände (umfanglich) saniert. In der Folge reichen die mittleren U-Werte der Gebäudehülle im Istzustand von dem Niveau der WSchV'77 bis oberhalb der Grenzwerte für die WSchV'95. Damit ist die Bandbreite der U-Werte größer als bei den Gebäuden, die ab 1980 errichtet wurden. Deren U-Werte lagen überwiegend auf dem Niveau der WSchV'95. Sanierungen mit signifikantem Einfluss auf den mittleren U-Wert wurden bei diesen Gebäuden kaum ausgeführt. Hinsichtlich des spezifischen Wärmebedarfes zeigt sich entsprechend der unterschiedlichen Sanierungstiefen und Nutzergewohnheiten eine große Bandbreite. Der witterungsbereinigte spezifische Heizwärmeverbrauch reicht von 50 kWh/(m²*a) bis 250 kWh/(m²*a), bei einem Median von 110 kWh/(m²*a).

Für den Zeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 konnten 29 Außenluft-Wärmepumpen, die zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt wurden, analysiert werden. Diese Anlagen erreichten ohne Ausreißer (4,1 und 4,6) Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 2,5 bis 3,8 bei einem Mittelwert von 3,1. Die mittleren Temperaturen zur Raumheizung betrugen 36,9°C, die maximalen Vorlauftemperaturen im Mittel 43,6°C. Letztere wurden bei mittleren Außenlufttemperaturen von -3,0°C gemessen, was neben weiteren Aspekten darauf schließen lässt, dass die erforderlichen Heizkreistemperaturen bei den Normauslegungstemperaturen (-12°C bis -16°C) auf entsprechend höherem Niveau liegen.

¹ Der genannte Wert gibt den Median wieder; je die Hälfte der Gebäude hat eine größere bzw. kleinere beheizte Fläche als der Median.

Analog zu den Außenluft-Wärmepumpen konnten 12 Erdreich-Wärmepumpen analysiert werden. Ohne den negativen Ausreißer (1,8) wurden JAZ zwischen 3,3 und 4,7 bei einem Mittelwert von 4,1 ermittelt. Die im Mittel zur Raumheizung erforderliche Temperatur betrug 37,8°C, die mittlere maximal erforderliche Vorlauftemperatur lag bei 45,4°C. Letztgenannte wurde bei einer Außenlufttemperatur von durchschnittlich -4,6°C gemessen. Auch bei den Erdreich-Anlagen lagen die Auslegungsheizkreistemperaturen entsprechend höher.

Die Effizienzanalyse hat bestätigt, dass sich eine Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse überlagern. Die Einflüsse reichen bspw. von der Norm-Leistungszahl der Geräte (bspw. single-speed Außenluft-Wärmepumpen mit einer Bandbreite von 3,2 bis 4,2 (A2/W35)) über die Energieverbräuche der Wärmequellenantriebe bis hin zu den mittleren Heizkreistemperaturen (29,8°C bis 53,3°C) und den Energieanteilen zur Trinkwassererwärmung (4 % bis 42 %). Einzig zwischen der Heizkreistemperatur und der JAZ hebt sich die Abhängigkeit deutlich hervor. Die Abhängigkeit ist sichtbar, da im Mittel 85 % der bereitgestellten Energie auf den Modus Raumheizung entfallen.

Die Energieverbräuche der Elektroheizstäbe spielen bei den vermessenen Anlagen eine untergeordnete Rolle. Bezogen auf alle mit Elektroheizstab ausgestatteten Außenluft-Wärmepumpen (24 von 29, vier davon bivalente Systeme) beträgt die – auf die Verdichterarbeit bezogene – relative Heizstabarbeit 1,9 %. Signifikanter Heizstabbetrieb wurde lediglich infolge falscher Parametrierung, bei Defekten oder infolge von Legionellenvermeidung gemessen. Mit Blick auf den Einfluss der Leistungsregelung lässt sich feststellen, dass die Anlagen mit signifikantem Heizstabbetrieb tendenziell keine Wärmepumpen mit Inverter geregelten Verdichter sind. Bei den Erdreich-Wärmepumpen verfügen 10 von 12 Anlagen über Heizstäbe, wobei nur zwei Anlagen diese in Betrieb genommen haben. Hierbei lag die relative Heizstabarbeit bei 0,2 % bzw. 3,9 %.

Bei der kombinierten Bewertung von Wärmepumpenbetrieb und energetischer Qualität der Gebäudehülle ließ sich kein Zusammenhang zwischen Baualter bzw. Baualtersklasse und JAZ feststellen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sich auch zu den Heizkreistemperaturen, einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Effizienz, kein Zusammenhang zum Alter der Gebäude herstellen lässt. So wurden bspw. in den Gebäuden von 1949 bis 1979 (1981 bis 1994) für Außenluft-Wärmepumpen mittlere Temperaturen zur Raumheizung von 31°C bis 43°C (30°C bis 41°C) sowie JAZ zwischen 2,5 und 3,6 (2,5 und 3,6 plus zwei Ausreißer mit 4,1 und 4,6) ermittelt. Diese Bandbreiten bestätigen, dass nicht das Baualter sondern die individuellen Voraussetzungen, bspw. die Sanierung der Gebäudehülle sowie Art und Auslegung des Wärmeübergabesystems, über die Effizienz von Wärmepumpen entscheiden.

Bezogen auf das Jahr 2018 liegen die Einsparungen an CO₂-Äq-Emissionen gegenüber einem Gas-Brennwertkessel bei den vermessenen Außenluft-Wärmepumpen zwischen 19 % und 47 % und bei den Erdreich-Wärmepumpen zwischen 39 % bis 57 %. Anhand einer Projektion der Emissionsfaktoren für Strom und Gas für das Jahr 2030 wurden für eine konservative (optimistische) Prognose beider Emissionsfaktoren Einsparungen bei Außenluft-Wärmepumpen zwischen 47 % und 65 % (63 % und 76 %) und bei den Erdreich-Wärmepumpen zwischen 60 % und 72 % (72 % bis 80 %) ermittelt. Da sich keine Korrelation zwischen Baualter der Gebäude und JAZ der Wärmepumpen feststellen ließ, gelten diese Bandbreiten für neuere genauso wie für ältere Gebäude.

Die Ergebnisse zeigen, dass Wärmepumpen auch in Bestandsgebäuden, vor allem unter ökologischen Gesichtspunkten, zweckmäßig eingesetzt werden können. Kernpunkt ist die erforderliche Heizkreistemperatur, welche wiederum vom spezifischen Heizwärmebedarf und den installierten Wärmeübergabesystemen abhängt. Die Analyse der Gebäude hat gezeigt, dass keine Komplettisanierung auf einen energetischen Neubaustandard notwendig ist, um Wärmepumpen zweckmäßig zu betreiben. Demgegen-

über muss eine Erdreich-Wärmepumpe mit einer JAZ von 1,8 erwähnt werden. Dieses Beispiel zeigt auf, dass es auch Grenzen für ökologisch zweckmäßigen Wärmepumpenbetrieb gibt. Die Beispiele machen deutlich, wie wichtig die Phase der Planung, insbesondere im Altbau ist. Dabei gilt es, die Planung der Wärmepumpe möglichst mit dem Gebäudesanierungsfahrplan zu verbinden.

Beim Betrieb der Wärmepumpen kam es nur selten zu Störungen; offensichtliche Fehler bei der Installation oder Parametrierung der Regler traten im Vergleich zu vorherigen Feldtests (Günther et al. 2014), (Miara et al. 2011) nur selten auf. Dies ist auch auf die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der Qualitätssicherung zurückzuführen. Dennoch besteht weiteres Verbesserungspotenzial auf Anlagenlevel. Es könnten prinzipiell neuere Anlagen eingesetzt werden, die auch über höhere Norm-Leistungszahlen verfügen. Methoden der Künstlichen Intelligenz könnten in den Phasen der Planung, Installation und im Betrieb zur Qualitätssicherung und zur Effizienzoptimierung beitragen.

Forschungsfrage 2: "Wie hoch ist das Lastverschiebungspotenzial elektrisch angetriebener Wärmepumpen im Feld und welche Rahmenbedingungen sind erforderlich?"

Um die Frage „Welche Flexibilität können Wärmepumpen dem Energiesystem bieten?“ zu beantworten, wurden umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt, die in einem Feldtest evaluiert wurden.

Für die Simulationsrechnungen wurden Wärmepumpen-Pools nach heutigem Standard dimensioniert und mit einem SG-Ready-Signal angesteuert. Es hat sich gezeigt, dass Poolgrößen um die 250 Einheiten erforderlich sind, um eine stabile Gesamtsystemantwort zu erzielen. Es hat sich gezeigt, dass Wärmepumpenanlagen ein elektrisches Verschiebungspotential zwischen -0,18 kWh und 10,68 kWh pro Einheit und Lastverlagerungszyklus bieten können. Hochgerechnet auf eine Million Wärmepumpen, ergibt sich ein Gesamtverschiebungspotential – je nach SG-Ready Regelung – von 4 bis 14 GWh auf Stundenebene. Bei Verschiebungen über einen Tag hinaus sinkt das Potential auf 3 – 8 GWh für eine Million Wärmepumpen.

Die Verfügbarkeit von Wärmepumpenanlagen für die Lastverschiebung ist stark saisonabhängig und zeigt im Sommer ein vernachlässigbar kleines Verschiebungspotenzial im Vergleich zum Winter und zur Übergangszeit. Eine Analyse der Signallänge führt zu der Schlussfolgerung, dass Verschiebungsintervalle zwischen 15 und 60 Minuten für die Wärmepumpenanlagen in Bezug auf die verschiebbare Energie am besten geeignet sind. Bei diesen Signallängen bleiben der Zusatzverbrauch unter 17%, wenn die Zusatzheizung nicht verwendet wird. Eine Analyse des charakteristischen Verhaltens zeigt ferner, dass die Verschiebung der Energie über einen langen Zeitraum zu Verlusten von bis zu 70% führt. Die wiederholte Anwendung von Triggersignalen über einen Zeitraum von 12 Stunden führt zu einer Erhöhung der verschiebbaren Energiemenge bei gleichzeitiger Verringerung der jährlichen Lastverschiebungseffizienz um durchschnittlich -15,6%. Die Beachtung von ausreichenden Regenerationszeiten ist entscheidend für eine effiziente Verschiebung.

Im Feldtest hat sich gezeigt, dass von neun angesteuerten Wärmepumpen nur zwei die gemäß SG-Ready Standard definierte Reaktion zeigten. Bei beiden Anlagen wurde eine „aggressive“ Parametrierung der smarten Regelung vorgenommen. Bezüglich der technischen Implementierung der vierstufigen Ansteuerung mussten einige Anlagen herstellerseitig zusätzlich mit entsprechenden Adapterboxen versehen werden. Obwohl SG-Ready im Grundsatz eine einfache Schnittstelle ist, kam es bei der Installation auch

zu einem Vertauschen der Kabel. Es ist jedoch festzuhalten, dass es sich hier um die erste Generation von SG-Ready Wärmepumpen handelt.

Es zeigt sich, dass die Art des SG-Ready Signals und die in der WP implementierte Regelung klar die Verlässlichkeit, Laufzeiten und die Leistungsaufnahme bestimmt. Die Grundsätzliche Idee mehrerer Stufen ist somit positiv zu beurteilen und erlaubt die Möglichkeit, WP flexibel in ein Energiemanagementsystem zu integrieren und hierfür gezielt Algorithmen zu entwickeln.

Zudem hat sich gezeigt, dass Lastverschiebung häufig effektiv zwischen 30 - 60 Minuten durchgeführt wird und längere Signale keine Wirkung entfalten, außer den Betrieb der Wärmepumpen hin zu höheren mittleren Speichertemperaturen zu verschieben. Es hat sich auch gezeigt, dass die Systeme zu großen Teilen nicht auf die kurzen (eine Minute) Triggersignale reagierten oder im Anschluss kontinuierlich betrieben wurden, bedingt durch die implementierten Mindestlaufzeiten. Minimale Lauf- und Pausenzeiten stehen somit im Widerspruch zu kurzen Triggersignalen. Es hat sich zudem gezeigt, dass Systeme mit einem hohen Trinkwasseranteil eine relativ gute und gleichmäßige Verfügbarkeit über das Jahr zeigen, wohingegen stark raumheizungsdominierte Systeme starke saisonale Schwankungen aufweisen.

Summary

Research question 1: "What efficiencies do electrically driven heat pumps achieve in differently retrofitted older buildings under real operating conditions in the field?"

In order to answer this question, a total of 56 heat pumps were measured in the field. This includes 32 systems with ambient air as heat source (applying one heat pump for room heating (RH) and domestic hot water (TWE)) and nine combined systems (applying two heat pumps per system – one with ambient air as heat source (for RH) and the other with room air as heat source (for TWE)). Furthermore, 13 heat pumps use soil as heat source (only geothermal probes) and two heat pumps have an ice storage as a heat source system.

In 42 cases, the heat pumps were operated in single-family houses, which had an average heated area of 172 m². The other buildings were two-, three- or four-family houses. Considering all buildings, the heated area averages 183 m². 57 % of the heat pumps were operated in buildings constructed 1979 or earlier, 32 % in buildings constructed between 1980 and 1995 and 11 % in buildings constructed between 1996 and 2005. A detailed analysis of the energetic quality of the buildings in their original and current state could be carried out for 45 of the 56 measurement objects, whereby the mean U-value was determined. The analysis shows, that the buildings with years of construction up to 1979 had average U-values in their original state, which (depending on their year of construction) were (in some cases far) below the specifications of the German (1. WSchV 1977). These buildings have all been renovated. In 89 % of the cases the windows were replaced, 86 % have renovated roofs and 57 % renovated outer walls (significantly). As a result, the mean U-values in the current states improved from the level of the WSchV'77 to values exceeding the thresholds given in the WSchV'95. This led to a wider range of U-values compared to those of the buildings constructed after 1979. Renovations with significant influence to the average U-values were realized only rarely within this group of buildings. Their U-values were mostly at the level of the WSchV'95 and no retrofitting measures changed that (the windows were replaced on three buildings and the outer wall of one building was renovated).

For the period from July 2018 to June 2019, 29 ambient air heat pumps that were used for space heating and domestic hot water heating could be analyzed. Without the

outliers (4.1 and 4.6), these plants achieved seasonal performance factors (JAZ) of 2.5 to 3.8 with an average of 3.1. The average temperature for space heating is 36.9°C, the maximum supply temperatures 42.8°C on average. The latter were measured at an average ambient air temperature of -3.0°C. Which suggests that – besides other aspects – the required heating circuit temperatures are at a correspondingly higher level at the norm design temperatures (between -12°C and -16°C).

Analogous to the ambient air heat pumps, 12 ground-source heat pumps could be analyzed. Without a negative outlier (1.8), a seasonal performance factor between 3.3 and 4.7 were determined with an average of 4.1. The average temperature required for space heating was 37.8 °C, the average maximum required supply temperature was 45.4 °C. The latter was measured at an ambient air temperature of an average of -4.6 °C. Also with the ground-sourced heat pumps the norm design temperatures are higher accordingly.

The efficiency analysis has confirmed, that a large number of different influences are superimposed. The influences include e.g. the norm coefficient of performance of the devices (for example single-speed ambient air heat pumps with 3.2 to 4.2 (A2 / W35)), the energy consumption of the heat source pumps/fans, the average heating circuit temperatures (29.8 °C to 53.3 °C) or the energy fractions for domestic hot water (4 % to 42 %). Only the dependency between the heating circuit temperature and the seasonal performance factor stand out clearly. Mainly because the space heating mode accounts for an average of 85% of the total energy provided.

In the current cases the energy consumption of the electrical back-up heaters takes a subordinate role. For all ambient air systems equipped with an electrical back-up heater (24 of 29, four of them bivalent (gas or oil boiler)) their consumption relative to the compressor consumption is 2.0%. The only significant backup heater operation times were a result of incorrect parametrization, defects or operation for Legionella prevention. Considering the aspect of power modulating heat pumps, it can be determined that the systems with significant backup-heater operation tend not to be heat pumps with inverter-controlled compressors. In the case of ground source heat pumps, ten out of twelve systems are equipped with electrical back-up heaters, however, only two, have put them into operation at all (with a relative back-up heater consumption of 0.2% and 3.9%).

From the combined evaluation of the heat pump operations and the energetic states of the buildings, no connection between building age or building age class and the seasonal performance factor was determinable. This was mainly due to the fact that there was no connection visible between the age of the building and the required space heating temperatures – one of the most important factors on heat pump performance. For example, in the buildings from 1949 to 1979 (1981 to 1994) average temperatures for space heating from 31 °C to 43 °C (30 °C to 41 °C) and seasonal performance factors (heat source ambient air) between 2.5 and 3.6 (2.5 and 3.6 plus the two outliers with 4.1 and 4.6) were determined. Those ranges confirm, that it is not the construction age but the individual requirements that determine the efficiency of heat pumps.

Focused on 2018 (in Germany), the CO_{2-eq} emission savings compared to a gas condensing boiler for ambient air heat pumps are between 19 % and 47 % and for ground-sourced heat pumps between 39 % and 57 %. Based on a projection of the emission factors for electricity and gas for 2030 from a conservative (optimistic) forecast, savings were calculated to be between 47 % and 65 % (63 % and 76 %) for ambient air heat pumps and between 60 % and 72 % (72 % to 80 %) for ground-sourced heat pumps. Since there was no correlation between the age of the buildings and the seasonal performance factors of the heat pumps, these ranges apply to newer as well as older buildings.

The results show, that heat pumps can also be used appropriately in existing buildings, especially from an ecological point of view. The key point is the required heating circuit temperature, which in turn depends on the specific heat demand as well as the installed heat transmission systems. The analysis of the buildings has shown that it is not necessary to renovate the building to comply with modern energetic building standard in order to operate heat pumps appropriately. At the same time, heat transmission systems have been partially over-dimensioned in the past, which can also contribute to lower temperatures for space heating. On the other hand a ground-sourced heat pump with a seasonal performance factor of 1.8 has to be mentioned. This example shows that there are also limits to an ecologically appropriate heat pump operation. Those examples reveal the importance of the planning phase, especially for old buildings. It is important to incorporate the planning of the heat pump into the buildings retrofitting timetable as far as possible.

Malfunctions occurred only rarely during operation of the heat pumps and obvious errors in the installation or parameterization of the controllers rarely occurred in comparison to previous field tests (Günther et al. 2014), (Miara et al. 2011). This is also due to the developments in quality assurance in recent years. Nevertheless, there is still room for improvement at system level. In principle, newer systems could be installed with higher coefficients of performance. Artificial intelligence methods in the phases of planning, installation and operation could contribute to quality assurance and efficiency optimization.

Research question 2: "What is the flexibility that heat pumps can deliver to the power system?"

To answer the question „What is the flexibility that heat pumps can deliver to the power system“ extensive simulation studies were carried out. These were finally evaluated within a field test.

The simulation study evaluates a heat pump pool, which is dimensioned according to current standards and controlled via SG-Ready signals. It has become evident that pool sizes of around 250 heat pumps show a robust response of the whole system. The response of the whole pool system is analysed in the following. An electrical shifting potential of 0.18 und 10.68 kWh per unit and operation cycle can be achieved. Based on a projection for 1 million heat pumps the overall load shifting potential amounts (depending on the SG-Ready control) up to 4 – 14 GWh based on hourly level. With shifting over more than the period of a day the potential decrease to 3 – 8 GWh.

Availability of shifting energy with heat pumps is strongly depended on the season. In summer, potential is neglectable compared to transition period and winter. Evaluation of signal duration showed, that shifting intervals between 15 and 50 minutes are most suited. Losses stay below 17 % as back-up heaters with a bad efficiency are not used. Longer durations show losses up to 70 %. Repeating of triggering signals over a duration about 1 hours leads to an increase of the shift able energy and simultaneously to a reduction of the yearly load shifting efficiency by about 15.6 %. Considering enough recovery time is essential for efficient load shifting.

The field test showed that only two of the nine controlled heat pumps showed the expected and according SG-Ready standardized behaviour. The smart controls of both heat pumps were parameterized in an "aggressive" way. According the technical implementation of the four stepped control in some cases additional adapter boxes must be installed by the manufactures. Although SG-Ready is a simple communication interface, flipping of pin connections occurred during installation. It must be noted, howev-

er, the evaluated HPs were from the first manufacturing generation including SG-Ready.

It could be proven that the type of the SG-Ready signal definitely defines reliability, run time and power consumption. The concept of several operation steps is positive and provides new possibilities to integrate heat pumps into a flexible energy management.

Additionally, it could be shown that load shifting signals between 30 and 60 minutes show the desired behaviour. Longer signals were without any effect except that heat pumps work at higher temperatures at lower efficiencies. Also very short signals of about 1 minute showed not the desired effect. Typically, heat pumps are switched but then operate stationary due to implemented minimal run and pause times. Finally, it can be concluded that systems with a high percentage of domestic hot water show an even potential over the whole year, while heating dominated systems show significant seasonal effects.

2 Einleitung

2.1 Projektziele und Rahmenbedingungen

Die Schlüsselrolle von Wärmepumpen in der zukünftigen Wärmeversorgung von Gebäuden wurde in den letzten Jahren im Rahmen diverser Studien über mögliche Pfade zur Erreichung der Klimaziele unterstrichen [IWES/IBP 2017; BCG/PROGNOS 2018; DENA 2017]. Läge man diese Studien zu Grunde, müsste sich der Wärmepumpenbestand von derzeit etwa 800.000 auf Werte zwischen 3,4 Mio. und 8,1 Mio. im Jahr 2030 vergrößern. Dass der Bundesverband Wärmepumpe e.V. in seinem Branchenreport [BWP 2018] selbst im optimistischen Szenario von lediglich 2,9 Mio. Wärmepumpen im Jahr 2030 ausgeht, verdeutlicht die Diskrepanz zwischen eigentlich Notwendigem und unter heutigen Rahmenbedingungen Realisierbarem. Ungeachtet dessen machen die unterschiedlichen Studien vor allem eines deutlich: der Einsatzbereich von Wärmepumpen – die im Neubaubereich bereits etabliert sind – muss auch auf den Gebäudebestand ausgeweitet werden. Mit der Kombination Wärmepumpe und Bestandsgebäude sind diverse Fragestellungen verknüpft, allen voran die Frage nach den realen Betriebsbedingungen und der damit verbundenen Effizienz von Wärmepumpen, aber auch die prinzipielle Integration von Wärmepumpen als möglichst lastflexiblen Stromverbraucher.

Um diesen Fragen nachzugehen, hat sich unter der Federführung des Fraunhofer ISE ein Forschungskonsortium aus acht Wärmepumpenherstellern (ait-deutschland GmbH, Bosch Thermotechnik GmbH, Glen Dimplex Deutschland GmbH, Heliotherm Wärmepumpentechnik GmbH, Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Viessmann Werke GmbH & Co. KG, Max Weishaupt GmbH) und drei Energieversorgungsunternehmen (Lechwerke AG, Stadtwerke Stuttgart GmbH, Elektrizitätswerk Mittelbaden AG & Co. KG) für das Projekt „WPsmart im Bestand“ zusammengeschlossen. Durch die Industriepartner wurde das Projekt fachlich wie finanziell unterstützt. Ferner erfuhr das Projekt eine finanzielle Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ: 03ET1272A). Das Projekt startete im Dezember 2014 und war auf vier Jahre ausgelegt, wurde aber bis Juli 2019 verlängert. Das Konsortium hat im Rahmen des Projektes folgende Ziele verfolgt:

- (1) Identifikation optimaler Lösungen für den Einsatz von Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in Bestandsgebäuden.
- (2) Messtechnische Untersuchung von 100 Wärmepumpen über drei Heizperioden (davon 20 über zwei Heizperioden im smarten Betrieb).
- (3) Energetische, ökologische und ökonomische Bewertung der monovalent, monoenergetisch sowie bivalent (hybrid) betriebenen WP-Anlagen.
- (4) Ermittlung des Potenzials als Erbringer von Systemdienstleistungen unter Anwendung der Funktionalitäten, gemäß „SG Ready“-Regelung
- (5) Empfehlungen, für systemkompatible Regelung und Design zukünftiger WP-Systeme („SG Ready 2.0“).

Die Idee zu „WPsmart im Bestand“ entstand im Jahr 2014. Bereits zu diesem Zeitpunkt hatten sich Wärmepumpen im Neubau weitestgehend etabliert, während sie in bestehenden Gebäuden kaum zum Einsatz kamen. Die Barrieren für den Einsatz von Wärmepumpen im Altbau sind vielfältig und reichen u.a. von der erschwerten Wärmequellenerschließung bis zu den vergleichsweise hohen erforderlichen Heizkreistemperaturen. Letztgenannte hängen im Wesentlichen von der energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie den installierten Wärmeübergabesystemen ab und haben einen we-

sentlichen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe. Da sich Bestandsgebäude aufgrund der Gegebenheiten beim Bau oder im Zuge von Sanierung(en) stark unterscheiden, ergeben sich sehr verschiedene Voraussetzungen bezogen auf die Effizienz von Wärmepumpen, was in der ersten zentralen Forschungsfrage des Projektes mündet:

"Welche Effizienzwerte erreichen elektrisch angetriebene Wärmepumpen bei unterschiedlich sanierten Bestandsgebäuden im Feld?"

Auf die Ergebnisse wird ausführlich im Kapitel 5 eingegangen. Die Forschungsfrage sollte im Rahmen eines breit angelegten Feldtests zur Untersuchung des realen Betriebs von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in älteren Einfamilienhäusern beantwortet werden. Der Projektplan sah vor, 100 Wärmepumpenanlagen über drei Heizperioden messtechnisch zu untersuchen. Aufgrund der eng gefassten Kriterien, welche die Messobjekte zu erfüllen hatten, aber auch wegen der generell geringen Anzahl von Wärmepumpen im Bestand, wurden zwar kontinuierlich, aber in geringerer Anzahl als geplant, Anlagen zur Messung angemeldet. Daher beziehen sich die Auswertungen in diesem Bericht zum Großteil auf die einjährige Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019 und berücksichtigen die dabei größtmögliche Datenbasis von 56 Wärmepumpenanlagen. Um auch die Betriebsbedingungen der Wärmepumpen bewerten zu können, wurden zur Ermittlung der energetischen Eigenschaften der Gebäude u.a. zweistufige Befragungen der Anlagenbetreiber durchgeführt. Um den Betrieb von bivalenten Systemen zu bewerten, sollten ursprünglich ein Drittel der Wärmepumpen gemeinsam mit einem fossilen Heizkessel betrieben werden. Dieses Ziel wurde mit zehn bivalenten von insgesamt 56 Anlagen nur teilweise erreicht.

Bis zum Jahr 2014 wurden in den Bereichen Photovoltaik und Windkraft bereits signifikante Kapazitäten im deutschen Stromsektor zugebaut und bis heute erweitert. Infolge der zunehmenden volatilen Einspeisung entsteht eine Diskrepanz zur Stromnachfrage. An dieser Stelle rücken Verbraucher in den Fokus, deren Stromnachfrage eine gewisse Flexibilität aufweist. Durch thermisches Speicherpotenzial gehören Wärmepumpen zu solchen Systemen. Darüber hinaus wurde bereits im Jahr 2013 mit dem „SG-Ready“ Label ein brancheneinheitlicher Standard für die externe Ansteuerung von Wärmepumpen entwickelt. Die diesem Standard zugrundeliegenden Funktionalitäten begleiten die zweite zentrale Forschungsfrage des Projektes

"Wie hoch ist das Lastverschiebungspotenzial elektrisch angetriebener Wärmepumpen im Feld und welche Rahmenbedingungen sind erforderlich?"

Auf die Ergebnisse zu diesem Thema wird im Kapitel 6 im Detail eingegangen. Die Arbeiten umfassten modellbasierte Analysen sowie die praktische Erprobung der externen Ansteuerung bei neun Wärmepumpen entsprechend der Funktionalitäten von „SG-Ready“ im Feld.

2.2 Anmerkungen zum Bericht

Im Rahmen des Projektes werden marktverfügbare Wärmepumpen und damit Geräte mit hoher technischer Reife untersucht. Von einer Beschreibung der grundlegenden Funktionalitäten (bspw. Aufbau und Funktion von Kältekreisen) wird bei Bedarf nur an den dafür notwendigen Stellen eingegangen. Ein grundlegendes Verständnis zur Wärmepumpentechnologie bietet u.a. (Miara et al. 2013).

In Kapitel 3 wird das Monitoringkonzept beschrieben, wobei auf alle vorab notwendigen Schritte, von der Stammdatenermittlung bis zur automatisierten Messdatenfilterung, eingegangen wird. Eine Beschreibung der untersuchten Anlagen erfolgt im Kapitel 4, bspw. bezüglich der verwendeten Wärmequellen und der Norm-Leistungszahlen

der untersuchten Wärmepumpen. Darüber hinaus wird eine Charakterisierung der Messobjekte auf Basis der Messdaten, bspw. im Hinblick auf die Energieverbräuche zur Raumheizung oder den Heizkreistemperaturen, vorgenommen. In Kapitel 5 und 6 werden die Ergebnisse eingehend vorgestellt, wobei sich Kapitel 5 der Effizienzanalyse von Wärmepumpen in bestehenden Einfamilienhäusern (gemäß Kapitel 2.1 Forschungsfrage 1) und Kapitel 6 der Untersuchung von Wärmepumpen als lastflexible Verbraucher (gemäß Kapitel 2.1 Forschungsfrage 2) widmet. Im Anhang „Vorstellung der einzelnen Anlagen“ werden die Messobjekte in Form von Steckbriefen im Hinblick auf die Eigenschaften der Gebäude, der erfolgten Sanierungsmaßnahmen, der eingesetzten Anlagentechnik sowie den Messergebnissen näher vorgestellt.

Die Ergebnisse zur Forschungsfrage 1 in Kapitel 5 beziehen sich auf die Auswerteperiode von Juli 2018 bis Juni 2019. Die Untersuchungen zum Lastmanagement im Feld wurden im Juni 2018 abgeschlossen, was eine Beeinflussung der Effizienzanalyse durch die externe Ansteuerung ausschließt¹. In Kapitel 5.2.1 werden 32 Systeme mit der Wärmequelle Außenluft (eine Wärmepumpe zur Raumheizung (RH) und Trinkwassererwärmung (TWE)) sowie neun kombinierte Systeme mit den Wärmequellen Außenluft (eine Wärmepumpe zur RH) und Raumluft (eine Wärmepumpe zur TWE) gemeinsam betrachtet. Im Kapitel 5.2.2 werden 13 Wärmepumpen mit der Wärmequelle Erdreich (ausschließlich Erdwärmesonden) und zwei Wärmepumpen mit Eisspeichern als Wärmequellenanlage aus rein praktischen Gründen gemeinsam vorgestellt.

Bei der Erstellung des Berichtes wurde darauf Wert gelegt, neben den Ergebnissen der Anlagengruppen (bspw. aller Außenluft-Wärmepumpen) auch die Ergebnisse der Einzelanlagen gut nachvollziehen zu können. Hierfür werden die Ergebnisse der Einzelanlagen nach Möglichkeit mit Identifikationsnummern versehen und bei Erwähnung im Text in Fettdruck hervorgehoben (bspw. **ID 123**). Die Nennung dieser ID-Nummern ermöglicht dem Leser die Charakterisierung einer Anlage durch Kombination unterschiedlicher Ergebnisse oder charakteristischer Eigenschaften. Im Gegenzug wird, bspw. durch das bewusste Auslassen von Informationen oder der Rundung von Normleistungszahlen, darauf geachtet, eine Anonymisierung der konkreten Wärmepumpenfabrikate zu gewährleisten.

Entsprechend der Fehlerrechnung in Kapitel 3.5 ist eine Rundung der JAZ lediglich auf die erste Dezimalstelle sinnvoll. Dennoch werden im vorliegenden Bericht häufig zwei Nachkommastellen angegeben. Hierbei wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Fehlerrechnung die nach technischer Vorschrift maximal zulässigen Fehlergrenzen berücksichtigt. Hersteller geben häufig geringere Fehlergrenzen für ihre Produkte an.

Ferner sei darauf hingewiesen, dass die Wärmepumpen in diesem Bericht vereinfachend nur mit ihrer Wärmequelle (Außenluft, Raumluft, Erdreich) bzw. Wärmequellenanlage (Eisspeicher) näher bezeichnet werden. Eine Unterscheidung nach Wärmeträgermedium der Senke ist nicht notwendig, da alle Anlagen wasserführende Heizkreise nutzen.

Im Zuge der vierjährigen Messung wurden viele Messdaten gesammelt. Die zentralen Ergebnisse zur Effizienzanalyse sind im vorliegenden Bericht zusammengefasst. Weitere Analysen, bspw. zu den Anschalthäufigkeiten und Betriebszeiten, sollen im Nachgang erfolgen und anderweitig veröffentlicht werden.

¹ Ausnahme: ID 374, die für den Zeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 ausgewertet wird

3 Monitoring Konzept

3.1 Die Monitoring Prozessschritte

In diesem Kapitel werden die einzelnen Arbeitsschritte und die jeweils beteiligten Parteien vorgestellt. Hierbei ist darauf zu achten, dass auch das Fraunhofer ISE zehn Anlagen zur messtechnischen Untersuchung in das Projekt eingebracht hat. Bei diesen Anlagen wurden die einzelnen Schritte ausschließlich durch das Fraunhofer ISE ausgeführt.

Schritt 1 – Auswahl der Messobjekte

Entsprechend der geplanten Projekthinhalte und um die Untersuchung von „Exoten“ zu vermeiden, wurden auf dem Kickoff-Meeting gemeinsam mit allen Partnern Kriterien für die zu untersuchenden Messobjekte definiert. Bezüglich Gebäude und Wärmenutzungsanlagen wurden folgende Kriterien festgelegt:

- Baujahr: bis 1995
- Gebäudetyp: Einfamilienhaus (auch mit Einliegerwohnung)
- Wohnfläche: keine Einschränkungen
- Sanierungsstand: keine Einschränkungen
- Spez. Heizenergiebedarf: keine Einschränkungen
- Heizkreistemperatur: keine Einschränkungen
- Wärmenutzung: Raumheizung und Warmwasser
- Raumwärmeübergabe: keine Einschränkungen
- Speichereinbindung: keine Einschränkungen.

Im Hinblick auf das Heizungssystem wurde folgendes vereinbart:

- Betriebsmodi der Wärmepumpe: Raumheizung und Warmwasser oder je ein Gerät für jeden Betriebsmodus.
- Zulässige Wärmequellen: Außenluft, Erdreich und Grundwasser.
- Zulässige Wärmequellenanlagen bei Erdreichnutzung: Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, CO₂-Sonden, Direktverdampfung.
- Produktreife: Marktverfügbare Seriengeräte.
- Betriebsarten: monovalent, monoenergetisch oder bivalent.
- Zu monoenergetischen Systemen: auch Anlagen mit direktelektrischer Trinkwassererwärmung sind möglich.
- Zu bivalenten Systemen: Kombigerät oder zwei separate Geräte mit Systemregelung möglich (keine Anlage mit manueller Umschaltung); WP wird für Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt.
- Zusätzliche Wärmeerzeuger: keine Solarthermie, wenn möglich auch keine Kamin- oder Kachelöfen (Rücksprache mit ISE unter Nennung der vorgesehenen Deckung des Heizwärmebedarfs).

Wie im Kapitel 4 erläutert wird, mussten bezüglich einiger Kriterien Kompromissen eingegangen werden, allen voran bezüglich der zusätzlichen Wärmeerzeuger wie Kamin- oder Kachelöfen, deren Verbreitung größer war als ursprünglich angenommen.

Die Wärmepumpenanlagen wurden dem Fraunhofer ISE von den Wärmepumpenherstellern zur Aufnahme in das Projekt vorgeschlagen. Das Fraunhofer ISE hat entsprechend der Kriterienliste über die Aufnahme in das Projekt entschieden.

Schritt 2 – Stammdatenermittlung sowie Vorbereitung der Messung

Auf die Stammdatenermittlung mittels Fragebögen wird ausführlich im Kapitel 3.2 eingegangen. Die Fragebögen wurden vom Fraunhofer ISE entwickelt. Das Zusammentragen der Informationen lag in der Verantwortung der Wärmepumpenhersteller, die wiederum teilweise die Anlagenbetreiber eingebunden haben.

Auf Basis der von den Wärmepumpenherstellern bereitgestellten Hydraulikschemas sowie Stromlaufpläne der Wärmepumpe hat das Fraunhofer ISE die erforderlichen Messpunkte definiert, die Messtechnik beschafft und diese zusammen mit einer individuellen Installationsanleitung den Installateuren Verfügung gestellt. Die Messtechnik wurde im Auftrag der Wärmepumpenhersteller von einer ortsansässigen Fachfirma installiert. Parallel wurde von Seiten des Fraunhofer ISE das Messdatenerfassungssystem konzipiert, aufgebaut, verdrahtet und technisch geprüft.

Schritt 3 – Prüfung der Messtechnik und Inbetriebnahme der Messung

Im Rahmen eines Vor-Ort Termins prüften Mitarbeiter des Fraunhofer ISE die korrekte Installation der Messtechnik und schlossen diese an das Messdatenerfassungssystem an. Bei diesem Termin waren in der Regel ein Werksmonteur des jeweiligen Wärmepumpenherstellers sowie der ausführende Installateur anwesend. Dies ermöglichte die Prüfung der Zuordnung der einzelnen Verbraucher zu den Sensoren mittels Relais test sowie die sofortige Behebung etwaiger Fehler. Zudem wurde vor Ort die prinzipielle Plausibilität der Messdaten überprüft.

Die Messdaten werden (bis zu einem Jahr) lokal gespeichert und mehrmals täglich via GSM-Funk an das Fraunhofer ISE übertragen.

Schritt 4 – Speicherung und Auswertung der Messdaten

Vom Messdatenerfassungssystem jeder Anlage wurde mehrfach täglich der Rohdatensatz des vergangenen Tages per gesicherter GSM-Verbindung durch den Server des Fraunhofer ISE angefragt und bei erfolgreichem Verbindungsaufbau auf diesen übertragen. Ein Zwischenspeicher vor Ort verhinderte bei Verbindungsproblemen von bis maximal einem Jahr den Ausfall von Messdaten.

Ebenfalls täglich wurden die Rohdaten vom sogenannten Filtrationsserver abgefragt. Auf diesem Server arbeitete die Software DataStorage. Diese dient der geordneten Messdatenspeicherung sowie –filterung. Bereits definierte sowie weiterentwickelte Filter¹ errechnen bspw. aus den Impulszählerständen der Elektrozähler die Minutenwerte für Energie und Leistung. Gleichzeitig wurden die einzelnen Sensoren mit lesbaren Bezeichnungen versehen. Sowohl die Rohdaten als auch die gefilterten Daten wurden mit entsprechendem Zeitstempel in einer sogenannten hdf5 Datenbank abgelegt. Bei Datenverzug wurde die Anlage mit der Dauer des Verzuges in einer automatisch generierten Email den Projektmitarbeitern des Fraunhofer ISE gemeldet.

Der sogenannte Projektserver diente in erster Linie der manuellen Datenauswertung. Die Basis bildeten die gefilterten Tageswerte, die bspw. auch Arbeitszahlen und thermische Abtauenergie bei Prozessumkehr sowie Takt- und Pausenzeiten des Verdichters umfassten. Im Rahmen der monatlich erfolgten manuellen Messdatenüberprüfung

¹ „Filter“ bezeichnet in diesem Bericht eine logische oder mathematische Funktion zur Umrechnung einer Zeitreihe von Werten.

wurden die Tageswerte automatisiert in eine Excel-Tabelle pro Anlage eingelesen. Diese Tabellen dienten der grundsätzlichen Charakterisierung der Anlagen im Hinblick auf Betriebsbedingungen und Performance. Die vergleichende Auswertung wurde ebenfalls auf Excel Basis durchgeführt. Hierfür wurden die gefilterten Messdaten (Tages-, Monats- und Jahreswerte) der einzelnen Anlagen in einer gemeinsamen Tabelle zusammengefasst.

Tasks 5 – Ergebniskommunikation

Im Rahmen dieses Schrittes wurden die Projektergebnisse zielgruppenspezifisch aufbereitet und kommuniziert. Die teilnehmenden Wärmepumpenhersteller erhielten Zugriff auf die Messdaten der von ihnen eingebrachten Anlagen. In der Members Area der Projekt-Homepage wurden zudem neben projektrelevanten Dokumenten, wie Installationsanleitungen oder Protokolle, auch sämtliche Ergebnisse bzw. Veröffentlichungen mit Bezug zum Projekt zur Verfügung gestellt.

Die Anlagenbetreiber erhielten Zugriff auf die visuell aufbereiteten Messdaten ihrer eigenen Anlage.

Die öffentliche Kommunikation der Ergebnisse erfolgte u.a. im Rahmen diverser Konferenzbeiträge oder Fachartikel, worauf im Kapitel 7 näher eingegangen wird. Darüber hinaus wurden Zwischenergebnisse sowie die kontinuierlich aktualisierten Messdaten inkl. Anlagenbeschreibungen von fünf Außenluft- und drei Erdreich-Wärmepumpen auf der Projekt-Homepage¹ zur Verfügung gestellt.

3.2 Stammdatenerhebung

Zu Projektbeginn erfolgte - analog wie in den vorherigen Monitoringprojekten („WP Monitor“ u.a.) eine Erhebung von Stammdaten in Form von Fragebögen, welche vorab gemäß den hier adressierten Projektzielen sowie der technologischen Entwicklung aktualisiert wurden. Diese bestehen aus drei Teilen und dienen der Abfrage folgender Informationen:

- Bewohner und Haus:
Nutzer, Gebäudetyp, Heizwärmebedarf, Heizwärmeverteilsystem, Termine.
- Die Haustechnik:
Kontakt Installateure, Anlagenschema, Wärmespeicher, Wärmepumpe, weitere Komponenten.
- Die Wärmepumpe im Detail:
Zusätzliche Angaben zur Wärmepumpe (Verdichter, Kältemittel, COP auf Teststand, Heizleistung), geplante Volumenströme, nähere Informationen zur Wärmequelle.

¹ wp-monitoring.de/wp-smart-im-bestand

Ergänzend wurden im Rahmen dieses Projektes Angaben zu den – am Gebäude und an der Heizungstechnik - durchgeführten Sanierungsmaßnahmen erhoben. Die Datenerhebung erfolgte in einem zweistufigen Prozess:

- Fragebogen zu den Sanierungsmaßnahmen (qualitative Angaben), der von den Bewohnern ausgefüllt wurde:
 - Gebäudegeometrie, Aufbau der bauteilumschließenden Flächen im Originalzustand, Sanierungsmaßnahmen.
 - Wärmeversorgung (Wärmeerzeuger, -verteilung und -übergabesystem) im Originalzustand, Sanierungsmaßnahmen
- Telefoninterview zur Detailierung der Datenerhebung, ggf. ergänzt durch Gebäudedokumentationen.
 - Aufbau der bauteilumschließenden Flächen im Originalzustand, Sanierungsmaßnahmen (quantitative Angaben),
 - Wärmeversorgung im Originalzustand, Sanierungsmaßnahmen (Klärung von Rückfragen)
 - Ggf. Rückfragen zu beheizter Fläche, Nutzung dezentraler Wärmeerzeuger (Kaminöfen u.a.)

Bei 48 Objekten beteiligten sich die Bewohner an der Datenerhebung der Sanierungsmaßnahmen. Den Bewohnern lagen in unterschiedlichem Umfang und Detailtiefe Informationen zu ihren Gebäuden vor. Die Methodik zur Aufbereitung und Auswertung der erhobenen Gebäudedaten ist im Kapitel 3.3 beschrieben. Die Ergebnisdarstellung der Analyse erfolgt in Kapitel 4.2.3.

3.3 Methodik zur Bewertung der Gebäude

Zur vergleichenden Analyse der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen sowie des heutigen energetischen Zustandes der Gebäudehülle wurde im Rahmen von „WPsmart im Bestand“ ein *Gebäudekennwert* entwickelt. Die Definition des *Gebäudekennwertes* wird in diesem Kapitel vorgestellt, ebenso wie die Methodik zur Aufbereitung der erforderlichen Gebäudedaten.

Im Rahmen der Stammdatenerhebung (vgl. Kapitel 3.2) wurden Informationen zum Aufbau der Gebäudehülle im Originalzustand sowie der erfolgten Sanierungsmaßnahmen erhoben. Ein Ziel der Datenerhebung war die Ermittlung der bauteilspezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Hauptbauteile der thermischen Gebäudehülle (Außenwand, Fenster, Dach bzw. oberste Geschossdecke, Keller bzw. unterste Geschossdecke). Die Flächen der einzelnen Bauteile wurden nicht ermittelt, da bei Bestandsgebäuden den Bewohnern hierzu teilweise keine Unterlagen vorlagen und eine Ermittlung im Rahmen des Projektes zu aufwändig gewesen wäre.

Die von den Bewohnern angegebenen Gebäudeinformationen basieren auf qualitativ unterschiedlichsten Grundlagen, die von mündlichen Angaben mit groben Einschätzungen bis hin zu schriftlichen Nachweisdokumenten (Baupläne, EnEV-Berechnungen, u.a.) reichen. Anhand von Art, Umfang und Qualität der erhobenen Daten wurde die Datengüte bewertet und geprüft, ob fehlende Angaben mit „typischen“ Werten aus der Literatur mit vertretbarer Unsicherheit des Ergebnisses ergänzt werden können. So waren u.a. bei der Grundkonstruktion der Außenwände, ebenso wie bei der Dämmung den Bewohnern teilweise nur der Materialtyp, nicht aber der Wert der Wärmeleitfähigkeit bekannt. Auch die Angaben der Fenster bezogen sich oftmals nur auf den Typ. Bei fehlenden Angaben wurden die Wärmeleitfähigkeit bzw. U-Werte anhand der Bewohnerangaben und den für das (Ein-)Baujahr typischen Werten angesetzt (Diefenbach und Clausnitzer 2010), (Jagnow 2003), (Klauß et al. 2009), (Loga et al. 2004), (Loga et al. 2005), (Loga et al. 2015). Angaben zu Kellerwand/-boden bzw. der unteren Geschossdecke fehlte bei der Mehrzahl der Objekte. Daher wird der untere Gebäudeabschluss

bei der Gebäudebewertung nicht berücksichtigt. Bei vier der im Rahmen der Stammdatenerhebung der Sanierungsmaßnahmen erhobenen Daten war die Datenbasis auch bei Außenwand, Dach und/oder Fenster nicht ausreichend, um daraus U-Werte ableiten zu können. Für 45 Gebäude konnten die U-Werte von Dach, Fenster und Außenwand ermittelt und der *Gebäudekennwert* bestimmt werden.

Diese Werte bilden die Grundlage zur Bestimmung der drei Bauteilkennwerte (Außenwand, Fenster, Dach bzw. oberste Geschossdecke (im Folgenden kurz: Dach)) und des *Gebäudekennwertes* zur Charakterisierung der energetischen Gebäudequalität im Bauzustand und im heutigen Zustand.

Der *Gebäudekennwert* gibt einen flächengewichteten mittleren U-Wert von Außenwand, Fenster und Dach wieder. Hierbei werden die U-Werte der jeweiligen Bauteilmaterialien berücksichtigt; Wärmebücken fließen in die Betrachtung nicht mit ein.

$$\text{Gebäudekennwert} = \frac{U_W * A_W + U_D * A_D + U_F * A_F}{A_W + A_D + A_F} \quad (1)$$

Die Flächenermittlung erfolgt anhand eines Referenzgebäudes. Dieses wurde auf Basis der Häufigkeitsverteilung von Etagenanzahl, Beheizungsgrad Keller und Dach sowie der Gebäudefläche der im Projekt vorhandenen Gebäude festgelegt. Das Referenzgebäude ist ein freistehendes Gebäude mit einem Vollgeschoss und einem beheizten Dachgeschoss bei einer beheizten Gesamtfläche von 145 m². Die Bauteilflächen wurden mit einem vom Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) entwickelten Verfahren zur Flächen-schätzung festgelegt (Loga et al. 2005). Es ergeben sich folgende Gewichtungsfaktoren:

- Außenwand: 50 %
- Dach: 41 %
- Fenster: 9 %.

Zur Einordnung der U-Werte der drei Bauteile und des ermittelten *Gebäudekennwertes* wurden die Grenzwerte der Wärmeschutzverordnungen (1. WSchV 1977)¹ und (3. WSchV 1995)² herangezogen und jeweils sieben Klassen gebildet (vgl. Abbildung 1). Die Klassen 2 (mittelgrün) und 3 (hellgrün) umfassen Werte, die (gering) über bzw. unter dem Grenzwert der Wärmeschutzverordnung '95 liegen und die Klassen 4 (hellorange) und 5 (dunkelorange) Werte um den Grenzwert der WSchV'77. Die Klassen 1 (dunkelgrün), 4 (gelb) und 7 (rot) entsprechen Werten, die unter, zwischen bzw. über den eben genannten Bereichen liegen.

¹ In der WSchV'77 ist ein Grenzwert für Außenwand inkl. Fenster aufgeführt (1,45 W/(m²*K)) für Gebäude mit Gebäudelänge < 15m) sowie für Fenster (3,5 W/(m²*K)). Unter Annahme eines Fensteranteiles von 17% wurde ein Grenzwert für die Außenwand ermittelt.

² Verwendet wurden die Grenzwerte bei erstmaligem Einbau, Ersatz und bei Erneuerung von Bauteilen nach Tabelle 1 Anlage 2 der WSchV 1995

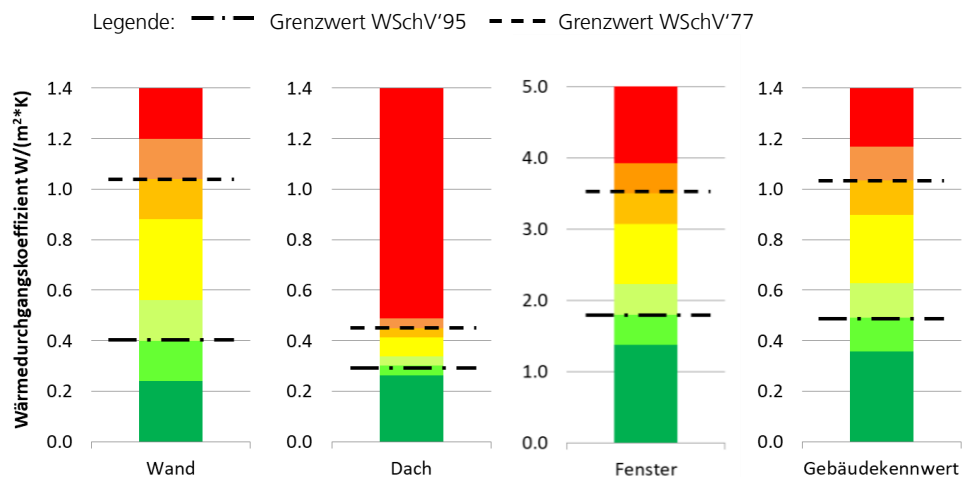


Abbildung 1: Kategorisierung der U-Werte der Bauteile und des *Gebäudekennwertes*

3.4 Messtechnik

Dieser Abschnitt widmet sich den zu vermessenden Komponenten sowie den hierfür eingesetzten Messinstrumenten. Die Fehlergrenzen der Messtechnik werden im folgenden Kapitel 3.5 erläutert.

Für die fundierte Effizienzanalyse wurden neben den von der Wärmepumpe bereitgestellten thermischen Energie zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung (sowie teilweise auch nach Speichern), soweit möglich, folgende Elektroenergieverbraucher bilanziert:

- Verdichter und Steuerung
- Antrieb in der Wärmequelle (Ventilator oder Solepumpe)
- Elektroheizstab

Einerseits um zusätzliche Informationen über die Anlagen zu erlangen und andererseits um die Ermittlung der Effizienz überhaupt zu ermöglichen, musste eine erheblich größere Anzahl an Messstellen berücksichtigt werden. Letztgenannter Aspekt ist darauf zurückzuführen, dass sich aufgrund der elektrischen Verschaltungen in den Wärmepumpen nicht immer alle gewünschten Komponenten separat messtechnisch erfassen lassen. Dies trifft bspw. häufig auf die Vermessung der Steuerung zu, da zusammen mit der Steuerung i.d.R. auch eine Vielzahl von Pumpen erfasst wird. Nachfolgend werden, unterschieden nach den Messinstrumenten zur Ermittlung der thermischen sowie der elektrischen Energie, die im Feld aufgetretenen Messstellen genannt.

Wärmemengenzähler

Tabelle 1: Aufgetretene Positionen für den Einsatz von Wärmemengenzählern

Wärmequelle	Wärmesenke
Sole- oder Wasserkreis bei Erdreich-Wärmepumpen	Gemeinsamer Ladekreis (Trinkwasser und Raumheizung / Pufferspeicherbeladung)
Solekreis zur getrennten Außeneinheit bei Luft-Wärmepumpen	Trinkwasserspeicherladekreis
Solarkreis zum Trinkwasser-, Heizungs- puffer- oder Kombispeicher	Trinkwarmwasserzapfung

Solkreis zur Quellenregeneration (Eispeicher)	Trinkwasserzirkulation
	Heizungspufferspeicherladekreis
	Raumheizungskreis
	Kreis der passiven Kühlung
	Eintrag des Kessels in den gemeinsamen Ladekreis
	Eintrag des Kessels in die Raumheizung/Pufferspeicherbeladung
	Eintrag des Kessels in den Trinkwasserspeicherladekreis
	Wärmeaustauschkreis zwischen Pufferspeicher zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung (solare Überschüsse)

Elektroenergiezähler

Tabelle 2: Aufgetretene Positionen für den Einsatz von Elektrozählern

Verdichter (inkl. Inverter und Transformator; ggf. inkl. Wärmequellenantrieb oder Steuerung der Wärmepumpe)	Ladepumpe für Heizungspufferspeicher
Antrieb im Wärmequellenkreis (Ventilator, Solepumpe)	Gemeinsame Ladepumpe für Trinkwasserspeicher und Heizungspufferspeicher
Steuerung der Wärmepumpe (je nach Verschaltung inkl. Energie für weitere Pumpen, sowie der Außeneinheit bei Splitgeräten)	Heizkreispumpe(n)
Steuerung der Solaranlage (je nach Verschaltung inkl. Energie für die Solarpumpe)	Solkreispumpe
Steuerung der passiven Kühleinheit (je nach Verschaltung inkl. Energie für die Pumpe zur passiven Kühlung)	Pumpe zur passiven Kühlung
Steuerung des Kessels (je nach Verschaltung inkl. Energie für die Kessel-Ladepumpe)	Gemeinsame Ladepumpe des Kessels für Trinkwasserspeicher und Heizungspufferspeicher
Externe, geräteunabhängige Regeleinheiten	Zirkulationspumpe
Elektroheizstab (im gemeinsamen Wärmepumpenvorlauf, im Trinkwasserspeicher, im Pufferspeicher)	Pumpe zur Umwälzung im Trinkwasserspeicher (Legionellenvermeidung)
Ladepumpe für Trinkwasserspeicher	
Ladepumpe für Trinkwasserspeicher trinkwasserseitig / Frischwasserstation (inkl. Pumpe frischwasserseitig)	

Temperatursensoren (nicht als Teil des Wärmemengenzählers)

- Außenluft (an der Nordwand des Gebäudes)

Ausnahmen hinsichtlich der Messstellen traten insbesondere bei folgenden Konfigurationen auf:

- Direktkondensation im Trinkwasserspeicher (keine Vermessung der Beladung),
- Kompaktgeräte (teilweise keine Vermessung der Beladung des integrierten thermischen Speichers),
- Fehlende Möglichkeit der Installation eines Temperatursensors zur Ermittlung der Außenlufttemperatur (in solchen Fällen wurden auf Messdaten der nächst gelegenen Wetterstation der Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen).

3.4.1 Elektroenergiezähler

Auf Seiten der elektrischen Messgrößen wurden Stromzähler eingesetzt, die über ein mechanisches Zählwerk sowie einen Impulsausgang verfügen. Je nach Verbraucher wurden Wechsel- oder Drehstromzähler eingebaut. Die Nennleistung der zu vermessenden Komponenten gab die notwendige Auflösung hinsichtlich der Impulse pro Kilowattstunde vor. Das Ziel dieser Abstimmung war die Ermittlung von Minutenwerten der elektrischen Größen, um das Systemverhalten relativ präzise abbilden zu können. Verwendet wurden Elektrozähler mit Auflösungen von 1.000 und 10.000 Impulsen pro Kilowattstunde.



Abbildung 2: Wechsel- (links) und Drehstromzähler (rechts) von EMU Elektronik AG (Quelle: EMU Electronic AG)

In den Anlagen wurden Elektrozähler der Firmen EMU Elektronik AG und der Dornschmidt GmbH eingesetzt. Diese Elektroenergiezähler wurden in Wechsel- und Drehstromausführung in Abbildung 2 dargestellt. Entsprechend den Anforderungen durch die zu vermessende Anlage, wurden die notwendigen Elektrozähler ausgewählt und in einem Elektrozählerkasten zusammengefasst. Für eine Beispielanlage wird ein Foto eines Elektrozählerkastens in der Abbildung 6 auf Seite 29 dargestellt.

3.4.2 Wärmemengenzähler

Wärmemengenzähler bestehen aus einem Durchflusssensor, einem Temperaturfühlerpaar sowie einem Rechenwerk. Das Rechenwerk ermittelt über den Volumenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie gespeicherten, temperaturabhängigen Stoffwerten, die Energie- und Leistungsgrößen. Zur Temperaturmessung kamen nach DIN EN 1434-1 paarweise kalibrierte PT100 Temperatur-Sensoren zum Einsatz. Das Rechenwerk musste mit einer M-Bus Schnittstelle ausgestattet sein. Bei der Auswahl der Komponenten für die Ermittlung des Volumenstroms wurde bereits im Vorfeld des Projektes eine intensive Analyse und Bewertung verfügbarer Messtechnik

unternommen. Dabei wurden Flügelrad- und Ultraschall- sowie magnetisch-induktive Durchflusssensoren und Ringkolbenzähler näher betrachtet. Zu bewerten galten unter anderem die jeweiligen Messbereiche, die Genauigkeiten, der Platzbedarf sowie die Einsatzbereiche hinsichtlich der zu vermessenden Medien. Die letztlich ausgewählten Komponenten für den Wärmemengenzähler werden nachfolgend erläutert.

Einen Überblick über die verwendeten Instrumente der Firma Elster Messtechnik GmbH zur Vermessung der Wärmemenge gibt die Abb. 5. Alle wärmesenkenseitigen Messpositionen ohne Trinkwassereignung wurden jeweils mit Ultraschall-Wärmemengenzähler des Typs F 96 sowie dem Nachfolgemodell F 96+ ausgestattet. Der F 96 und der F 96+ sind die einzigen im Feldtest verwendete Wärmemengenzähler mit integriertem Rechenwerk. Für Positionen, die eine Trinkwassereignung erforderten, kamen Ringkolbenzähler sowie das Rechenwerk F 22 zum Einsatz.



Abbildung 3: von links oben, Ultraschall-Wärmemengenzähler F 96, Industriezähler Typ MTH-I, Ringkolbenzähler, Rechenwerke F 22 und MF 4 (Quelle: Elster Messtechnik GmbH)

Die Wärmequellenseite wurde auf Grund der Glykol-Beimischungen im Wasser mit Industriezählern der Bauart MTH-I und dem Rechenwerk MF 4 vermessen. Bei solarthermischer Unterstützung der Wärmepumpe wurde die zusätzliche Energie mit Hilfe von einstrahligen Flügelradzählern vom Typ ETDA-KGmHM und Rechenwerken des Typs F 4 erfasst.

3.4.3 Gas- und Ölzähler

Bei Anlagen die neben einer Wärmepumpe auch über einen Gas- oder Ölbrenner verfügen, mussten die jeweiligen Brennstoffverbräuche erfasst werden.

Zur Erfassung der Ölolumina wurden Zähler vom Typ VZD der Firma Aquametro AG eingesetzt. Diese wurden über das Rechenwerk CALEC ST in die M-Bus-Kette eingebunden.

Die Erfassung der Gasverbräuche gestaltete sich insofern schwieriger, da die Gaszähler der Verwaltung des örtlichen Messstellenbetreibers obliegen. Eine Einflussnahme auf die Gasmesstechnik erwies sich als praktisch nicht umsetzbar. Daher mussten fallab-

hängig die vorhandenen Gaszähler an das Messsystem angebunden werden. Die erarbeiteten Lösungen können in drei Gruppen gegliedert werden.

- Gaszähler mit digitaler Schnittstelle (M-Bus, ModBus, CanBus, etc.),
- Gaszähler mit Magnetscheibe,
- Gaszähler ohne Schnittstelle.

Gaszähler, die über eine digitale Schnittstelle verfügen, wurden bei den im Projekt untersuchten Anlagen nicht angetroffen.

In einigen Fällen war die Zählscheibe des Gaszählers mit einem Magneten bestückt. Dieser ermöglicht das Erfassen einer Zählscheibenumdrehung über einen, dem Zähler aufgesetzten, magnetischen Schaltkontakt. Jede Umdrehung entsprach einem Gasverbrauch von 0,001 m³. Dieser „Reed“-Kontakt wurde über einen Wago-Feldbus erfasst. Abbildung 4 zeigt exemplarisch einen installierten Reed-Kontakt.



Abbildung 4: Gaszähler mit Reed-Kontakt

Für die Erfassung des Verbrauches bei Gaszähler ohne Schnittstellen, wurde die Fast Energy Cam der Firma Fastforward AG eingesetzt. Diese Kamera wird dem Schauglas des Zählers aufgesetzt. Sie wandelt den optisch erfassten Zählerstand über eine integrierte Texterkennungssoftware in einen digitalen Wert um. Dieser Wert konnte mittels ModBus vom Messdatenerfassungssystem abgefragt werden.

3.4.4 Temperaturfühler

Zur Ermittlung der Außenluft-, sowie Raumluft- oder Speicherwandtemperaturen kamen Temperaturfühler Pt100 mit 4-Leiter-Schaltung zum Einsatz. Die von den Außenlufttemperatursensoren gelieferten Werte wurden mit Messdaten von nahegelegenen Messstationen des Deutschen Wetterdienstes verglichen. Bei deutlich anderem Verhalten (und wenn kein Temperatursensor installiert werden konnte) wurde auf die Messdaten des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen, wobei folgende Anlagen betroffen waren: **ID 308, ID 327, ID 336, ID 349, ID 350, ID 357, ID 360, ID 366, ID 370, ID 374.**

3.5 Fehlergrenzen der Messtechnik

In diesem Abschnitt wird eine vollständige Fehlerrechnung für eine beispielhafte, 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 Drehstromzähler erfasst.

Nach DIN EN 1434-1 ergibt sich die Fehlergrenze eines vollständigen Wärmezählers 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:

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

Für das Temperaturfühlerpaar ergibt sich der Fehler zu:

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

Für den Volumenstromsensor ergibt sich der Fehler zu:

$$E_V = 3 + 0,05 * \frac{q_p}{q} \quad (4)$$

Der für diese Berechnung herangezogene Wärmemengenzähler F96+ benötigt eine minimale Temperaturdifferenz $dt_{\min}$ von 3 K und hat einen Nennvolumenstrom q_p von 2,5 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:

$$AZ = \frac{Q_{th}}{W_{el}} \quad (5)$$

mit

$$Q_{th} = V * \rho * c_p * \Delta T * t \quad (6)$$

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:

$$AZ = \sqrt{\left(\frac{\partial AZ_3}{\partial c_p} * \Delta c_p\right)^2 + \left(\frac{\partial AZ_3}{\partial \rho} * \Delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial AZ_3}{\partial dT} * \Delta dT\right)^2} \\ + \sqrt{\left(\frac{\partial AZ_3}{\partial V} * \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial AZ_3}{\partial E_{el}} * \Delta E_{el}\right)^2} \quad (7)$$

mit

$$V = \dot{V} * t \quad (8)$$

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	5,0	K
	Volumenstrom	1,05	m³/h
	Laufzeit t	1800	h
Elektrozähler	elektrische Arbeit	2600	kWh

Entsprechend oben gezeigter Formeln 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 Tabelle 4.

Tabelle 4: Ausgangswerte sowie die Ergebnisse für relative und absolute Fehler der Teilgrößen sowie der Arbeitszahl 3

Größe	Formelzeichen	Fehlergrenze	gemessener Wert	Einheit	Abs. Fehler	relativer Fehler
Temperaturdifferenz	dT	E _t	5,0	K	0,12	2,3 %
Volumenstrom	$\dot{V}$	E _V	1,05	m³/h	0,03	3,0 %
Wärmekapazität Wasser	c _p	E _c	4186,0	J/(kg*K)	46,05	1,1 %
Dichte Wasser	ρ	E _c	998,2	kg/m³	10,98	1,1 %
elektrische Energie	E _{el}	E _p	2600,0	kWh	52,00	2,0 %
Arbeitszahl 3	AZ3	-	4,2	-	0,19	4,4 %

Für die Berechnung der Arbeitszahl ergibt sich demnach ein maximaler Fehler von 4,4 %. 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.

3.6 Das Messdatenerfassungssystem

Dieser Abschnitt beschreibt die Datenerfassung und -speicherung vor Ort sowie die Übertragung der Rohdaten zur weiteren Auswertung an das Institut.

Das Messdatenerfassungssystem (MDES) hat folgende Aufgaben:

- Abfrage der Messtechnik (minütlich)
- Speichern der Messwerte (bis ca. ein Jahr)
- Anbindung per Mobilfunk (bei schlechtem Empfang: DSL)

Das MDES stellt somit, entsprechend der Abbildung 5, die Kommunikationseinheit zwischen den einzelnen Wärmemengenzählern, den Elektrozählern sowie dem Server am Institut dar.

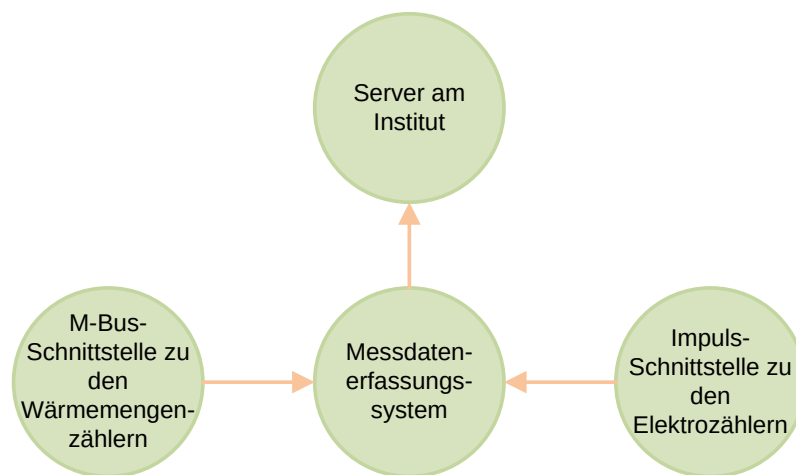


Abbildung 5: schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Messtechnik, Messdatenerfassungssystem und Institutsserver

Das MDES im Zentrum der Grafik 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 Minutentakt von den Wärmemengen- und Elektrozählern abzufragen. Diese Messwerte werden in einer Datei für jeden Messtag abgespeichert. Der Server des Fraunhofer ISE fragt das MDES mehrfach täglich nach neuen Datensätzen ab und überträgt diese an das Institut. Die Wärmemengenzähler sind über ihren M-Bus-Ausgang mit dem Embedded System verbunden, welches mittels Skript im Minutentakt folgende Daten abfragt:

- Vor- und Rücklauftemperatur in °C
- Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur in K
- Volumenstrom in dm³/h
- Leistung in kW
- Energiemenge in kWh

Entsprechend den M-Bus-Funktionen sind die einzelnen Wärmemengenzähler für die Zuordnung mit ID-Nummern versehen. Die Abfrage der Messwerte erfolgt seriell von der ersten bis zur letzten ID eines Systems.

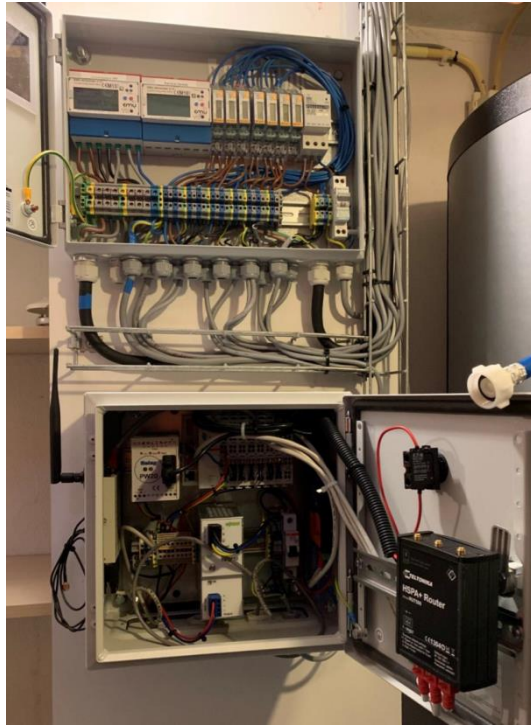


Abbildung 6: Elektroählerkasten (oben) und Messdatenerfassungssystem (unten)

Zum Auslesen der Elektroähler wird deren Impuls Ausgang von einem WAGO-System überwacht. Der Zählerstand wird vom Embedded System über eine TCP/IP Schnittstelle jede Minute abgefragt. Die täglich übermittelten Rohdaten umfassen keine elektrischen Größen, sondern minütliche Impulszählerstände. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein Messdatenerfassungssystem im Einsatz.

3.7 Erweiterung des Monitoring-Konzeptes zur Untersuchung der Lastflexibilität

In diesem Kapitel wird dargestellt, welche Erweiterungen das in den vorherigen Unterkapiteln vorgestellte Monitoring-Konzept erfahren hat.

Um die mögliche Lastflexibilität von Wärmepumpen untersuchen zu können, war eine Umwandlung von einer ursprünglich reinen Messdatenerfassung hin zu einem Energiemanagementsystem nötig. Daher wurden für die zu untersuchenden Anlagen eine andere Software und Hardware, bis auf die Sensoren, ausgewählt.

3.7.1 Erweiterung der Messtechnik

Zur Ermittlung der Speicherkapazitäten wurden die Anlagen zusätzlich mit Temperatursensoren am Heizungspufferspeicher sowie Trinkwasserspeicher ausgestattet. Eine Abschätzung der zusätzlichen Speicherverluste infolge erhöhter Speichertemperaturen sollte eine zusätzliche Einbringung von Temperatursensoren am Aufstellort der jeweiligen Speicher ermöglichen.

3.7.2 System

Das System besteht aus einem Server und den einzelnen Feldanlagen. Die Feldanlagen sind am Server über eine OpenVPN Tunnel angebunden. Über den Tunnel werden alle Messdaten vom Server in fünf Minuten Intervall abgeholt. Wenn neue Fahrpläne vom

Server berechnet wurden werden diese vom Server über REST/JSON an die Anlagen gesendet. Die Abbildung 7 zeigt ein grobes Schema des Systems.

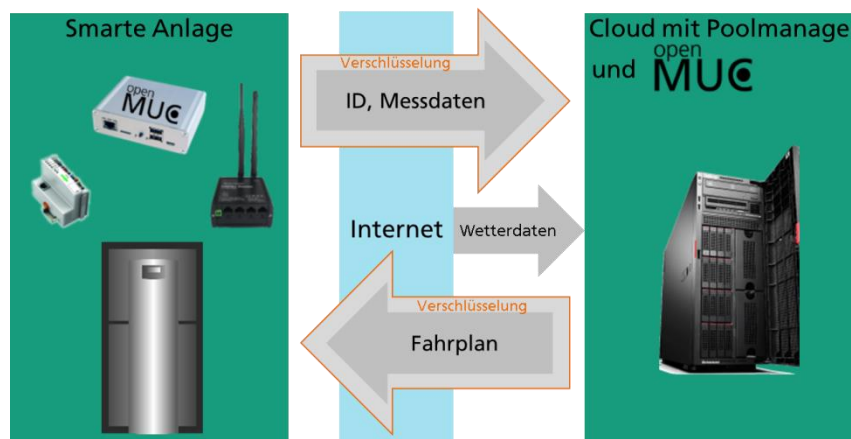


Abbildung 7: Komponenten und Kommunikationsstruktur Feldmesssystems bei Untersuchung der Lastflexibilität

3.7.3 Server

Der Server besteht aus dem OpenVPN für eine verschlüsselte Datenübertragung, einen OpenMUC zur Kommunikation mit den Anlagen und dem zentralen Optimierer, der die Fahrpläne für die Anlagen zusammenstellt.

3.7.4 Feldanlage

Die Feldanlagen erhielten leistungstärkere und auf ARM basierende Embedded Systems. Auf diesen Linux-betriebenen Embeddeds wurde zur Messdatenerfassung und Ansteuerung der Wärmepumpen OpenMUC installiert. Die Messdaten werden vom Server abgeholt und Fahrpläne vom Server an das OpenMUC gesendet.

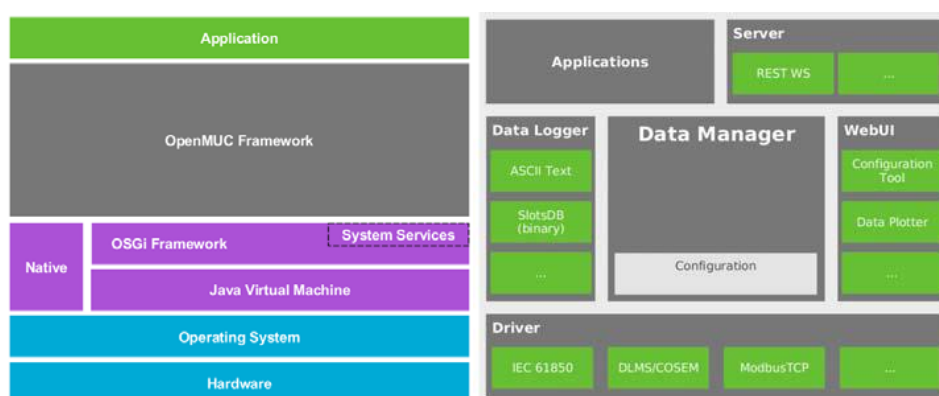


Abbildung 8: Struktur OpenMuc

OpenMUC ist ein modulares Energiemanagement Framework, das seit mehreren Jahren vom Fraunhofer ISE entwickelt wird und bereits mehrfach erfolgreich in Projekten eingesetzt wurde. OpenMUC ist in Java implementiert und setzt auf dem OSGi-Framework auf, das beispielsweise Software-Updates zur Laufzeit ermöglicht. Durch die Implementierung in Java ist der Einsatz von OpenMUC nicht auf eine bestimmte Hardware oder ein bestimmtes Betriebssystem beschränkt, sondern kann plattformunabhängig eingesetzt werden (Abbildung 8). OpenMUC ist so konzipiert, dass es auf

schlanken, stromsparenden Systemen betrieben werden kann und eignet sich daher als Gateway-Software für den Dauerbetrieb.

Zum Kern des Frameworks zählen das integrierte Datenlogging sowie eine Vielzahl von Treibern für gängige Kommunikationsstandards aus dem Smart Grid Bereich. Die wichtigsten Komponenten sind in Abbildung 8 dargestellt. Dank seiner Komponenten erleichtert OpenMUC das Entwickeln von individuellen Energiemanagementlösungen. Der Zugriff auf Datenpunkte unterschiedlichster Geräte wird durch eine einheitliche Schnittstelle abstrahiert, sodass Anwendungsentwickler keine detaillierten Kenntnisse über das jeweilige Kommunikationsprotokoll benötigen. Die Konfiguration und Datenvisualisierung kann über eine webbasierte Nutzerschnittstelle erfolgen. Für die Anbindung an Cloud-basierte System oder übergeordnete Steuerungsebenen werden entsprechende Server Module angeboten.

Für dieses Projekt wurde auf Basis von OpenMUC ein Controller geschrieben der verhindert, dass bei nicht vorhandenen oder abgelaufenen Fahrplänen ein für die Anwohner nicht zufriedenstellender Zustand der SG Ready Schnittstelle auftreten kann. Für die Ansteuerung der Wärmepumpen wird die SG Ready Schnittstelle genutzt. Diese besteht aus zwei Kontakten die mit Relais geschaltet werden und so vier Zustände annehmen kann. Das für die Impulsmessung vorhandene WAGO-System wurde um Relais-Klemmen erweitert, diese schalten die SG Ready Kontakte. Die Wärmepumpen besitzen darüber hinaus auch andere Kommunikationsschnittstellen, bspw. Modbus, über diese konnte auch ohne Relais das SG Ready geschaltet und dadurch teils auf eine zusätzliche Relais-Klemme verzichtet werden. Bei einigen Anlagen werden zusätzliche Messwerte aufgenommen, zum einen über wireless M-Bus die Raum- und Außentemperatur und Messwerte die die Sensoren der Wärmepumpe bereitstellt.

Alle Messwerte werden minütlich aufgezeichnet und alle fünf Minuten mit dem Server synchronisiert.

Die höhere Synchronisationsrate und der Empfang von Fahrplänen erfordert eine schnelle und dauerhafte Internetverbindung. Diese Anforderung wird mit einem neuen 3G Router erfüllt. Dieser stellt auch die OpenVPN Verbindung zum Server auf. In Abbildung 9 sind der Router sowie die Embedded zu sehen.

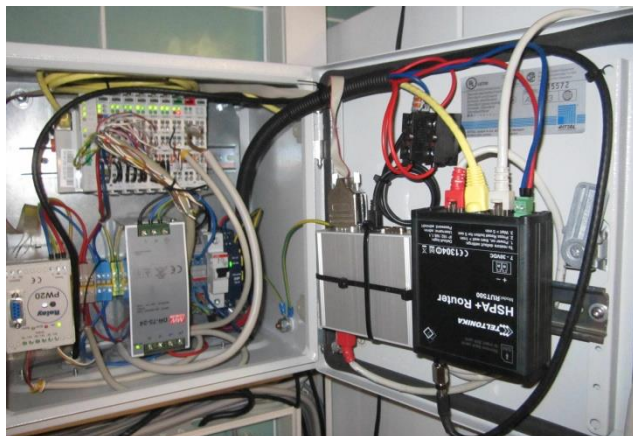


Abbildung 9: Messdatenerfassungssystem bei Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen

4

Charakterisierung der untersuchten Anlagen und Gebäude

4.1 Datenverfügbarkeit und Definition der Datenbasis

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wurden die Anlagen während der Projektlaufzeit sukzessive zur Messung angemeldet. Diesen kontinuierlichen Zuwachs verdeutlicht die Abbildung 10. In der Grafik wird die Anzahl der Anlagen dargestellt, die im jeweiligen Monat messtechnisch untersucht wurden. Die farbliche Unterscheidung dient der Trennung nach den Wärmequellen Außenluft, Außenluft und Raumluft, Erdreich sowie den Systemen mit Eisspeicher (vgl. Kapitel 4.3). Es ist deutlich, dass Anlagen mit der Wärmequelle Außenluft dominieren. Aus der Grafik geht auch die Anzahl der smart betriebenen Wärmepumpen (vgl. Kapitel 6) hervor. Zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen im Feld wurden hierfür bis Juni 2018 neun Wärmepumpen von Seiten des Fraunhofer ISE extern angesteuert. Ab Juli 2018 wurde die smarte Ansteuerung beendet und die Anlagen konnten bei rein wärmegeführtem Betrieb weiter untersucht werden.

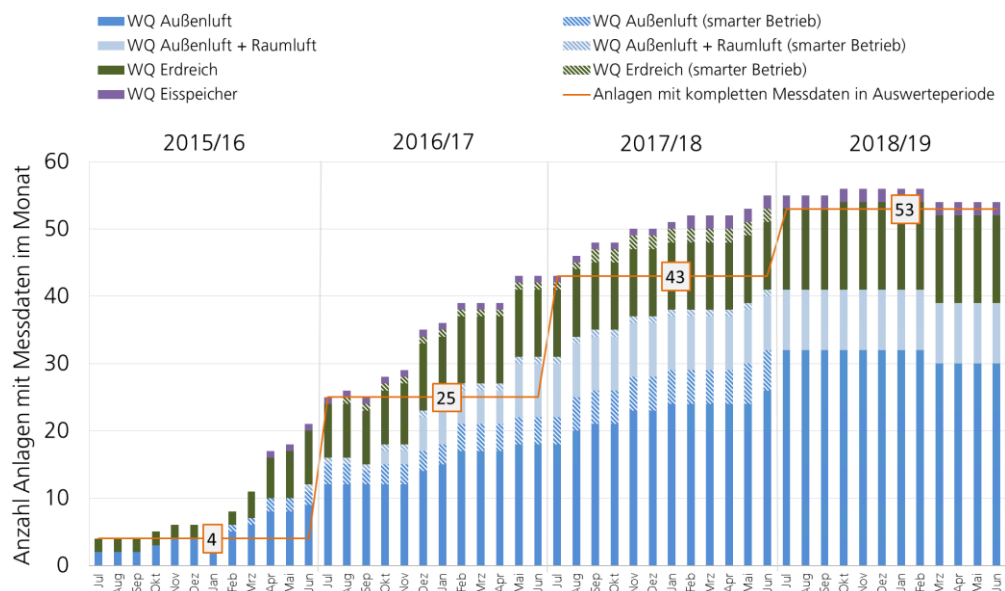


Abbildung 10: Anzahl der pro Monat untersuchten Anlagen, unterschieden nach Wärmequelle sowie smarten oder wärmegeführten Betrieb

Entgegen der Projektplanung wurde die Maximalzahl der auswertbaren Anlagen nicht zur Auswerteperiode 2016/2017 (25 Anlagen), sondern erst im Juni 2018 (56 Anlagen). Daher dient der Auswertungszeitraum 2018/2019 den Auswertungen der meisten Anlagen im vorliegenden Bericht als Basis.

Für eine fundierte Bewertung der Anlagen müssen Messdaten für einen ausreichend langen Zeitraum vorliegen. Die Abbildung 11 zeigt pro Monat sowie über die gesamte Auswerteperiode 2018/2019 die zur Verfügung stehenden Messdaten der oben genannten 56 Wärmepumpenanlagen. Über den kompletten Zeitraum und alle Anlagen hinweg liegt die Messdatenverfügbarkeit bei 98,4 %. 51 der 56 Anlagen verfügen über mindestens 98 % der Auswertungsperiode über Messdaten.

Wärmequelle	Indizes	Jul 18	Aug 18	Sep 18	Okt 18	Nov 18	Dez 18	Jan 19	Feb 19	Mrz 19	Apr 19	Mai 19	Jun 19	Gesamt
Eissp.	316	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	346	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	306	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
Erdreich	309	0%	0%	0%	88%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	74,0%
	310	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	324	100%	100%	100%	100%	97%	100%	98%	100%	93%	98%	96%	62%	95,3%
	328	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	331	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	333	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	337	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	343	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	363	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	365	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	369	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	375	100%	99%	97%	97%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	99,3%
Außenluft + Raumluft	308	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	317	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	318	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	326	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	336	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	348	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	357	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
Außenluft	358	96%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99,3%
	370	100%	100%	97%	91%	95%	100%	94%	100%	100%	100%	100%	100%	98,2%
	303	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	304	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	305	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	66,7%
	307	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	313	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99,9%
	315	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99,8%
	319	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	321	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	322	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	323	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	325	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	327	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99,9%
	329	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	330	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	99,6%
	339	100%	100%	100%	100%	89%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99,1%
	344	100%	100%	98%	94%	93%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98,7%
	345	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	349	100%	100%	62%	100%	100%	72%	79%	100%	100%	100%	100%	95%	92,4%
	350	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	351	100%	100%	100%	100%	100%	79%	69%	100%	100%	100%	100%	100%	95,7%
	352	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	353	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	354	100%	100%	100%	100%	100%	89%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	98,2%
	356	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99,9%
	360	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	364	100%	100%	100%	100%	100%	76%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98,0%
	366	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	367	99%	96%	100%	100%	100%	97%	98%	100%	100%	99%	98%	100%	98,9%
	368	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	371	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%
	374	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	99%	100%	100%	95%	99%	99,2%
	376	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%

Abbildung 11: Messdatenverfügbarkeit pro Anlage relativ zum Zeitraum der definierten Auswerteperiode sowie zum jeweiligen Monat bezogen auf die kontinuierliche Messung einer einheitlichen Wärmepumpenanlage (kein Austausch von Kompetenten mit signifikantem Einfluss auf die Effizienzbewertung)

Die Anlagen mit rot gekennzeichneten Indizes werden im Auswertungszeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 aus folgenden Gründen nicht berücksichtigt:

- 309: Einbau einer neuen Wärmepumpe im Oktober 2018,
- 305: Einbau einer neuen Wärmepumpe im März 2019 nach Defekt,
- 374: nicht repräsentativer Wärmepumpenbetrieb ab Februar 2019 nach Defekt.

Für diese Anlagen wird im Gegensatz zu den anderen 53 Anlagen der Auswertungszeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 gewählt. Die Auswertungen werden – aufgrund unterschiedlicher Witterungsbedingungen in den beiden Zeiträumen – jeweils gesondert dargestellt.

Die Anlagen mit grün gekennzeichneten Indizes werden trotz teils geringer Datenverfügbarkeit in einzelnen Monaten der Heizperiode (November 2018 bis März 2019; < 90 %) in der Gesamtauswertung berücksichtigt. Basis hierfür ist der dennoch geringe Einfluss der fehlenden Messzeiträume auf die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen.

Durch eine monatsbasierte, einfache Gewichtung der außerhalb der Fehlzeiten ermittelten thermischen und elektrischen Energien wurden folgende Differenzen zwischen den gemessenen und den auf Basis der Hochrechnung ermittelten Jahresarbeitszahlen festgestellt:

- 339: - 0,02 %
- 349: + 0,54 %
- 351: + 0,79 %
- 354: + 0,15 %
- 364: - 0,23 %

Somit werden in der Auswertung für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019 alle in der Abbildung 4 mit schwarzen oder grünen Indizes gekennzeichneten Anlagen berücksichtigt. Bezogen auf die Wärmequellen ergibt sich folgende Verteilung:

- 2 Anlagen mit Eisspeicher,
- 12 Anlagen mit Wärmequelle Erdreich,
- 9 Anlagen mit Wärmequellen Außenluft und Raumluft,
- 30 Anlagen mit Wärmequelle Außenluft.

Die Auswertung für die in der Abbildung 4 mit roten Indizes gekennzeichneten Anlagen erfolgt für den Zeitraum Juli 2017 bis Juni 2018. Bezogen auf die Wärmequellen ergibt sich folgenden Verteilung:

- 1 Anlage mit Wärmequelle Erdreich
- 2 Anlagen mit Wärmequelle Außenluft

In der nachfolgenden Charakterisierung der Datenbasis werden alle 56 Anlagen gemeinsam berücksichtigt.

4.2 Gebäude

4.2.1 Gebäudetyp und –fläche

In dem Projekt wurden Wärmepumpenanlagen in Einfamilienhäusern bzw. kleinen Mehrfamilienhäusern untersucht. Abbildung 12 zeigt die beheizte Fläche der Gebäude sortiert nach dem Gebäudetyp. Die Angabe der beheizten Fläche basieren – je nach Datenlage – auf Unterlagen zur Gebäudedokumentation oder auf den von den Bewohnern ausgefüllten Fragebögen, die, wenn möglich, in Telefoninterviews verifiziert wurden (vgl. Kapitel 3.2). Es wurde angestrebt, dass die beheizten Flächen in Anlehnung an die Wohnflächenverordnung (WoFIV) auf einer einheitlichen Berechnungsbasis zu ermitteln¹. Da nicht für alle Messobjekte die Berechnungsgrundlage der Bewohneran-

¹ Es werden alle direkt oder indirekt beheizten Räume innerhalb der thermischen Hülle der EG/OG/DG berücksichtigt, unabhängig davon, ob es ein Wohnraum oder ein anderer genutzter Raum, bspw. Büro, ist. Räume mit Dachschrägen: Die Fläche wird gemäß WoFIV berechnet. Beheizte Kellerräume werden berücksichtigt. Kellerräume, sowie separate Räume „außerhalb“ des Gebäudes (bspw. ausgebaute Garage), in denen ein Wärmeübergabesystem eingebaut ist, die laut Auskunft der Nutzer jedoch – nahe zu* – nie beheizt werden, werden nicht berücksichtigt. (* Abschätzung: vorhandener Heizwärmeverbrauch < 10% des Heizwärmeverbrauches bei regulärer Beheizung.) Nicht beheizte Räume im DG werden nicht berücksichtigt, falls diese nicht indirekt durch Nachbarräume oder Raumverbund mit OG (bspw. offene Raumformen) beheizt werden.

gabe bekannt war bzw. die Angaben mit Unterlagen selber berechnet werden konnten, konnten keine vollständige Einheitlichkeit erreicht werden.

Die 42 Einfamilienhäusern sind überwiegend freistehende Gebäude (35) und zu einem geringen Anteil Doppel- (2), Reihemittel- (1) oder Reihenendhäuser (4). Entsprechende der sehr unterschiedlichen Gebäudegrößen (ein- oder zweigeschossig, Unterschiede in Ausbaugrad von Dachgeschoss und Keller sowie Gebäudegrundfläche) variiert die beheizte Fläche und reicht von 91 m² bis 308 m². Der Median der Einfamilienhäuser liegt bei 172 m². Zwei Messobjekte sind Zweifamilienhäuser, bei denen die vermessene Wärmepumpenanlage jeweils nur eine Wohnung (Etage) beheizt. In acht bzw. je zwei Messobjekten wird mit der Wärmepumpenanlage ein gesamtes Zwei-, Drei- bzw. Vierfamilienhaus versorgt. Alle Messobjekte zusammen betrachtet, so reicht die beheizte Fläche von 91 m² bis 423 m², mit einem Median von 183 m².

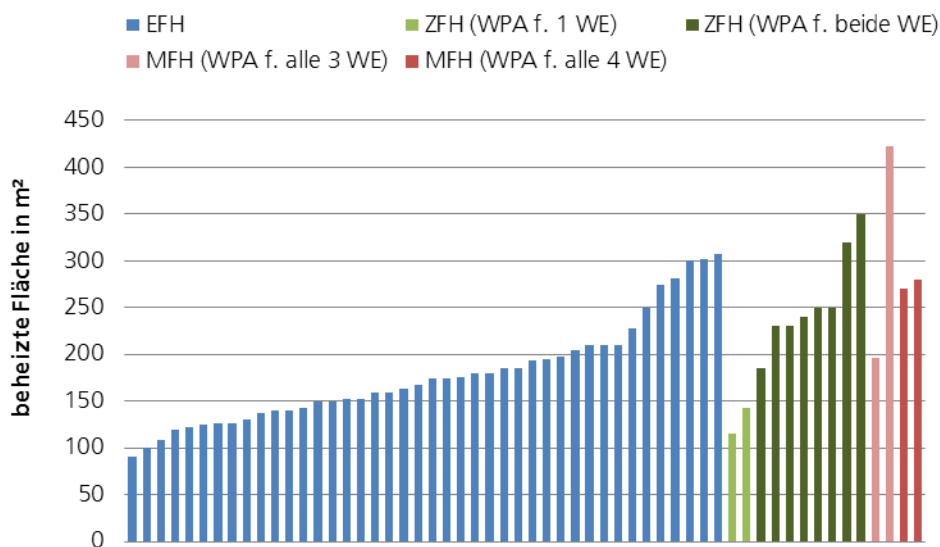


Abbildung 12: Beheizte Fläche der Messobjekte gruppiert nach der Art des Gebäudes (EFH: Einfamilienhaus; ZWE: Zweifamilienhaus, in dem nur eine Wohneinheit (WE) oder beide WE von der Wärmepumpenanlage (WPA) beheizt werden; MFH: Mehrfamilienhaus, in dem jeweils alle 3 bzw. 4 WE des Gebäudes von der WPA beheizt werden).

4.2.2 Baualter

Das Baualter der Gebäude zeigt eine weite Verteilung von dem ältesten Gebäude aus dem Jahr 1850 bis zu dem neuesten Gebäude aus dem Jahr 2005. In Abbildung 13 sind die Gebäude den Baualtersklassen der Einteilung des Institutes für Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) zugeordnet (Loga et al. 2015). Für die Auswertungen in diesem Bericht werden die Baualtersklassen zu Baualtersperioden zusammengefasst, die sich an dem Inkrafttreten der Wärmeschutzverordnungen (1. WSchV 1977) und (3. WSchV 1995) orientieren¹. Abweichend von der Baualtersgrenze 1978 / 1979 nach IWU wird

¹ a) In den alten Bundesländern ist die erste Wärmeschutzverordnung Ende 1977 in Kraft getreten. Das IWU wählt bei der Definition der Baualtersklassen eine Verschiebung der Baualtersgrenze um ein Kalenderjahr - auf 1978 / 1979 - um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass der Übergang in die Praxis erst im Laufe des Jahres 1978 erfolgt sein dürfte, da die Planung und Genehmigung vieler im Jahr 1978 fertiggestellter Gebäude vermutlich bereits vor dem Inkrafttreten der Verordnung abgeschlossen war. Diefenbach und Clausnitzer 2010. In dem Projekt „WPsmart im Bestand“ wird die Baualtersgrenze zwischen den hier gewählten Baualtersperioden auf 1979 / 1980 festgelegt, da das im Jahr 1979 fertiggestellte Gebäude dieses

hier die Baualtersgrenze auf 1979/1980 verschoben, da ein im Jahr 1979 fertiggestelltes Gebäude deutlich dem Baustandard vor dem Inkrafttreten der 1. WSchV zuzuordnen ist.

- Baujahr bis 1979: 57 %
- Baujahr 1980 bis 1995: 32 %
- Baujahr 1996 bis 2005: 11 %

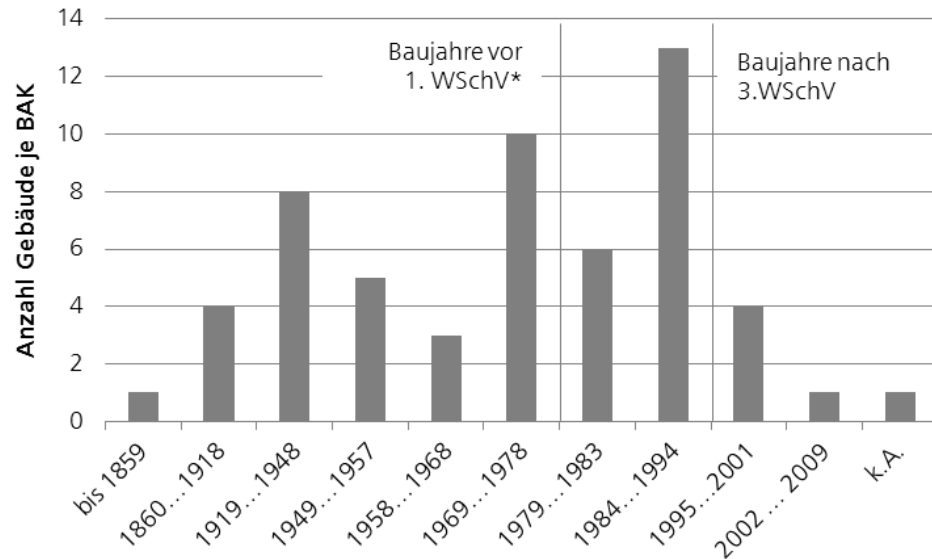


Abbildung 13: Baualter der Gebäude: Zuordnung gemäß den Baualtersklassen nach (Loga et al. 2015); * Kommentar vgl. Fußnote¹

4.2.3 Sanierungsgrad

Die Gebäude weisen eine sehr unterschiedliche Sanierungstiefe auf.

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen auf Basis der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode analysiert. Der „Gebäudekennwert“ dient zur (semi-)quantitativen Charakterisierung der energetischen Gebäudequalität und ist in sieben Klassen - von rot (7, „schlecht“) bis grün (1, „gut“) - unterteilt. Ergänzend sind für eine detaillierte Betrachtung die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile „Dach“, „Außenwand“ und „Fenster“ ebenfalls jeweils in sieben Klassen eingeordnet dargestellt. Die Klasseneinteilung orientiert sich an den Grenzwerten der Wärmeschutzverordnungen (WSchV). Der jeweilige Grenzwert der (1. WSchV 1977) bildet die Abgrenzung zwischen Klasse 5 und 6 und der Grenzwert der (3. WSchV 1995) zwischen Klasse 2 und 3.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass teilweise nur qualitative Beschreibungen der Bewohner zu den Bauteilen vorlagen und diese, wenn es hinreichend genau erschien, mit plausiblen Angaben zu den Materialeigenschaften konkretisiert wurden, um einen Wärmedurchgangskoeffizienten zu bestimmen. Es ist daher mit einer positiven wie negativen Unschärfe einer Klasse zu rechnen.

Die Auswertung erfolgt für 45 Gebäude. Bei den anderen Objekten lagen keine ausreichenden Informationen über die Gebäudehülle vor. 28 der hier betrachteten Gebäude

Projektes deutlich dem Baustandard vor dem Inkrafttreten der 1. WSchV zuzuordnen ist.

b) Die zweite Grenze der Baualtersperiode wurde gemäß der Baualtersgrenzens nach IWU gewählt.

wurden in der Baualtersperiode bis 1979 errichtet, 12 Gebäude bis 1994 und 5 Gebäude bis 2005. Die Zusammensetzung nach den drei Baualtersperioden entspricht bis auf wenige Prozent Abweichung der Zusammensetzung des gesamten Gebäudebestandes in diesem Projekt (vgl. Kapitel 4.2.2).

Abbildung 14 bis Abbildung 16 zeigen die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile „Dach“, „Außenwand“ und „Fenster“ der Gebäude, jeweils im Zustand nach Errichtung¹ und im heutigen Zustand. Die Gebäude sind nach dem Baualter sortiert. In der Baualtersperiode bis 1979 wurden bei den meisten Gebäuden die Fenster (89 %) getauscht und / oder das Dach saniert (86 %). Die Sanierungsrate bei der Außenwand ist deutlich niedriger: 57 % haben die Fassade umfänglich saniert, 11 % nur sehr geringfügig² und bei 32 % wurden keine energetischen Verbesserungen an der Außenwand vorgenommen. An den 12 Gebäuden der Baualtersperiode bis 1994 wurden nur an wenigen Objekten Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle vorgenommen. Die Fenster wurden in drei der Gebäude ausgetauscht und die Außenwand an einem Gebäude saniert. Die Dächer sind heute noch im Originalzustand. An den 5 Gebäuden der Baualtersperiode bis 2005 wurden keine Sanierungsmaßnahmen vorgenommen.

Ergänzend wird in Abbildung 14 bis Abbildung 16 jeweils der heutige energetische Zustand der Bauteile als prozentuale Verteilung dargestellt. Bei den Fenstern liegt der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen $0,9 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ und $3,0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. In Dreiviertel der Gebäude ist dieser Wert niedriger als $2,3 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ und fällt damit in den Bereich um den Grenzwert der (3. WSchV 1995) oder besser (Klasse 1 - 3, dunkel- bis hellgrün). In den anderen Gebäuden sind Fenster der Klasse 4 (gelb) eingebaut. Entsprechend der ebenfalls hohen Sanierungsrate der Dächer sind diese zu 80 % den „grünen“ Bereichen (1 - 3) der Klassifikation der Dächer zuzuordnen. 11 % der Dächer fallen in die „orange-roten“ Bereiche (5 - 7). Die Verteilung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand spiegelt die geringere Sanierungsrate wider. Im heutigen Zustand zählen 62 % der Außenwände zu den „grünen“ Bereichen der Klassifikation der Außenwand und 20 % zu den „orange-roten“ Bereichen.

¹ Das Gebäude der Anlage ID 328 (Baujahr 1900; in der Grafik das fünfte von links) war ursprünglich eine Scheune. Dies ist nicht direkt vergleichbar. Die U-Werte im Originalzustand werden jedoch im „roten Bereich“ gelegen haben. Um das Gebäude in der Auswertung darstellen zu können, wurden hier fiktive U-Werte weit im „roten Bereich“ angenommen.

² Es wurde bspw. nur eine Giebelwand saniert oder der durchschnittliche U-Wert der Außenwand hat sich durch einen nachträglichen Anbau, der mit einer (besser) gedämmten Außenwand errichtet wurde, verbessert.

Legende:

□ Originalzustand

○ heutiger Zustand

Farbskala vgl. Kapitel 3.3

1. WSchV'77
3. WSchV'95

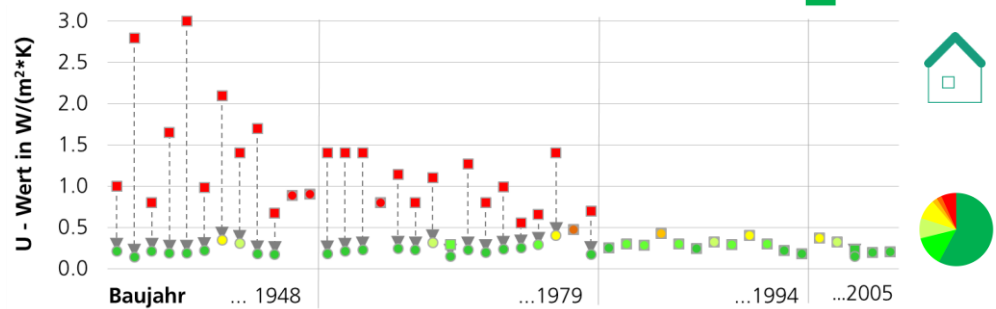


Abbildung 14: Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Dächer im Originalzustand und im heutigen Zustand für 45 Gebäude sortiert nach dem Baualter (links) sowie die Verteilung der U-Wert-Klassen im heutigen Zustand (rechts)

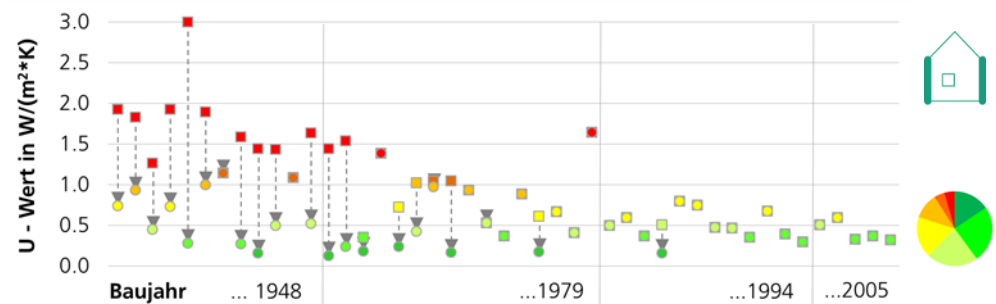


Abbildung 15: Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Außenwände im Bauzustand und im heutigen Zustand für 45 Gebäude sortiert nach dem Baualter (links) sowie die Verteilung der U-Wert-Klassen im heutigen Zustand (rechts)

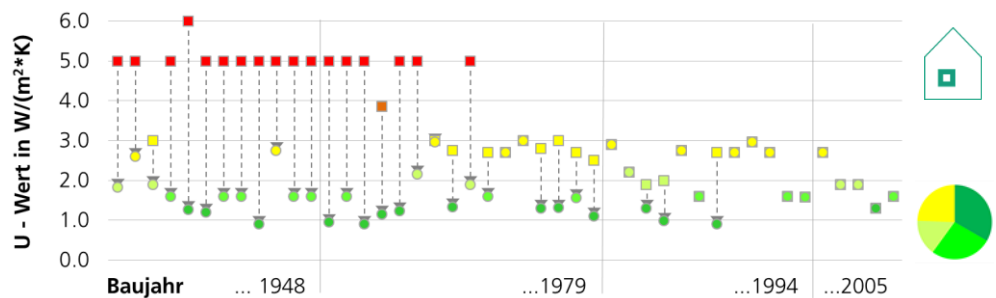


Abbildung 16: Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Fenster im Bauzustand und im heutigen Zustand für 45 Gebäude sortiert nach dem Baualter (links) sowie die Verteilung der U-Wert-Klassen im heutigen Zustand (rechts)

Abbildung 17 zeigt die *Gebäudekennwerte*, den mit einem Referenzgebäude flächengewichteten Mittelwert der Bauteile (vgl. Kapitel 3.3). Analog zu den Abbildungen der Bauteile sind die 45 Gebäude nach dem Baualter sortiert und der *Gebäudekennwert* ist jeweils im Errichtungs- und im heutigen Zustand dargestellt. Hier spiegeln sich die oben aufgeführten Maßnahmen an der Gebäudehülle wider. Im heutigen Zustand werden 67 % der Gebäude den „grünen“, 27 % dem „gelben“ und 7 % den „orange-roten“ Bereichen zugeordnet.

Legende: vgl. Abbildung 14

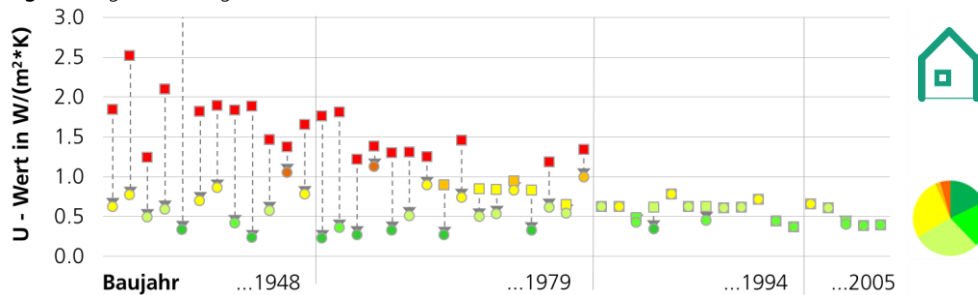


Abbildung 17: *Gebäudewert* im Bauzustand und im heutigen Zustand für 45 Gebäude sortiert nach dem Baualter (links) sowie die Verteilung des *Gebäudewertes* im heutigen Zustand (rechts)

4.3 Wärmequellenanlage

Die Abbildung 18 gibt die Aufteilung der eingesetzten Wärmequellentypen wieder. Über die Hälfte der Wärmepumpen nutzt ausschließlich die Wärmequelle Außenluft. Bei neun Anlagen wird neben der Außenluft auch die Raumluft als Wärmequelle genutzt. Knapp ein Viertel der Anlagen nutzt das Erdreich als Wärmequelle und zwei Systeme sind mit einem Eisspeicher ausgestattet.

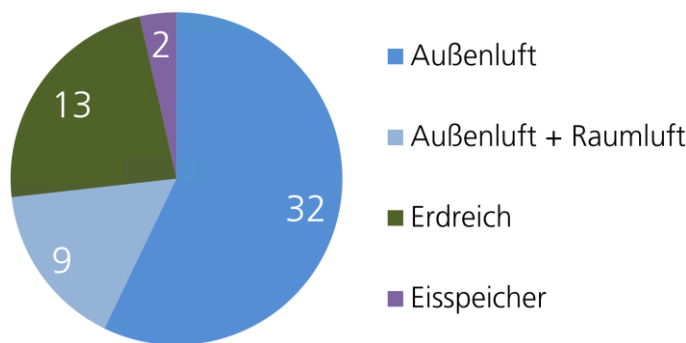


Abbildung 18: Wärmequellen bzw. Wärmequellenanlagen der untersuchten Wärmepumpen

Bei Systemen, die nur **Außenluft** als Wärmequelle nutzen, wird diese fast ausschließlich direkt über den Verdampfer geführt. Eine Ausnahme bildet eine Wärmepumpe mit solegeführter Wärmequellenanlage: ein außen aufgestellter Luft/Sole-Wärmeübertrager entzieht der Außenluft die Wärme, welche mittels Sole in das Gebäude zum Verdampfer der Wärmepumpe geführt wird. Die Wärmepumpenanlagen unterscheiden sich hinsichtlich des Aufstellungsortes. Bei den neun Anlagen handelt es sich um Split-Systeme mit Innen- und Außeneinheit. Zwei Wärmepumpen sind ausschließlich innen und 21 Wärmepumpen ausschließlich außen aufgestellt.

Bei den **Außenluft und Raumluft** nutzenden Systemen sind jeweils zwei Wärmepumpengeräte installiert: eine Wärmepumpe zur Raumheizung, gekoppelt mit der Wärmequelle Außenluft, und eine Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung (nachfolgend: Brauchwasser-Wärmepumpe), welche der umgebenden Raumluft Wärme entzieht. Je nach Aufstellungsort (inner- oder außerhalb der thermischen Hülle) nutzt eine Brauchwasser-Wärmepumpe genaugenommen auch die von der Wärmepumpe zur Raumheizung bereitgestellte, und damit teilweise auch jene der Außenluft entzogenen, Energie. Ungeachtet dieser Energieflüsse werden die kombinierten Systeme im vorliegenden Bericht gemeinsam, jedoch entsprechend gekennzeichnet, mit den Systemen ausgewertet, bei denen ein Wärmepumpengerät Wärme in beiden Betriebsmodi bereitstellt. Die Wärmepumpen zur Raumheizung sind in den meisten Fällen außen (5) und einmal innen aufgestellt. Bei drei Wärmepumpen handelt es sich um Split-Systeme.

Die untersuchten **Erdreich**-Wärmepumpen nutzen ausschließlich Erdwärmesonden (EWS) als Wärmequellenanlage, welche anhand der Abbildung 19 im Hinblick auf Anzahl, Gesamtlänge und Bohrtiefe näher charakterisiert werden. Die Gesamtsondenlänge sollte sich gemäß VDI 4640 an der erforderlichen Kälteleistung und den geothermischen Bedingungen vor Ort orientieren. Bei den untersuchten Anlagen wurden Gesamtsondenlängen zwischen 97 m und 350 m verbaut. Die Anzahl der Sonden kann bspw. mit dem zur Verfügung stehenden Platz oder auch den individuellen geothermischen Bedingungen zusammenhängen. Die Anzahl der Sonden der hier untersuchten Wärmepumpen reicht von einer bis vier. Die Bohrtiefen reichen von 35 m bis 175 m, wobei bei vier der 12 charakterisierten Systeme der Grenzwert von 100 m, ab welchem bezüglich der Bohrgenehmigung zusätzlich das Bergrecht gilt, überschritten wird. Hervorzuheben ist die EWS der ID 324, die aufgrund ihrer großzügigen Dimensionierung kein Glykol für den Frostschutz benötigt und dadurch neben dem Vorteil höherer Quellentemperaturen aufgrund der Dimensionierung auch Vorteile im Hinblick auf Wärmekapazität und Hydraulikeigenschaften des Wärmeträgermediums Wasser mit sich bringt.

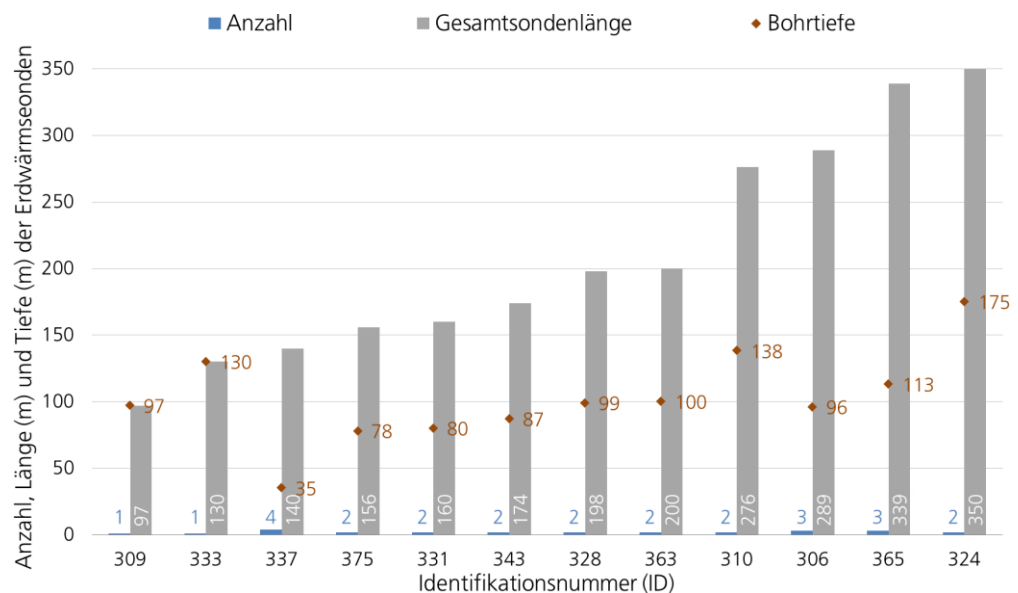


Abbildung 19: Anzahl, Länge und Bohrtiefe der Erdwärmesonden der untersuchten Erdreich-Wärmepumpen (Details einer Anlage unbekannt)

Durch den Einsatz des **Eisspeichers**, der von zwei Wärmepumpen als Wärmequellenanlage genutzt wird, werden unterschiedliche Wärmequellen eingebunden. Über den Solarabsorber wird vor allem Solarenergie, aber auch Energie aus der Außenluft, direkt dem Verdampfer oder dem Eisspeicher zugeführt. Da der Eisspeicher vergraben wird, besteht auch ein Wärmeaustausch mit dem umliegenden Erdreich. Da es sich somit um ein Multiquellen-system handelt, werden die Anlagen zwar gemeinsam mit den anderen Sole-Wärmepumpen dargestellt, jedoch immer getrennt voneinander bewertet.

4.4 Wärmepumpengeräte

Die untersuchten Wärmepumpengeräte unterscheiden sich in diversen Merkmalen. Mit den Themen Leistungsregelung, Split-Systeme, Kältemittel und Normleistungszahl wird nachfolgend eine Auswahl dieser Merkmale näher beschrieben. Die Leistungszahlen wurden im Hinblick auf die Anonymisierung der Ergebnisse auf eine Dezimalstelle gerundet.

Durch eine Modulation der thermischen Leistung der Wärmepumpe und der damit verbundenen Annäherung an die erforderliche Gebäudeheizlast können Effizienzsteigerungen realisiert werden. Eine große Differenz zwischen Heizleistung der Wärmepumpen und der Heizlast eines Gebäudes (Leistungsdivergenz) besteht vor allem bei Nutzung der Wärmequelle Außenluft, was auf die vergleichsweise großen Temperaturbandbreiten zwischen Sommer und Winter zurückzuführen ist. Entsprechend wirkungsvoller ist der Einsatz der Leistungsmodulation bei Außenluft-Wärmepumpen im Vergleich zu Erdreich-Wärmepumpen, wovon u.a. in (Grasser et al. 2011) berichtet wird. Die geringere Anzahl von Anschalthäufigkeiten infolge der Leistungsmodulation kann sich zudem auch positiv auf die Lebensdauer des Verdichters auswirken.

Als weiteres Merkmal können die untersuchten Anlagen in Monoblock (Verdampfer, Verdichter, Verflüssiger und Expansionsventil in einem Bauteil) und Splitsysteme (mind. der Verdampfer befindet sich in einer Außen-, die übrigen Komponenten in einer Inneneinheit) unterteilt werden. Auf beide Merkmale bezieht sich die Abbildung 20.

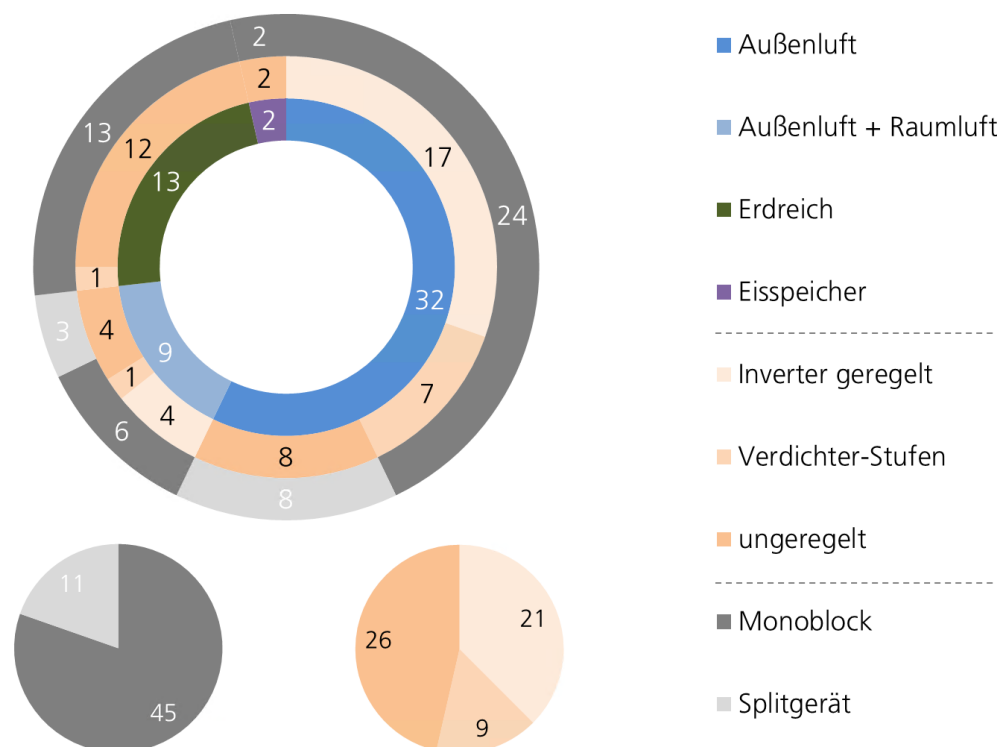


Abbildung 20: Angaben zur Leistungsregelung und zum Kältekreis unterschieden nach Wärmequellen (oben) und Gesamt (unten)

Im oberen Bereich der Grafik werden die genannten Merkmale nach den Wärmequellen unterschieden. Dabei wird deutlich, dass die Wärmepumpengeräte bei Nutzung von Eisspeichern als Wärmequelle über keine Leistungsregelung und bei Nutzung des Erdreiches als Wärmequelle in einem Fall über zwei Verdichterstufen verfügen. Von den 32 Außenluft-Wärmepumpen verfügt gut die Hälfte über Inverter geregelte Verdichter und sieben Geräte über zwei Verdichterstufen. Bei den übrigen acht Geräten besteht keine Möglichkeit der Leistungsmodulation. Bei den neun Systemen, die zwei Wärmepumpen (Heizungswärmepumpe (Außenluft), Brauchwasser-Wärmepumpe (Raumluft)) installiert haben, bezieht sich diese Auswertung auf die Wärmepumpe zur Raumheizung. Jeweils knapp die Hälfte der Geräte verfügt entweder über Inverter geregelte Verdichter oder keine Möglichkeit der Leistungsregelung. Ein Gerät verfügt über zwei Verdichterstufen. Ein Viertel der Wärmepumpen, welche beide Betriebsmodi bedienen, sind Splitgeräte.

Bei den Wärmepumpen, die ausschließlich zur Raumheizung eingesetzt werden, ist der Anteil mit einem Drittel etwas höher.

In der Abbildung 21 werden die Norm-Leistungszahlen und die Einbaujahre der Wärmepumpen dargestellt. Letztere sollen als Indiz für die Baujahre der Geräte und damit auch deren technischer Reife herangezogen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass Geräte von 2017 einen anderen Entwicklungsstand, bspw. bezüglich der eingesetzten Komponenten oder der internen sowie externen Regelung aufweisen, als Geräte von 2006. In der Grafik werden zudem Gruppen gebildet, wobei nach Wärmequellentyp und den Ansätzen der Leistungsregelung (ohne, Verdichter-Stufen, Inverter geregelt) unterschieden wird. Die Leistungszahlen wurden gemäß DIN EN 14511 bei Standardbedingungen A2/W35 (Außenluft-Wärmepumpen) bzw. B0/W35 (Sole-Wärmepumpen) ermittelt und geben, bezogen auf die Effizienz, die prinzipielle Güte des Gerätes wieder. Bezüglich der Vergleichbarkeit der Leistungszahlen ist zu berücksichtigen, dass die Hersteller von Inverter geregelten Wärmepumpen Freiheiten bei der Einstellung der Verdichterdrehzahl an dem Norm-Betriebspunkt haben. Auch aus Gründen der Anonymisierung der Geräte wird hierauf nicht näher eingegangen. Die Hälfte der Anlagen wurde in den Jahren 2014 und 2015 installiert, 84 % der Anlagen in den Jahren von 2012 bis 2017. Drei der untersuchten Wärmepumpen wurden bereits 2006 installiert, was sich bei zwei dieser Anlagen auch in sehr geringen Leistungszahlen widerspiegelt (**ID 303**, **ID 326**).

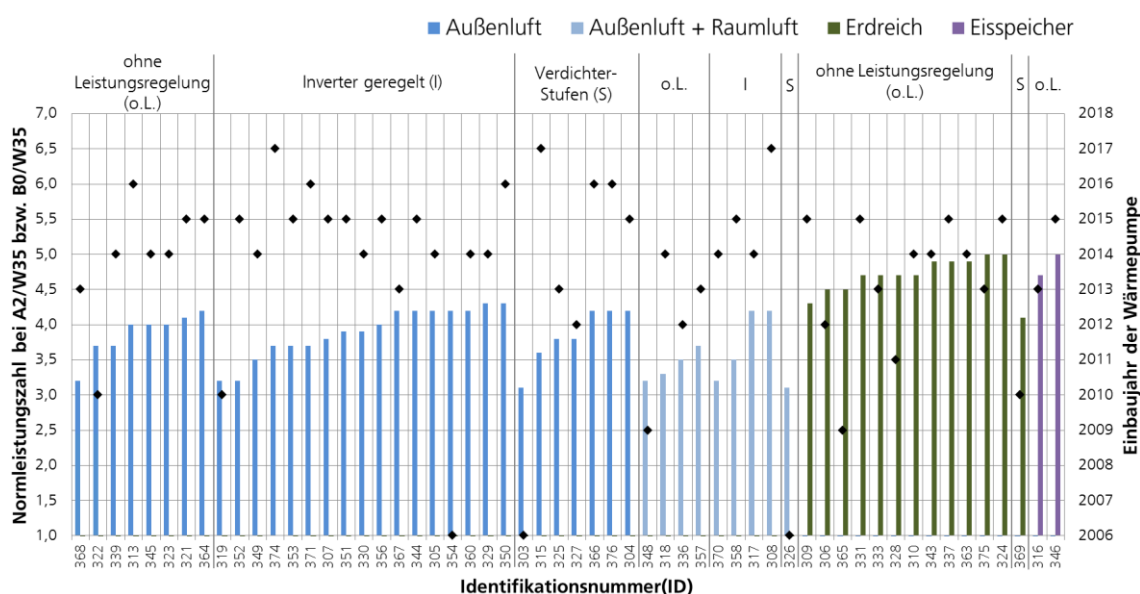


Abbildung 21: Norm-Leistungszahlen nach DIN EN 14511 und Einbaujahre der Geräte, getrennt nach Wärmequellentyp und den Ansätzen der Leistungsregelung (ohne, Verdichter-Stufen, Inverter geregelt)

Bei den Außenluft-Wärmepumpen reichen die Leistungszahlen der Anlagen ohne Leistungsregelung / mit Inverterregelung / mit Verdichter-Stufen von 3,7 bis 4,2 / 3,5 bis 4,3 / 3,6 bis 4,2 bei negativen Ausreißern mit 3,2 (3,2; 3,1). Bei den ausschließlich zur Raumheizung eingesetzten Außenluft-Wärmepumpen ohne Leistungsregelung handelt es sich tendenziell um ältere Geräte mit Leistungszahlen von 3,2 bis 3,7. Die Wärmepumpen mit Inverter geregelten Verdichtern weisen Leistungszahlen von 3,2 und 3,5 sowie zwei Geräte wesentlich höhere Leistungszahlen (4,2) auf. Die Leistungszahl der einen älteren Anlage mit zwei Verdichter-Stufen (**ID 326**) liegt bei lediglich 3,1.

Alle Sole-Wärmepumpen wurden vor dem Jahr 2015 installiert. Die Anlagen mit Wärmequelle Erdreich und ohne Leistungsregelung verfügen über Leistungszahlen von 4,3

bis 5,0. Mit 4,1 noch etwas geringer liegt die Normleistungszahl der Wärmepumpe (ID 369) mit zwei Verdichter-Stufen, wobei es sich auch um ein älteres Modell mit Einbaujahr 2010 handelt. Die an Eisspeicher gekoppelten Wärmepumpen verfügen über Leistungszahlen von 4,7 und 5,0.

In den einzelnen Gruppen zeigen sich teils große Unterschiede und einzelne Ausreißer werden deutlich. Unter Berücksichtigung der Ausreißer bestehen bei den Außenluft-Wärmepumpen Differenzen in den Leistungszahlen von 1,1, bei den Sole-Wärmepumpen von 0,9. Diese prinzipielle Güte der Geräte muss bei der Interpretation den gemessenen Arbeitszahlen entsprechend berücksichtigt werden.

Den direkten Zusammenhang zwischen Norm-Leistungszahl und Einbaujahr der Wärmepumpe zeigt die Abbildung 22 für die Außenluft-Wärmepumpen. Wie bereits erwähnt, wurde die Hälfte der Anlagen in den Jahren 2014 und 2015 installiert. Diese Gruppe weist mit Werten zwischen 3,2 und 4,3 das Maximum an Leistungszahldifferenzen auf. Die neueren Anlagen verfügen im Schnitt über höhere, die älteren Anlagen im Schnitt über geringere Leistungszahlen. Hervorzuheben ist eine Wärmepumpe, die bereits 2006 über eine Leistungszahl von 4,2 verfügte. Zum Vergleich mit den allgemein marktverfügbaren Wärmepumpen zeigen die Box-plots auf der rechten Seite die Leistungszahlen aller im Januar 2019 in der BAFA-Liste geführten Wärmepumpen¹ mit einer Heizleistung bis 15 kWh, wobei Anlagen mit und ohne Leistungsregelung unterschieden wurden. Der Vergleich zeigt, dass sich die untersuchten Wärmepumpen tendenziell im mittleren sowie oberen Bereich in der BAFA-Liste einreihen².

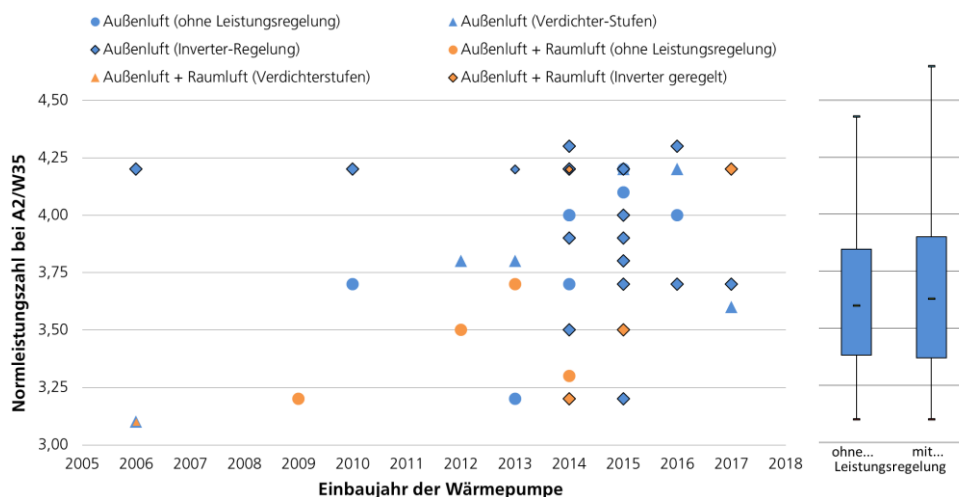


Abbildung 22: Normleistungszahlen der (auch bei Wärmequelle Außenluft + Raumlufte) Außenluft-Wärmepumpen über das jeweilige Einbaujahr und rechts eine Häufigkeitsverteilung von Normleistungszahlen für Anlagen bis 15 KW thermischer Leistung gemäß BAFA-Liste vom 15.01.2019 (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2019) unterschieden nach Anlagen mit (454) und ohne Leistungsregelung (238)

¹Bei der Auswertung der Daten der BAFA-Liste wurden Geräte mit identischen Leistungs- & COP-Angaben nur einmal berücksichtigt, da einige Geräte von mehreren Herstellern oder von ein und dem selber Hersteller mit Variationen (bspw. der Regelung) angeboten werden.

²Hierbei ist zu beachten, dass in der Liste der BAFA auch Geräte aufgeführt sind, die nicht mehr am Markt verfügbar sind. Da dies meist die Geräte mit eher geringem COP betrifft, liegt der Mittelwert der am Markt verfügbaren Wärmepumpen (leicht) höher.

In der Abbildung 23 werden die entsprechenden Zusammenhänge für die Sole-Wärmepumpen dargestellt. Die neueren Geräte (BJ 2013 bis 2015) verfügen über Leistungszahlen zwischen 4,7 und 5,0 bei einem Ausreißer mit 4,3 (BJ 2015). Die Leistungszahlen der älteren Geräte liegen bei 4,1 bis 4,3. Verglichen mit den Leistungszahlen der in der BAFA-Liste geführten Sole-Wärmepumpen (mit einer Heizleistung bis 15 kW) liegen 11 von 15 Leistungszahlen oberhalb des Medians der BAFA-Liste^{1,2}. Die Leistungszahl der Anlage von 2010 liegt unterhalb der unteren Grenze der in der BAFA-Liste geführten Systeme.

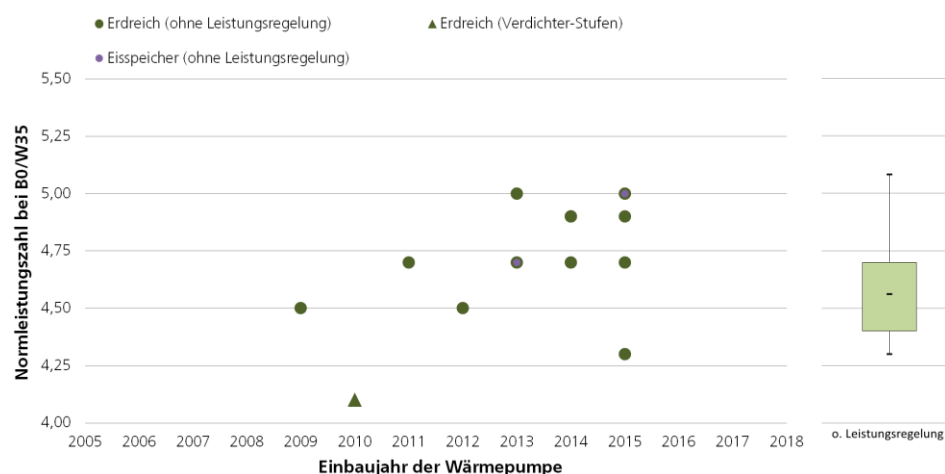


Abbildung 23: Normleistungszahlen der Sole-Wärmepumpen, getrennt nach den Wärmequellen Erdreich und Eisspeicher über das jeweilige Einbaujahr und rechts eine Häufigkeitsverteilung von Normleistungszahlen für Anlagen bis 15 KW thermischer Leistung gemäß BAFA-Liste vom 15.01.2019 (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2019) für Anlagen ohne Leistungsregelung (Anzahl: 339 Geräte)

Während der Projektlaufzeit gewann das Thema Kältemittel infolge der strengeren F-Gas-Verordnung und der vergleichsweise hohen GWP-Werte der traditionellen Kältemittel zunehmend an Gewicht. Während gegen Ende der Projektlaufzeit immer mehr Geräte mit alternativen Kältemitteln, wie bspw. R290 (Propan), auf den Markt kamen, dominieren bei den hier untersuchten Anlagen die traditionellen Kältemittel. Wie die Abbildung 24 verdeutlicht, wird über die Hälfte der Wärmepumpen mit R410A (GWP: 2088) betrieben und etwa ein Viertel mit R404A (GWP: 3922). Ferner sind die Kältemitte R407C (GWP: 1744) und R134A (GWP: 1430) vertreten. Lediglich eine Anlage nutzt das alternativen Kältemittel R290 (Propan, GWP: 3).

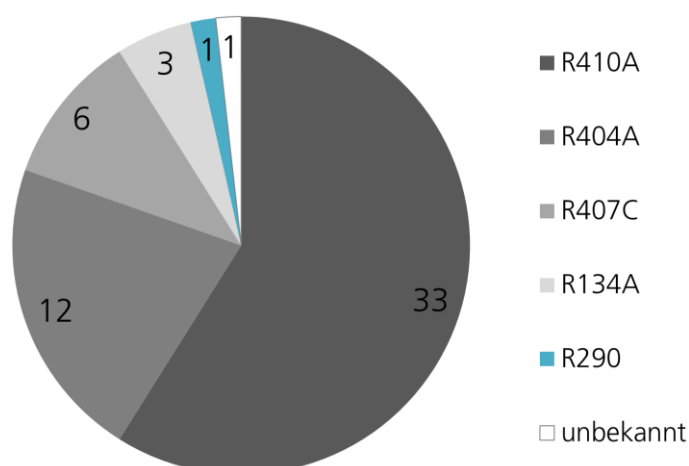


Abbildung 24: Verteilung der eingesetzten Kältemittel

4.5 Wärmenutzungsanlage

4.5.1 Wärmeübergabesystem

Wie die Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen, sind zur Beheizung der Räume in gut einem Viertel der Gebäude ausschließlich Heizkörper - sei es Gliederheizkörper oder Plattenheizkörper - eingesetzt. Rund die Hälfte der Gebäude wird sowohl mit Heizkörpern (überwiegend Heizkörper, einmal Gebläsekonvektoren) als auch mit Flächenheizungen (überwiegend Fußbodenheizungen, einmal Wandheizung, einmal Deckenheizung) beheizt. Im Folgenden werden diese Anlagen als Mischsysteme bezeichnet. Nur in weniger als einem Fünftel der Gebäude sind ausschließlich Fußbodenheizungen installiert. In je einem Gebäude dienen Konvektoren bzw. Gebläsekonvektoren der Raumheizung. Die unterschiedlichen Arten der Raumheizung sind – abgesehen von (Gebläse-) Konvektoren – in allen Baualtersperioden vorzufinden.

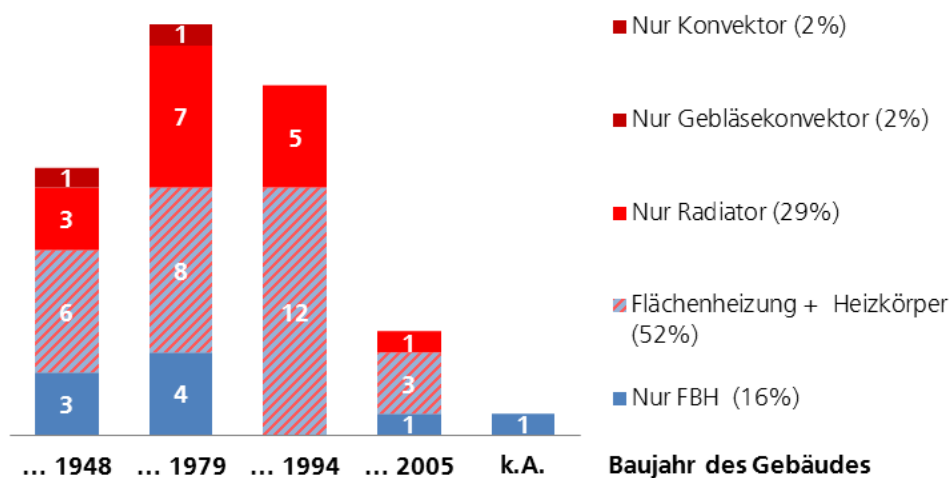


Abbildung 25: Spezifizierung der Wärmeübergabesysteme

Das Installationsjahr der Wärmeübergabesysteme ist sehr unterschiedlich. Es sind sowohl Wärmeübergabesysteme in Nutzung, die mit Errichtung des Gebäudes installiert wurden, als auch Wärmeübergabesysteme, die im Zuge eines Austausches nachträglich eingebaut wurden. Bei dem Austausch wurde in einigen Messobjekten die Art des Wärmeübergabesystems beibehalten, jedoch andere Typen (bspw. Plattenheizkörper anstelle von Gliederheizkörper) eingesetzt. Laut Auskunft einiger Bewohner wurde in ihren Anlagen auf eine großzügige Dimensionierung der Heizkörper geachtet. In anderen Messobjekten wurde die Art des Wärmeübergabesystems geändert, bspw. Einzelöfen ausgebaut oder Heizkörper (teils nur in einem Teil der Räume) durch Flächenheizung ersetzt.

Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über das Einbaujahr der installierten Fußbodenheizungen und Heizkörper. Hierbei ist je Gruppe jeweils das älteste und das jüngste Installationsjahr sowie der Median genannt.

Fußbodenheizung:

- Original (14): 1970 ... | 1987 | ... 2005
- Nachrüstung (17): 1982 ... | 2012 | ... 2016
- unbekannt (5)

Heizkörper

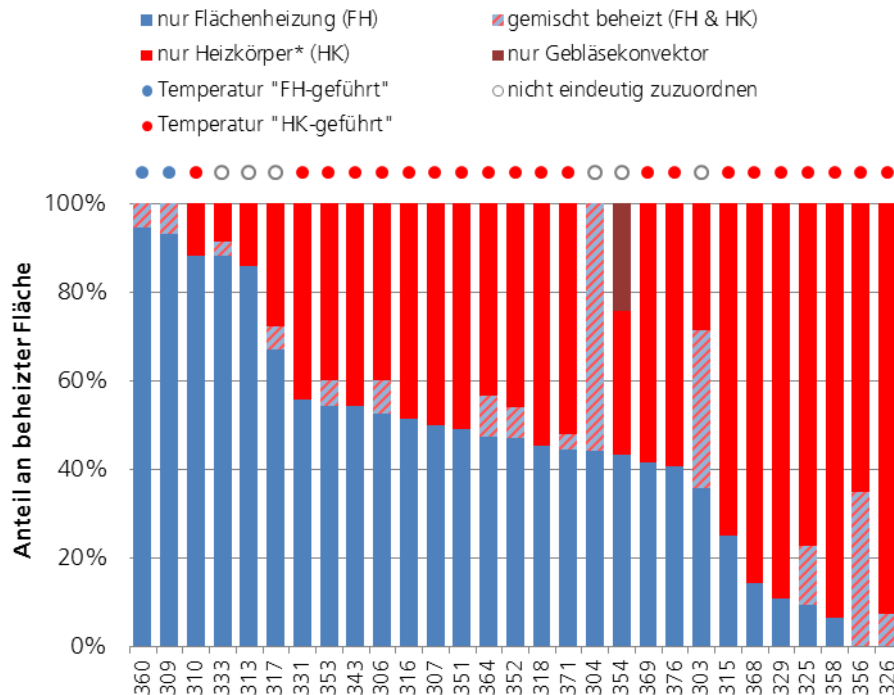
- Original (13): 1953 ... | 1985 | ... 1997
- Nachrüstung (26): 1985 ... | 2013 | ... 2017
- unbekannt (5)

Abbildung 26 gibt einen Einblick in die Anlagen mit Mischsystemen. Es zeigt für jede Anlage den prozentualen Anteil der beheizten Fläche, die a) nur mit Flächenheizungen, b) nur mit Heizkörpern, c) nur mit Gebläsekonvektoren oder d) sowohl mit Flächenheizungen als auch mit Heizkörpern beheizt werden. Zu den Heizkörpern zählen auch Handtuchheizkörper. Die Verteilung ist in den einzelnen Gebäuden sehr unterschiedlich. In der Mehrzahl dieser Gebäude wird ein Teil der Räume nur über Fußbodenheizungen und der andere Teil der Räume nur über Heizkörper beheizt; ggf. ist zudem ein Raum (oder mehrere Räume) mit beiden Wärmeübergabesystemen ausgestattet. In wenigen Gebäuden ist eine Art des Wärmeübergabesystems (Flächenheizung oder Heizkörper) in allen Räumen installiert und zusätzlich in einem oder mehreren dieser Räume ein Heizkörper bzw. eine Flächenheizung eingebaut.

Entscheidend für die Temperatur, welche die Wärmepumpe bei Mischsystemen zur Raumheizung bereitstellen muss, ist deren hydraulische Verschaltung und – wie bei „Single-Wärmeübergabesystemen“ auch – die Auslegung der Wärmeübergabesysteme. Sind alle Wärmeübergabesysteme an einen Speicher, eine Weiche oder einen Verteiler angeschlossen, so bestimmt die höchste Temperaturanforderung die erforderliche Betriebstemperatur der Wärmepumpe. Bei getrennt angeschlossenen Heizkreisen kann bei alternierendem Betrieb mit unterschiedlichen Temperaturniveaus und damit effizienter gearbeitet werden. In allen, bis auf einem, der untersuchten Anlagen stellt die Wärmepumpe die thermische Energie zur Raumheizung nur auf einem Temperaturniveau bereit. In einer Anlage ist der Heizkörper (ein Handtuchheizkörper) an dem Trinkwasserspeicher angeschlossen.

Für die Auswertung und Einordnung der Betriebsbedingungen werden die Mischsysteme in drei Untergruppen unterteilt (vgl. Abbildung 26):

- Heizungsmodus der Wärmepumpe ist „flächenheizungsgeführt“ (2 Anlagen):
Beispiele: Handtuchheizkörper ist an Trinkwasserspeicher angeschlossen; Gebäude ist (fast ausschließlich) über Flächenheizung beheizt und nur im Bad ist zusätzlich ein Heizkörper installiert, der jedoch nur auf dem für die Fußbodenheizung erforderlichen Temperaturniveau betrieben wird.
- Heizungsmodus der Wärmepumpe ist heizkörpergeführt (21 Anlagen):
Beschreibung: Es wird mindestens ein Raum, i.d.R. mehrere Räume, die einen für das Gebäude durchschnittlichen spezifischen Heizwärmebedarf haben, ausschließlich von Heizkörpern beheizt. Heizkörper und Flächenheizungen sind an den gleichen Speicher oder Verteiler bzw. die gleiche Weiche angeschlossen.
- Nicht eindeutig zuordenbar (6 Anlagen):
Beschreibung: In diesen Anlagen sind die Heizkörper nur in Räumen mit einem für das Gebäude geringeren spezifischen Heizwärmebedarf installiert (bspw. Kellerräume), oder in gemischt beheizten Räumen.



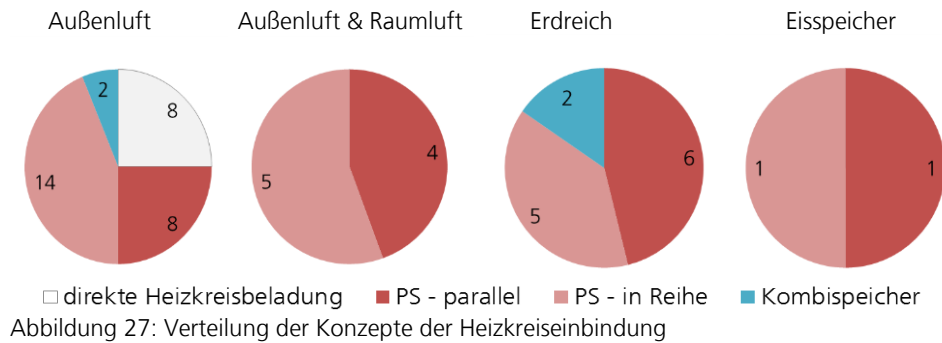
Legende: *: hierbei ist auch eine Anlage mit Konvektorheizung

Abbildung 26: Spezifizierung der Wärmeübergabesysteme mit Mischsystem: Verteilung der Arten der Raumbeheizung je Gebäude (gekennzeichnet durch die Anlagen-ID), sowie Kategorisierung hinsichtlich der Betriebstemperatur der Wärmepumpe im Raumheizmodus

4.5.2 Heizungsspeicher

Abbildung 27 gibt einen Überblick über die installierten Speicherkonzepte. In den meisten Anlagen ist ein Heizungsspeicher installiert. Bei den Außenluft-Wärmepumpen sind die Heizungsspeicher (76 %) zu rund einem Drittel parallel und zu rund zwei Dritteln in Reihe, meist im Vorlauf, eingebunden. Bei 20 % der Anlagen beheizt die Außenluft-Wärmepumpe den Heizkreis direkt. Dies sind allesamt leistungsgeregelte Wärmepumpen. Die direkte Einbindung der Wärmepumpe wurde nicht nur bei Anlagen umgesetzt, die ausschließlich oder anteilig eine Fußbodenheizung nutzen, sondern auch bei drei Anlagen, die ausschließlich Heizkörper im Heizkreis angeschlossen haben. 5 % der Außenluft-Wärmepumpen nutzen eine kombinierte Wärmespeicherung für die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung.

Bei den Sole-Wärmepumpen (Erdreich bzw. Eisspeicher) sind die Heizungsspeicher (87 %) etwas zu gleichen Teilen parallel bzw. in Reihe, auch hier i.d.R. im Vorlauf, installiert. Keine Sole-Wärmepumpe ist direkt an den Heizkreis angeschlossen; die weiteren zwei Sole-Wärmepumpen nutzen einen Kombispeicher.



4.6 Weitere Wärmeerzeuger

Bei den neben der Wärmepumpe eingesetzten Wärmeerzeugern wird zwischen in das Heizsystem eingebundenen Wärmeerzeugern sowie autarken Wärmeerzeugern unterschieden. In das Heizsystem eingebunden sind bei den hier untersuchten Anlagen:

- Elektroheizstäbe,
- Gas- bzw. Ölkessel,
- Solarthermieranlagen.

Diese zusätzlichen Wärmeerzeuger werden entweder zur Raumheizung, zur Trinkwassererwärmung oder für beide Betriebsmodi eingesetzt.

Die autarken Wärmeerzeuger sind nicht in einer übergeordneten Regelung integriert und werden bei den untersuchten Systemen ausschließlich zur Raumheizung eingesetzt. Zu solchen Wärmeerzeugern zählen u.a.

- Kachelöfen,
- Schwedenöfen.

Die Abbildung 28 zeigt die Anzahl der zusätzlich zur Wärmepumpe in das Heizsystem integrierten Wärmeerzeuger. Ein Projektziel bestand darin, dass ein Drittel der untersuchten Wärmepumpenanlagen mit zusätzlichen Heizkesseln als bivalente Systeme betrieben werden. Wie die Grafik zeigt, wurde dieses Ziel nicht erreicht, da nur zehn bivalente Anlagen (18 %) angemeldet wurden. Von den zehn Heizkesseln werden sieben mit Heizöl und drei mit Gas betrieben. Alle Kessel werden sowohl zur Raumheizung als auch zur Trinkwassererwärmung eingesetzt.

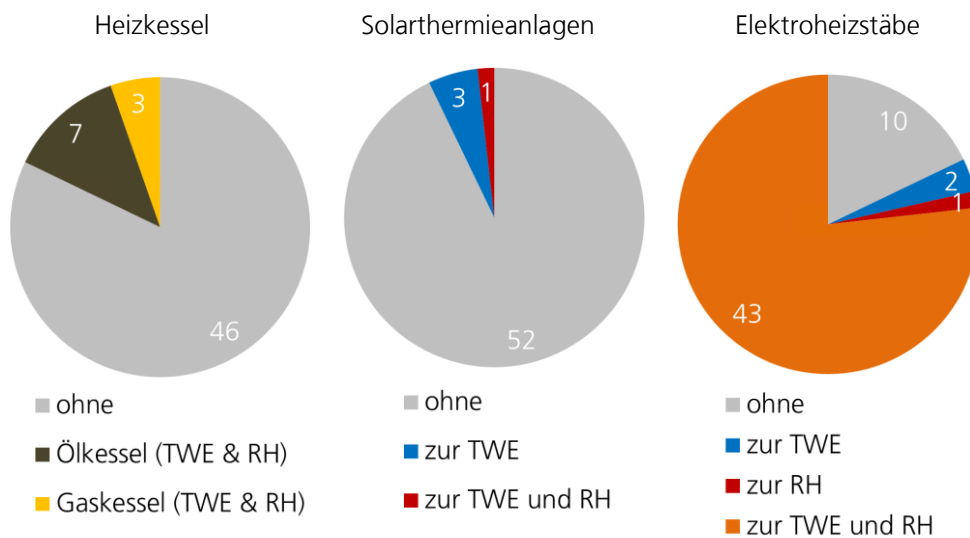


Abbildung 28: zusätzliche, in die Regelung integrierte, Wärmeenergieerzeuger (TWE: Trinkwassererwärmung; RH: Raumheizung)

Die messtechnische Untersuchung von Wärmepumpen, die zusätzlich solarthermisch unterstützt werden, sollte im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse vermieden werden. Die in Kapitel 3.12.2 beschriebenen Kriterien zur Auswahl der Anlagen konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Optionen jedoch nicht immer komplett eingehalten werden. Bezüglich der Solarthermieranlagen führte dies zur Anmeldung von drei Anlagen mit solarthermischer Unterstützung der Trinkwassererwärmung und einer Anlage mit solarthermischer Unterstützung bei beiden Betriebsmodi. Ferner zeigt die Grafik, dass der Großteil der Wärmepumpen über zusätzliche Elektroheizstäbe, meist sowohl zur Raumheizung als auch zur Trinkwassererwärmung, verfügt. Lediglich in zehn Wärmepumpenanlagen ist kein Heizstab installiert. Einen Überblick, getrennt nach Wärmequellen, gibt die Abbildung 29.

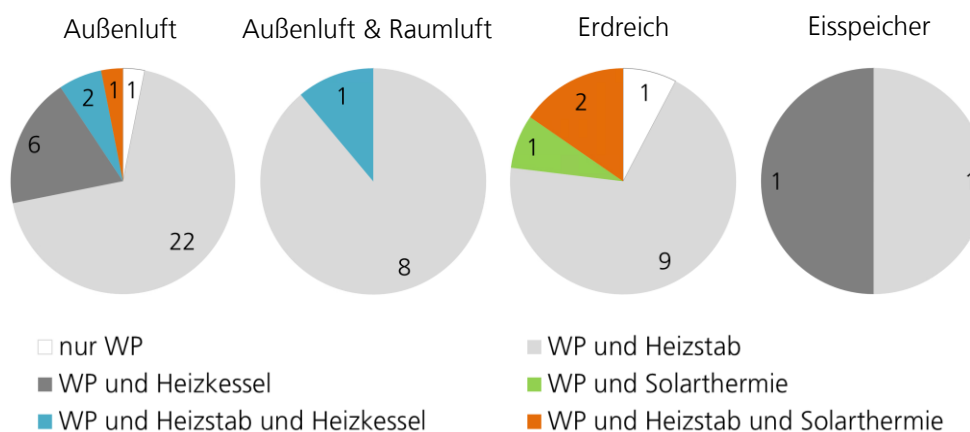


Abbildung 29: Anzahl der Kombinationen aus Wärmepumpen und zusätzlichen Wärmeenergieerzeugern unterteilt nach Wärmequellentypen

In den beiden Gruppen der Wärmequelle Außenluft und Erdreich wurde je eine monovalente¹ Wärmepumpenanlage untersucht. Die übrigen Systeme weisen Kombinationen auf, wobei mit 71 % am häufigsten jene aus Wärmepumpe und Elektroheizstab auftritt. Die Auslegungs- und Regelungskonzepte dieser monoenergetisch betriebenen Systeme sind nicht bekannt. Meist werden jedoch Erdreich-Wärmepumpen auf die Normaußentemperatur ausgelegt und ein Elektroheizstab fungiert lediglich als Backup. Bei Außenluft-Wärmepumpen, insbesondere ohne Leistungsregelung, kann es zweckmäßig sein, einen Heizstab bei geringen Außenlufttemperaturen einzusetzen. Dadurch kann die Wärmepumpe kleiner dimensioniert werden, was u.a. Vorteile im Betriebsverhalten bei höheren Außenlufttemperaturen mit sich bringt. Der gleiche Zusammenhang kann dazu beigetragen haben, dass die Kombination aus Wärmepumpe und Heizkessel vor allem bei Außenluft-Wärmepumpen auftritt. Bemerkenswert ist, dass drei Systeme sowohl mit Elektroheizstab als auch mit einem Heizkessel ausgestattet sind. Die Kombinationen mit Solarthermie enthalten bei drei von vier Fällen zusätzlich einen Elektroheizstab. Das Messkonzept sieht vor, die Deckungsbeiträge aller in das Heizsystem eingebundenen Wärmeerzeuger zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung messtechnisch mit zu erfassen.

In der Projektplanung war vorgesehen, Messobjekte mit autarken Wärmeerzeugern, wie die o.g. Schweden- oder Kachelöfen, nicht in das Projekt aufzunehmen. Einerseits aufgrund der prinzipiellen Deckungsbeiträge der Öfen zur Raumheizung und der damit verbundenen geringeren Deckungsbeiträge der Wärmepumpe, andererseits wegen des erforderlichen Aufwandes zur messtechnischen Ermittlung solcher Deckungsbeiträge. Im Projektverlauf wurde jedoch deutlich, dass ein Verzicht auf diese Messobjekte aufgrund der großen Verbreitung solcher Systeme einen noch größeren zeitlichen Verzug im Hinblick auf die Anmeldung der Anlagen nach sich gezogen hätte. Es wurden 21 Messobjekte mit autarken Wärmeerzeugern angemeldet. Der Deckungsbeitrag dieser Öfen hängt in erster Linie von dem Nutzerverhalten, dem Aufstellungsort (bzw. hiermit beheizbaren Wohnfläche) und der Heizleistung ab. Um dennoch einen Indikator zur Nutzung der Öfen zu entwickeln, wurden die Anlagenbetreiber zu Ihrem Nutzerverhalten befragt. Die prinzipielle Verteilung der Anzahl von Messobjekten mit Öfen sowie eine Einschätzung der Nutzung dieser gibt die Abbildung 30 wieder.

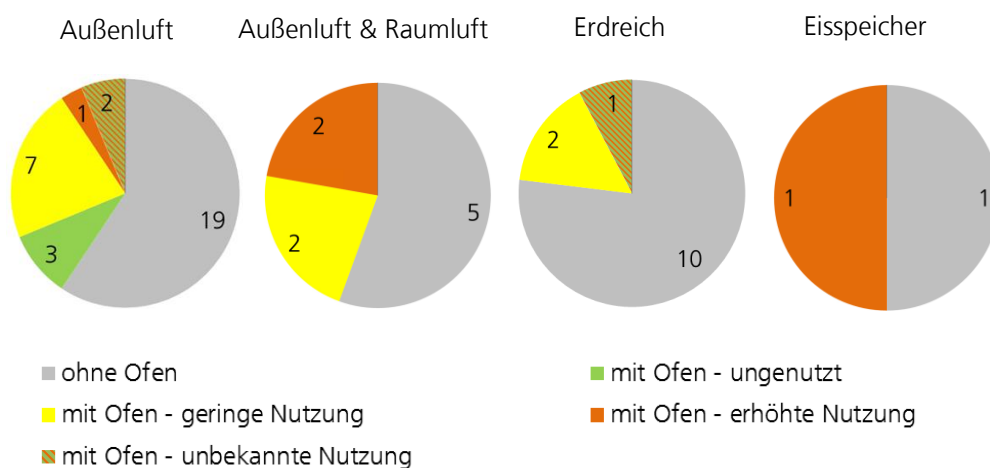


Abbildung 30: Anzahl von Öfen als zusätzlicher Wärmeerzeuger mit Abschätzung derer Nutzung unterteilt nach Wärmequellentypen

¹ Monovalent: es ist nur eine WP installiert; kein zweiter Wärmeerzeuger

In Summe werden von den 21 Öfen drei nicht, elf wenig und vier häufiger genutzt (dreimal ist die Nutzung unbekannt). Der Trennung zwischen wenig und häufig liegt ein geschätzter Deckungsbeitrag zur Raumheizung von 15 % zu Grunde. Die Aufteilung nach Wärmequellentyp zeigt, dass in allen Gruppen Messobjekte mit Öfen unterschiedlicher Nutzungsintensität vertreten sind. In den Auswertungskapiteln werden diese Informationen zur besseren Interpretation der Ergebnisse für die einzelnen Anlagen dargestellt.

4.7 Witterungsbedingungen im Messzeitraum

Die Abbildung 31 zeigt die Außenlufttemperaturen der 56 Standorte¹ der Messobjekte im Auswertungszeitraum 7/2018 bis 6/2019. Die grauen Linien geben die Tagesmittelwerte der einzelnen Standorte wieder. Ergänzend ist das Ausmaß niedriger Außenlufttemperaturen aufgezeigt. Dies ist vor allem für die Beurteilung des Heizstabeinsatzes zur Unterstützung der Heizlastdeckung bei Außenluft-Wärmepumpen wichtig. Hierzu stellen die blauen Säulen für jeden Tag die Anzahl der Standorte dar, an denen eine Tagesdurchschnittstemperatur unter -5 °C gemessen wurde. An gut der Hälfte der Standorte (32 von 56) lag die mittlere Außenlufttemperatur mindestens einen Tag unter -5 °C und nur an 16 Standorten, gut einem Viertel, an mindestens drei Tagen. An einem Standort wurden an sechs Tagen Tagemittelwerte unter -5 °C gemessen.

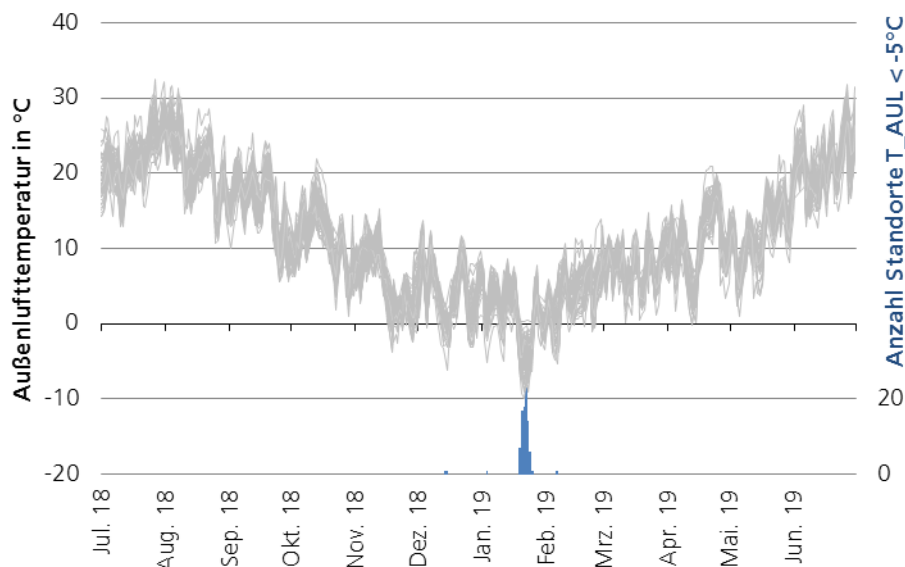


Abbildung 31: Außenlufttemperatur (Tageswerte) an den 56 Standorten der Gebäude sowie Anzahl der Standorte mit einer Tagesmitteltemperatur unter -5 °C

Zur Einordnung der Außenlufttemperatur an den einzelnen Standorten während der Auswertungsperiode werden die Klimafaktoren, die zur Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten für Energieverbrauchsausweise nach EnEV verwendet werden, herangezogen (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2020). Mit dem Klimafaktor können die Energieverbrauchskennwerte von Gebäuden in verschiedenen klimatischen Regionen

¹ Bei 43 Messobjekten wird der installierte Außenlufttemperatursensor verwendet. Bei 13 Messobjekten werden aufgrund ungünstiger Sensorpositionierung oder fehlerhafter Messwerte stattdessen die Daten der nächstgelegenen DWD-Station verwendet. (vgl. Kapitel 3.4.4)

Deutschlands und verschiedener Auswertungsperioden (zumindest überschlägig) verglichen werden.

Der Klimafaktor KF setzt die Temperaturverhältnisse des Referenzklimas (Testreferenzjahr 2011 (TRY) von Potsdam) ins Verhältnis zu den Witterungsbedingungen am jeweiligen Standort während des Betrachtungszeitraumes (Y). Der Wert gibt den Quotienten der entsprechenden Jahresgradtage (G) wieder.

$$KF = \frac{G_{TRY,Potsdam}}{G_{Y,Standort}} \quad (9)$$

Für die Auswertung werden die Klimafaktoren des DWD der jeweiligen Postleitzahl der Messobjekte verwendet (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2020). Abbildung 32 zeigt die Klimafaktoren der 56 Standorte für die Heizperioden von 07/2016 bis 06/2017 und 07/2018 bis 06/2019 sowie den jeweiligen Median. Ergänzend ist der Klimafaktor für den Referenzstandort Potsdam¹ für die beiden Heizperioden dargestellt. Die beiden Heizperioden waren wärmer als das Referenzjahr des TRY 2011. Am Referenzstandort Potsdam lagen die Jahresgradtage um 10 % bzw. 14 % höher. Der Median der Klimafaktoren der Messobjekte liegt in der gleichen Größenordnung wie der Klimafaktor von Potsdam und beträgt 1,08 bzw. 1,11. Bei der Streuung der Klimafaktoren der einzelnen Standorte (von + 19 % bis - 18 % bzw. von + 15 % bis - 18 % um den Median) spiegelt sich die Bandbreite der Standorte wider.

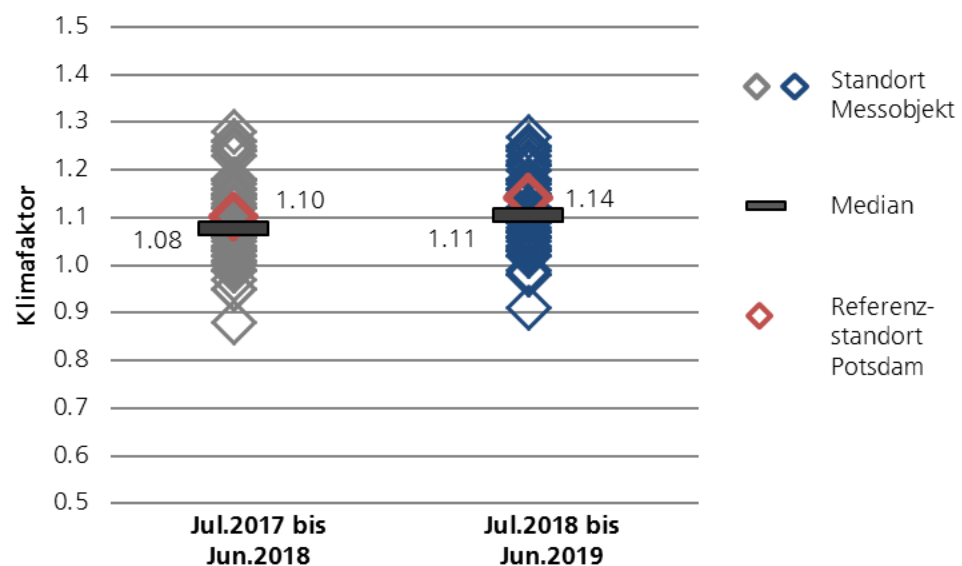


Abbildung 32: Klimafaktoren der 56 Standorte und vom Referenzstandort Potsdam¹

¹ Die Referenzstation Potsdam, die im TRY 2011 verwendet wird, hat die Koordinaten 52° 23' N 13° 04' E. Diese liegt im Postleitzahlgebiet 14473. Demensprechend wurde der Klimafaktor für diese Postleitzahl für den betrachteten Zeitraum dargestellt.

4.8 Wärmenutzung für Raumheizung und Trinkwassererwärmung

In diesem Kapitel wird der Nutzwärmeverbrauch für Raumheizung und für Trinkwassererwärmung (Zapfung) dargestellt. Hierbei ist die Bilanzgrenze nach etwaigen Heizungsspeichern bzw. nach dem Trinkwasserspeicher gewählt (Erzeugernutzwärmeabgabe). Der spezifische Nutzwärmeverbrauch wird auf die beheizte Fläche bezogen angegeben. Die Datenbasis der beheizten Flächen und eine mögliche Unschärfe dieser Angaben ist in Kapitel 4.2.1 beschrieben.

Abbildung 33 zeigt den gemessenen spezifischen Heizwärmeverbrauch während der Auswertungsperiode (vgl. Kapitel 4.1). Nicht in allen Anlagen konnte der Heizwärmeverbrauch vollständig erfasst werden. Dies ist zum einen im Betrieb von autarken Wärmeerzeugern begründet (14 Anlagen, vgl. Kapitel 4.6) und wird zum anderen durch Unterbrechungen der Datenaufzeichnung in der Heizperiode (fünf Anlagen, vgl. Kapitel 4.1) verursacht. Für die Anlagen mit unvollständig erfasstem Heizwärmeverbrauch ist dies in der Abbildung durch einen „farblich auslaufenden“ Bereich oberhalb des dargestellten Messwertes angedeutet. Entsprechend der zu erwartenden Abweichung des Messwertes vom vorhandenen Heizwärmeverbrauch werden zwei Gruppen unterschieden. In Gruppe I sind die Messobjekte mit Messlücken (vgl. Kapitel 4.1) oder geringer Nutzung eines autarken Wärmeerzeugers zugeordnet. Messobjekte mit einer erhöhten Nutzung des autarken Wärmeerzeugers sind Gruppe II zugeordnet. Die Unterscheidung ist in Kapitel 4.6 beschrieben. Bei drei Anlagen wurde der Heizwärmeverbrauch nur vor dem Heizungsspeicher gemessen und damit für diese Bilanzgrenze angegeben. Die Werte sind entsprechend gekennzeichnet.

Zunächst werden nur die 31 Messobjekte betrachtet, bei denen der Heizwärmeverbrauch vollständig nach dem Speicher erfasst wurde. Der spezifische Heizwärmeverbrauch der einzelnen Gebäude liegt (ohne Witterungsbereinigung) in der Heizperiode 2018/2019 recht gleichmäßig verteilt zwischen $44 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und $134 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. In zwei Gebäuden wurde mit $174 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bzw. $214 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ein deutlich höherer spezifischer Heizwärmeverbrauch ermittelt. Der Median beläuft sich auf $89 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Eine Einordnung des spezifischen Heizwärmeverbrauches der Gebäude, bei denen der Heizwärmeverbrauch nicht vollständig erfasst werden konnte, erfolgt mit folgendem Ansatz. Es wird davon ausgegangen, dass in der Gruppe (I) in den Messlücken bzw. von den autarken Wärmeerzeugern zwischen 1 % und 15 % des gemessenen Heizwärmeverbrauches dem Gebäude zur Verfügung gestellt wurde. Für die Gruppe (II) wird dieser Unterschied auf einen Bereich zwischen 10 % und 20 % eingeschätzt. Nach dieser Abschätzung reicht der spezifische Heizwärmeverbrauch aller 51 Messobjekte, die in der Heizperiode 2018/2019 mit der Bilanzgrenze nach etwaigen Heizungsspeichern ausgewertet werden, recht gleichmäßig verteilt von $44 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bis $216 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bzw. $236 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, je nach Umfang der Nutzung des autarken Wärmeerzeugers in dem Gebäude mit dem (zweit)höchsten Heizwärmeverbrauch. Der Median wird in dem Bereich zwischen $91 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bzw. $97 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ erwartet.

In Kapitel 5.3 erfolgt eine Einordnung des Heizwärmeverbrauches im Kontext des Baualters und der Sanierungstiefe der einzelnen Gebäude.

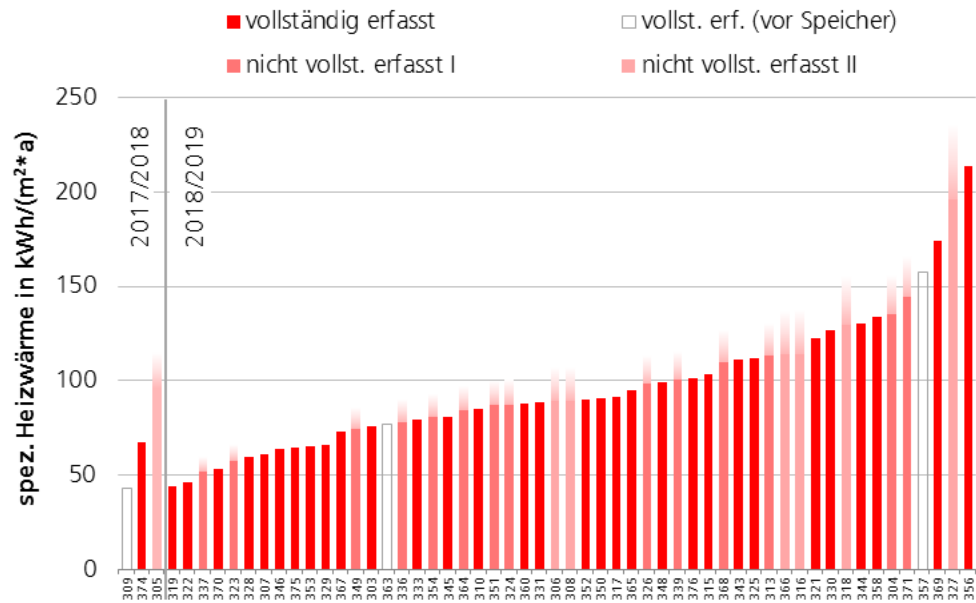


Abbildung 33: Spezifischer Heizwärmeverbrauch in der Auswertungsperiode 2018/2019 bzw. 2017/2018 nach dem Heizungsspeicher (wenn nicht anders notiert)

Unter Berücksichtigung des Klimafaktors können die Heizwärmeverbräuche der Gebäude unterschiedlicher Standorte und Auswertungsperioden (zumindest überschlägig) verglichen werden. Die Witterungsbereinigung erfolgt durch Multiplikation des gemessenen Heizwärmeverbrauchs mit dem entsprechenden Klimafaktor KF (vgl. Kapitel 4.7).

$$Q_{RH,witt.ber} = KF * Q_{RH,Messung} \quad (10)$$

Abbildung 34 zeigt den witterungsbereinigten spezifischen Heizwärmeverbrauch der Gebäude. Analog zu der Darstellung in Abbildung 33 sind die Messobjekte mit unvollständiger Erfassung des Heizwärmeverbrauches sowie abweichender Bilanzgrenze entsprechend gekennzeichnet. Für eine Einordnung aller Gebäude wird für die Anlagen mit unvollständiger Erfassung des Heizwärmeverbrauches die oben beschriebene Einschätzung der nicht erfassten Wärmemenge vorgenommen. Aufgrund der durchgeführten Witterungsbereinigung können Ergebnisse der Messobjekte der Heizperioden 2017/2018 und 2018/2019 gemeinsam betrachtet werden. Die Bandbreite des witterungsbereinigten spezifischen Heizwärmeverbrauches der 53 Gebäude reicht von 48 kWh/(m²*a) bis 254 kWh/(m²*a). Der Median liegt – je nach Umfang der nicht erfassten Wärmemenge – in der Größenordnung von 104 kWh/(m²*a) bis 111 kWh/(m²*a).

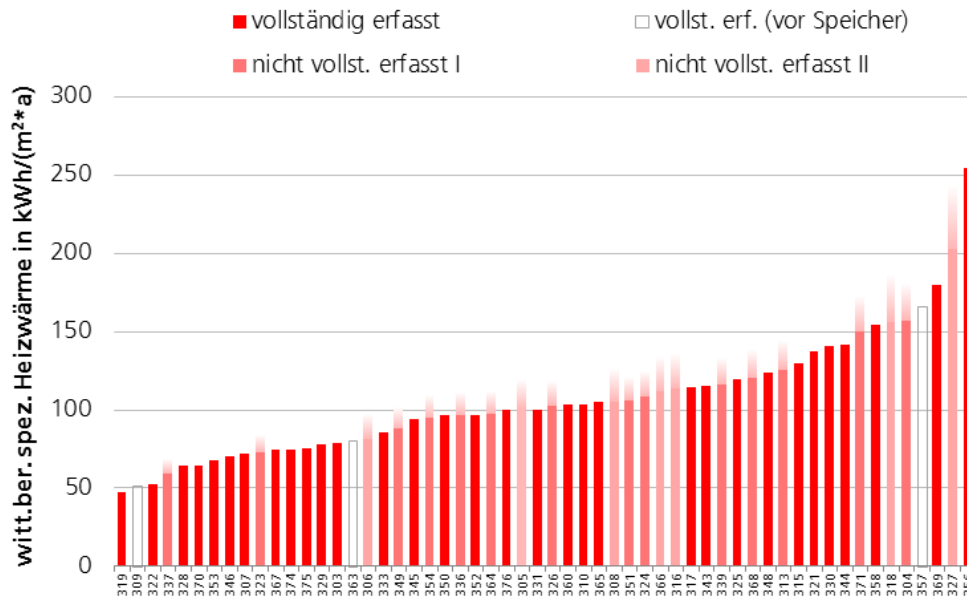


Abbildung 34: Witterungsbereinigter spezifischer Heizwärmeverbrauch der 56 Messobjekte

Abbildung 35 zeigt die im Durchschnitt täglich gezapfte Wärmemenge, getrennt nach der Anzahl der versorgten Wohneinheiten. In Abbildung 36 ist die Wärmemenge – als spezifischer Jahreswert auf die beheizte Gebäudefläche bezogen – dargestellt. Unterbrechungen der Datenaufzeichnung (vgl. Kapitel 4.1) wurden mit folgendem Ansatz ersetzt. In den fehlenden Messzeiten wurde die durchschnittliche Zapfung des jeweiligen Messobjektes berücksichtigt. Es zeigt sich eine sehr große Streuung des Trinkwasserbedarfes in den einzelnen Gebäuden. So liegt die durchschnittliche Wärmemenge der Trinkwasserzapfung je Wohneinheit zwischen 0,4 kWh/d und 10,8 kWh/d (Median 3,1 kWh/d). Bezogen auf die beheizte Fläche ergibt sich eine Bandbreite von 1 kWh/(m²*a) bis 31 kWh/(m²*a) (Median 8 kWh/(m²*a)). Die große Varianz wird sowohl auf unterschiedliche Nutzergewohnheiten als auch auf sehr unterschiedliche Belegdichten zurückzuführen sein.

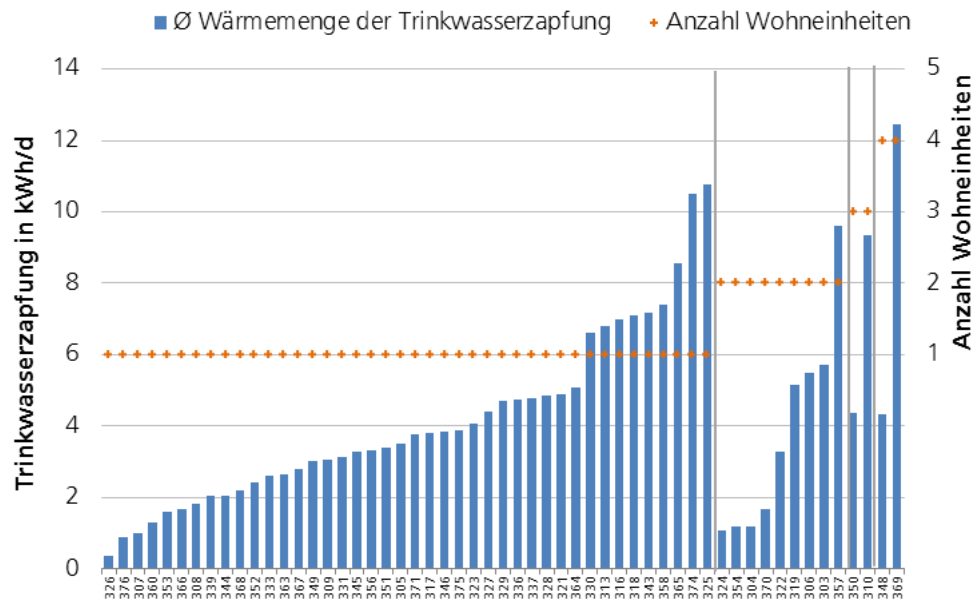


Abbildung 35: Wärmemenge der Trinkwasserzapfung als durchschnittlicher Tagesmittelwert von 55 Messobjekten sowie Angabe der Wohneinheiten des Gebäudes, die über die Wärmepumpenanlage versorgt werden

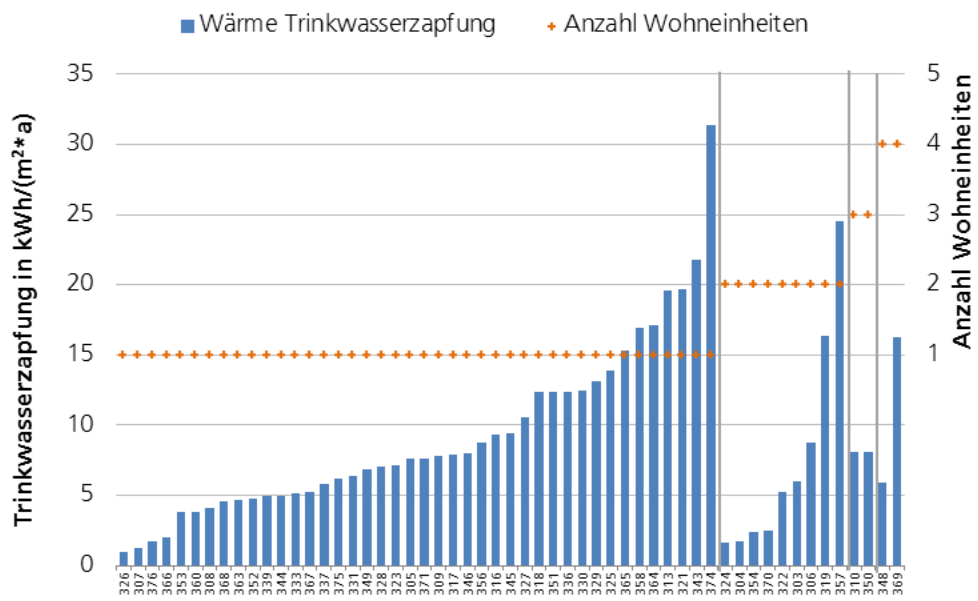


Abbildung 36: Wärmemenge der Trinkwasserzapfung bezogen auf die beheizte Gebäudefläche von 55 Messobjekten sowie Angabe der Wohneinheiten des Gebäudes, die über die Wärmepumpenanlage versorgt werden

4.9 Heizkreistemperaturen

Die Anlageneffizienz einer Wärmepumpenanlage wird maßgeblich von den Einsatzbedingungen bestimmt. Hierzu zählt die Heizkreistemperatur der jeweiligen Anlage. Ausschlaggebend für die erforderliche Heizkreistemperatur sind die Heizlast des Gebäudes

sowie der Typ und die Dimensionierung des Raumwärmeübergabesystems. Daneben wirken sich weitere Faktoren (hydraulischer Abgleich, Regelung, Nutzerverhalten, u.a.) auf die vorhandenen Heizkreistemperaturen aus. Bei Einsatz eines Heizungsspeichers, Beimischschaltungen oder anderer hydraulischer Einbauten liegt die Betriebstemperatur der Wärmepumpe entsprechend dem Einfluss dieser Komponenten höher als die vorhandene Heizkreistemperatur. In diesem Kapitel werden die Betriebstemperatur der Wärmepumpe¹ im Modus Raumheizung in den untersuchten Objekten vorgestellt. Als Kenngröße wird der energetisch gewichtete Jahresmittelwert berechnet. Darüber hinaus erfolgt eine Betrachtung der Außentemperaturabhängigkeit der Betriebstemperatur.

4.9.1 Methodik der Analyse

Die Methode zur vergleichenden Darstellung der Betriebstemperatur der Wärmepumpe wird exemplarisch anhand der in Abbildung 37 gezeigten Anlage erläutert. In der Grafik ist die Vorlauf- und die Rücklauf Temperatur der Wärmepumpe (energetisch gewichtete Tagesmittelwerte) über der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwert während der Wärmepumpenbetriebszeit im Raumheizmodus)² dargestellt. Bei einer Mehrzahl der Anlagen zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Betriebstemperatur und der Außenlufttemperatur, so dass für 46 Anlagen³ eine Trendlinie zur Charakterisierung gebildet werden konnte. Als funktionaler Zusammenhang der Trendlinie wurde eine Funktion gewählt, mit der sich auch witterungsgeführte Heizkurven gut abbilden lassen.

$$T_{WP} = T_R + b + s * (T_R + b - T_{AUL})^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

T_R	Raumtemperatur (hier: 20°C)
T_{AUL}	Temperatur der Außenluft
b	Faktor zur diagonalen Verschiebung der Kurve (hier: anlagenspezifisch angepasst)
s	Faktor zur Änderung der Steigung der Kurve (hier: anlagenspezifisch angepasst)
n	Faktor zur Änderung der Krümmung der Kurve (hier: anlagenspezifisch angepasst)

Da bei einigen Anlagen die Betriebstemperaturen bei niedrigen oder hohen Außenlufttemperaturen konstant sind, wurde – wenn zutreffend – die Trendlinie ergänzend zu

¹ An dieser Stelle wird nicht die Heizkreistemperatur („nach“ Heizungsspeicher) gewählt, sondern die Temperatur „vor“ Heizungsspeicher, da diese in den folgenden Analysen als direkte Einflussgröße auf die Anlageneffizienz herangezogen wird.

² Bei 43 Messobjekten wird der installierte Außenlufttemperatursensor verwendet. Bei 13 Messobjekten werden aufgrund ungünstiger Sensorpositionierung oder fehlerhafter Messwerte stattdessen die Daten der nächstgelegenen DWD-Station verwendet. (vgl. Kapitel 3.4.4)

³ Bei den anderen 10 Anlagen wurde aus folgenden Gründen auf eine Erstellung einer Trendlinie verzichtet, da eine Charakterisierung mit einer Linie nicht möglich erschien: häufige Änderungen der Heizkurve während der Messperiode, hoher Einfluss des Kesselbetriebes bei bivalenten Anlagen, keine „niedrigen“ Außenlufttemperaturen vorhanden, die eine Aussage der Betriebstemperaturen in eben diesem Temperaturbereich ermöglichen.

der außenlufttemperaturabhängigen Funktion aus einer maximalen bzw. minimalen Temperatur gebildet. Bei einigen Anlagen hat sich der Zusammenhang zwischen Betriebstemperatur und Außenlufttemperatur während der Messperiode geändert (z.B. in Folge der Anpassung der Heizkurvenparametrierung). Wenn diese Änderungen klein waren, wurde die Trendlinie „mittig“ gelegt und wenn die Änderung eher am Anfang oder Ende der Heizperiode vorgenommen wurde, so wurde die Trendlinie an dem Bereich mit den meisten Heiztagen orientiert. Bei vielen und gravierenden Änderungen wurde keine Trendlinie ermittelt.

Als Vergleichsgröße für die Auswertung der Betriebstemperaturen der Wärmepumpe wird in diesem Kapitel die Rücklauftemperatur gewählt. Hintergrund ist, dass viele der Hersteller angeben, die Rücklauftemperatur als Regelgröße für die Regelung der Heizkreistemperatur zu nutzen. Die erstellten Trendlinien der Wärmepumpen-Betriebstemperatur geben einen guten Hinweis auf die Charakteristik der Heizkurve der jeweiligen Anlage, spiegeln diese jedoch nicht direkt wider. Die Unterschiede zwischen Wärmepumpen-Betriebstemperatur und eingestellter Heizkurve können – je nach Regelungsansatz und anderen Randbedingungen – geringer oder größer ausfallen. Die folgenden Beispiele verdeutlichen einige der Aspekte:

- Unterschiede im Bezugszeitraum der Außenlufttemperatur bei witterungsgeführten Regelungen (z.B. gleitender Mittelwert über 1 h oder 12 h)¹
- Regelung auf die Vorlauftemperatur² oder auf die Speichertemperatur³
- Regelung ist nicht nur witterungsgeführt, z.B. alleinig oder ergänzend raumtemperaturabhängig
- betriebliche Effekte, die sich bei kurzen Betriebszeiten (Beginn / Ende der Heizperiode) auswirken (Mindestlaufzeit, Umschaltung von Trinkwasser- auf Raumheizmodus, u.a.)⁴

Das Wetter war während der Messperiode überdurchschnittlich warm und es traten nur vereinzelt „niedrige“ Außenlufttemperaturen auf (vgl. Kapitel 4.7, Anhang „Vorstellung der einzelnen Anlagen“). Zu einer groben Einschätzung der (vermutlichen) Betriebstemperaturen bei Norm-Außentemperaturen wurde die Trendlinie bis -12°C extrapoliert. Auch wenn die Norm-Außentemperaturen einiger Standorte (deutlich) niedriger sind, wurde der Wert von -12°C für alle Anlagen einheitlich gewählt, da eine größere Extrapolation mit größeren Unsicherheiten und damit einer geringen Belastbarkeit der Aussage verbunden wäre. Wie in Abbildung 37 gezeigt, erfolgt die Darstellung der (vermutlichen) Bandbreite der Rücklauftemperatur der Wärmepumpe bei Außenlufttemperaturen zwischen -12°C und +12°C in Form einer Säule.

¹ Wie notiert wird für die Darstellung der Betriebstemperatur der Wärmepumpe der Tagesmittelwert während dem Wärmepumpenbetrieb verwendet und damit kein „zeitlicher Versatz“ zwischen Außenlufttemperatur und Betriebstemperatur angesetzt. Hintergrund für die Vorgehensweise ist, dass nicht bekannt ist, welcher Ansatz in den einzelnen Anlagen angewendet wird und damit ohnehin keine Berücksichtigung dieser bei der Auswertung stattfinden kann. Die möglichen Unterschiede diesbezüglich beeinflussen die grundsätzliche Charakteristik der Außentemperaturabhängigkeit bei Betrachtung auf Tagesebene gering, erhöht eher die Streuung der Werte.

² Bei fixed-speed Wärmepumpen (insbesondere AUL/Wasser-Wärmepumpen) weist der Zusammenhang der Rücklauf- mit der Außenlufttemperatur eine höhere Steigung auf als der Zusammenhang Vorlauf- und Außenlufttemperatur. Hintergrund ist die mit sinkender Außenlufttemperatur und damit größerem Temperaturhub sinkende Heizleistung der Wärmepumpe.

³ Das Ausmaß der Unterschiede der Charakteristik der Betriebstemperatur im Rücklauf und der im Regler eingestellten Heizkurve auf eine Speichertemperatur ist u.a. abhängig von der Höhe des Regelungssensors.

⁴ Bei höheren Außenlufttemperaturen liegen die Betriebstemperaturen daher mitunter höher, als es der Heizkurve nach erforderlich wäre.

Die Darstellung der Betriebstemperaturen der einzelnen Anlagen erfolgt im Anhang „Vorstellung der einzelnen Anlagen“, die vergleichende Darstellung in Kapitel 4.9.2.

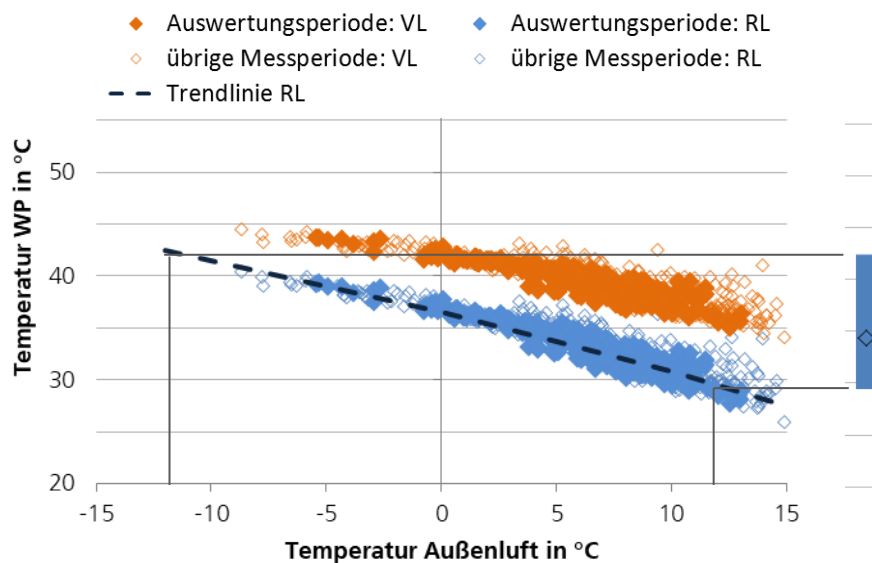


Abbildung 37: Vorlauf- und Rücklauftemperatur einer Wärmepumpe über der Außenlufttemperatur mit Trendlinie der Rücklauftemperatur (links), (mutmaßlichen) Bandbreite der Rücklauftemperatur bei Außenlufttemperaturen zwischen -12°C und $+12^{\circ}\text{C}$ sowie energetisch gewichteter Mittelwert der Rücklauftemperatur (rechts)

4.9.2 Ergebnisse

In den folgenden Abbildungen sind die Rücklauftemperaturen der Wärmepumpen in Form der o.g. Trendlinien (vgl. Kapitel 4.9.1) getrennt für Anlagen die ausschließlich Fußbodenheizungen (Abbildung 38), ausschließlich Heizkörper, sei es Glieder-, Plattenheizkörper, o.a. (Abbildung 39) oder unterschiedliche Arten von Wärmeübergabesysteme nutzen (Abbildung 40). Wie in Kapitel 4.5.1 eingeführt werden die sogenannten Mischsysteme in drei Untergruppen unterteilt: „flächenheizungsgeführt“, „heizkörpergeführt“ und Systeme, die sich nicht der ein oder anderen Kategorie zuordnen lassen. Ergänzend sind in der Abbildung 41 die energetisch gewichteten Mitteltemperaturen der Rücklauftemperaturen aufgeführt.

Es zeigt sich auch innerhalb der Gruppen an Wärmeübergabesystemen eine sehr große Bandbreite der Temperaturen. Im Folgenden ist jeweils die (vermutliche) Vorlauf-/Rücklauftemperatur¹ der Anlagen mit den höchsten und den niedrigsten Betriebstemperaturen aufgeführt.

¹ Die Rücklauftemperatur entspricht dem Wert der dargestellten Trendlinie. Die Trendlinie der Vorlauftemperatur ist nicht dargestellt, wurde jedoch anhand der Trendlinie der Rücklauftemperatur und der Spreizung ebenso für jede Anlage bestimmt.

Systeme, die ausschließlich Fußbodenheizung bzw. „flächenheizungsgeführte“ Mischsysteme einsetzen:

- bei -12°C : von $33/28^{\circ}\text{C}$ bis $44/40^{\circ}\text{C}$
- bei $+12^{\circ}\text{C}$: von $29/24^{\circ}\text{C}$ bis $40/35^{\circ}\text{C}$
- energetisch gewichteter Mittelwert: von $30/24^{\circ}\text{C}$ und $42/37^{\circ}\text{C}$.

Systeme, die ausschließlich Heizkörper (Glieder-, Plattenheizkörper, u.a.) bzw. „heizkörpergeführte“ Mischsysteme einsetzen:

- bei -12°C : von $39/32^{\circ}\text{C}$ bis $64/56^{\circ}\text{C}$
- bei $+12^{\circ}\text{C}$: von $34/26^{\circ}\text{C}$ bis $52/41^{\circ}\text{C}$
- energetisch gewichteter Mittelwert: von $35/28^{\circ}\text{C}$ und $58/49^{\circ}\text{C}$.

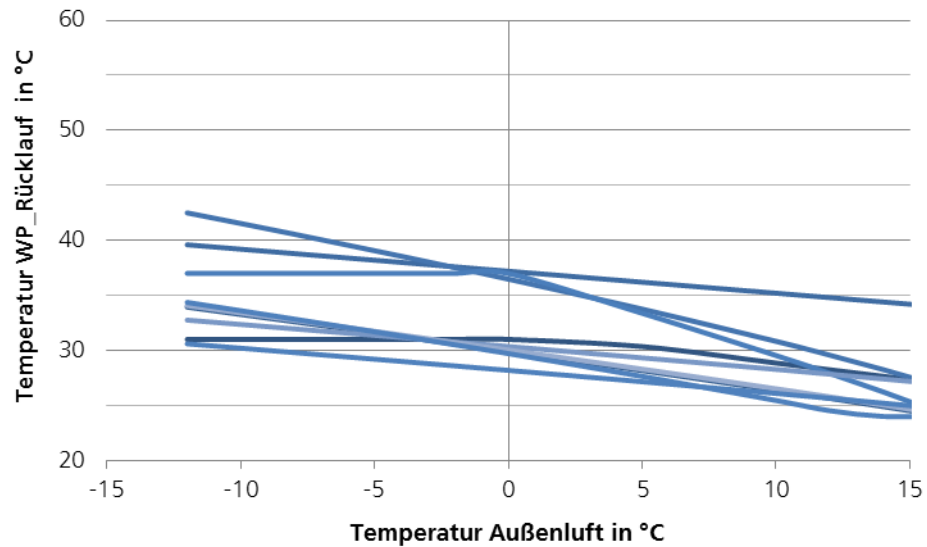


Abbildung 38: Trendlinien der Wärmepumpen-Rücklauftemperatur von 9 Wärmepumpenanlagen, die nur Fußbodenheizungen als Wärmeübergabesystem einsetzen, in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur

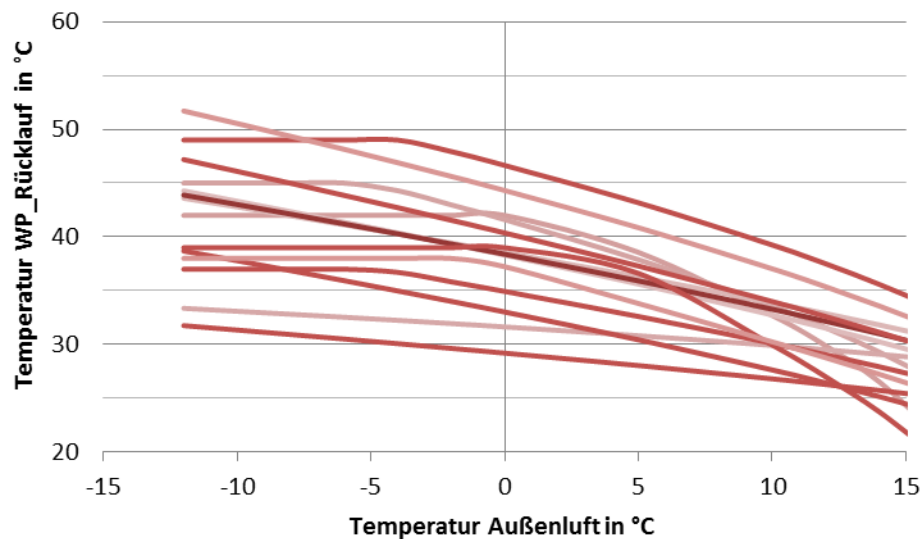


Abbildung 39: Trendlinien der Wärmepumpen-Rücklauftemperatur von 14 Wärmepumpenanlagen, die nur Heizkörper (Glieder-, Plattenheizkörper u.a.) als Wärmeübergabesystem einsetzen, in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur

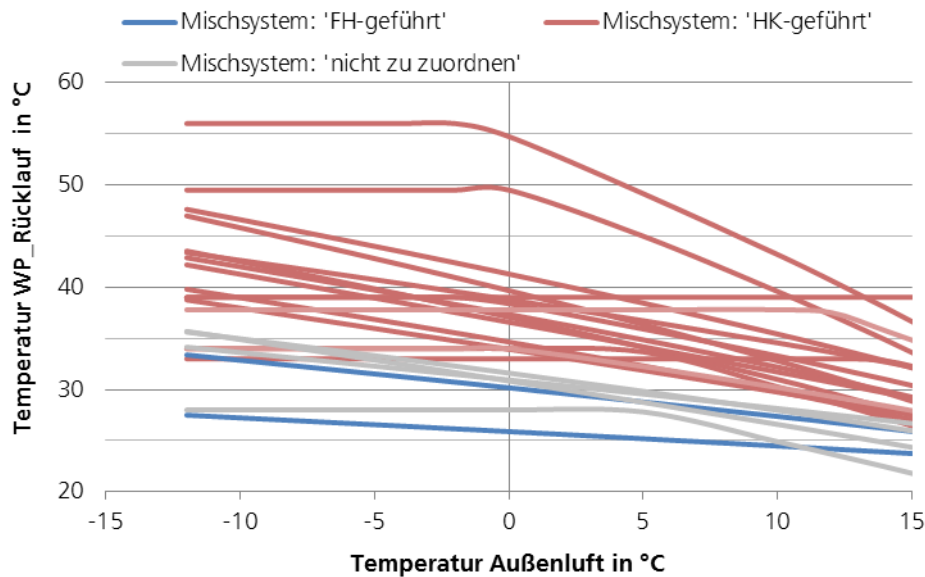


Abbildung 40: Trendlinien der Wärmepumpen-Rücklauftemperatur von 23 Wärmepumpenanlagen, die sowohl Flächenheizungen als auch Heizkörper (Glieder-, Plattenheizkörper u.a.) als Wärmeübergabesystem einsetzen, in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur. Definition der Klassifizierung siehe Kapitel 4.5.1.

In Abbildung 41 sind für alle 46 ausgewerteten Anlagen die – aus den Trendlinien abgeleiteten – Bandbreiten der Rücklauftemperatur bei Außenlufttemperaturen zwischen -12°C und $+12^{\circ}\text{C}$ dargestellt. Die Anlagen sind nach dem jeweiligen energetisch gewichteten Mittelwert der Rücklauftemperatur sortiert. Es zeigt sich zum einen die zu erwartende Tendenz der Verteilung der Arten der Wärmeübergabesysteme: Flächenheizungen werden häufig mit niedrigeren Temperaturen betrieben als Heizkörpersysteme. Zum anderen verdeutlicht es, dass auch Plattenheizkörper bei entsprechender Dimensionierung (und guter Inbetriebnahme) mit Temperaturen betrieben werden können, die im Bereich des Temperaturniveaus von Flächenheizungen liegen. In Kapitel 5.3 wird der Zusammenhang mit dem jeweiligen Sanierungsgrad des Gebäudes in den Blick genommen.

Eine Beispielrechnung in Kapitel 5.3.1 verdeutlicht die Auswirkung der Dimensionierung von Heizkörpern auf die erforderlichen Heizkreistemperaturen. Es werden Plattenheizkörper des gleichen Fabrikats eines Herstellers unterschiedlicher Längen und unterschiedlichen Aufbaus im Hinblick auf Platten- und Lamellenanzahl (Typ 21, Typ 22, Typ 33¹) verglichen. Bei Wahl eines anderen Typs kann die Heizkreistemperatur (Mittelwert aus Vorlauf und Rücklauf) im betrachteten Beispiel von $63,0^{\circ}\text{C}$ (Typ 21) auf $54,1^{\circ}\text{C}$ (Typ 22) bzw. $47,1^{\circ}\text{C}$ (Typ 33) gesenkt werden. Die Erhöhung der Länge von 1,0 m auf 1,5 m geht hier mit einer möglichen Reduktion der Heizkreistemperatur um $11,6^{\circ}\text{C}$ (Typ 21), $9,2^{\circ}\text{C}$ (Typ 22) bzw. $7,3^{\circ}\text{C}$ (Typ 33) einher.

¹ Die erste Zahl beschreibt die Anzahl der Platten, die zweite Zahl die Anzahl der Reihen mit Konvektionslamellen.

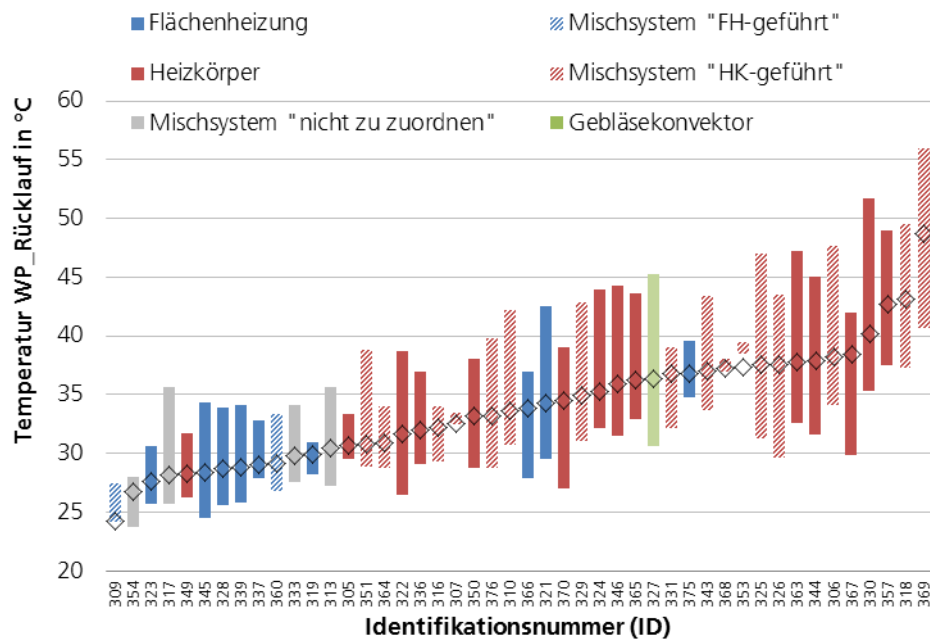


Abbildung 41: Bandbreite der Rücklauftemperatur bei Außenlufttemperaturen zwischen -12°C und $+12^{\circ}\text{C}$ (abgeleitet aus oben gezeigten Trendlinien) sowie die energetisch gewichtete Mitteltemperatur der Rücklauftemperatur. Anmerkung zu zwei IDs siehe Fußnote¹.

¹ ID 353: Die Heizkurve wurde vermutlich Anfang Januar 2019 umgestellt (von einer witterungsgeführten Regelung auf eine konstante Sollwertvorgabe) und dabei erhöht. Die gewählte Trendlinie wurde durch die Messperiode mit der konstanten (höheren) Temperatur gelegt.
ID 309: Die Trendlinie wurde für den Zeitraum 2018/2019 erstellt; der energetisch gewichtete Mittelwert für den Zeitraum 2017/2018.

5

Ergebnisse zur Forschungsfrage 1: Effizienz von Wärmepumpen in bestehenden Einfamilienhäusern

5.1 Definition der Bilanzgrenzen für die Berechnung der Arbeitszahlen

Die Effizienz der Wärmepumpe im realen Betrieb wird durch die Arbeitszahl, dem Quotienten aus bereitgestellter thermischer und aufgewendeter elektrischer Energie beschrieben. Unterschiedliche Effizienzanalysen erfordern die Anwendung unterschiedlicher Bilanzgrenzen zur Ermittlung der Arbeitszahlen. Für die Analysen im vorliegenden Bericht ist die Betrachtung der in Tabelle 5 aufgeführten Bilanzgrenzen erforderlich.

Tabelle 5: Zuordnung der für die jeweilige Bilanzgrenze zutreffenden Komponenten bzw. Messpunkte

Bilanzgrenze	Energie	Komponenten
Arbeitszahl 2	thermisch	• Beladung Trinkwasserspeicher • Beladung Heizungspufferspeicher • Abzüglich thermischer Energie für Abtauung bei Außenluft-Wärmepumpen • <u>ohne</u> Heizstab
	elektrisch	• Alle Verbraucher innerhalb der Wärmepumpe (ohne Pumpen) • <u>ohne</u> Heizstab • Wärmequellenantrieb (Solepumpe oder Ventilator)
Arbeitszahl 3	thermisch	• Beladung Trinkwasserspeicher • Beladung Heizungspufferspeicher • Abzüglich thermischer Energie für Abtauung bei Außenluft-Wärmepumpen • <u>inklusive</u> Heizstab
	elektrisch	• Alle Verbraucher innerhalb der Wärmepumpe (ohne Pumpen) • <u>inklusive</u> Heizstab • Wärmequellenantrieb (Solepumpe oder Ventilator)

Diese Bilanzgrenzen orientieren sich an den Definitionen des EU-Projektes SEPOMO (Zottl et al. 2011), (Zottl and Nordmann 2012). Anhand eines beispielhaften und vereinfachten hydraulischen Schemas sind die beschriebenen Bilanzgrenzen in Abbildung 42 dargestellt.

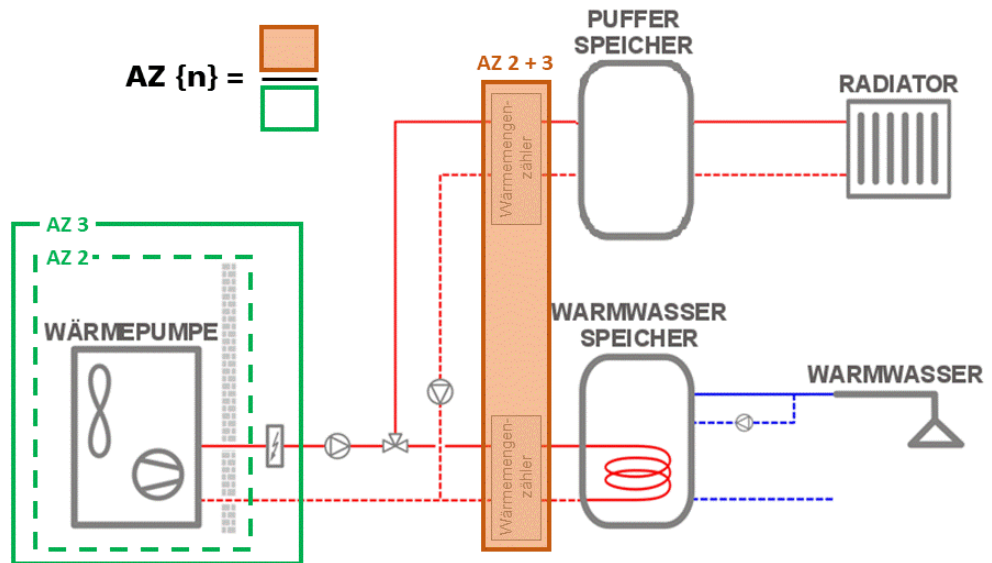


Abbildung 42: Darstellung der Bilanzgrenzen der AZ 2 und AZ 3 am Beispiel einer Außenluft-Wärmepumpenanlage

Die bereitgestellte Wärme der Wärmepumpenanlage wird mit Wärmemengenzählern erfasst, die im Schema durch einen rot-braunen Rahmen gekennzeichnet sind. In der Regel wird die thermische Energie unmittelbar nach der Wärmepumpe gemessen; je nach baulicher Situation a) getrennt nach Raumheizung und Trinkwassererwärmung (vgl. Schema) oder b) als Gesamtwärme und einem der beiden Teilströme (nicht dargestellt). Eine Ausnahme erforderten Kompaktgeräte mit integriertem Trinkwasserspeicher. Aufgrund der kompakten, engen Bauweise konnte keine Installation des Wärmemengenzählers vor dem Speicher realisiert werden. Ebenso wird bei Anlagen mit Direktkondensation im Trinkwasserspeicher kein Wärmemengenzähler installiert. Um in diesen Fällen dennoch Werte für die o.g. Bilanzgrenzen zu ermitteln, wurde bei Sole-Wärmepumpen¹ für Zeiten während der Beladung die bereitgestellte Wärmemenge nach folgender Formel berechnet:

$$Q_{WP,TWE} = Q_{WQ} + (W_{Verd} * 0,95) \quad (12)$$

¹ Der Berechnungsansatz ist bei Außenluft-Wärmepumpen nicht möglich, da hier die Wärmequellenenergie nicht ermittelt wurde; und dies generell nur mit einer hohen Messunsicherheit möglich wäre.

Mit

$Q_{WP,TWE}$	Wärmemenge, die von der Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung bereitgestellt wird
Q_{WQ}	Wärmemenge, die der Wärmequellen entzogen wird
W_{Verd}	Elektroenergiebezug des Verdichters
0,9	Annahme für die Wärmeverluste des Wärmepumpengerätes ¹

Beim Betrieb von Außenluft-Wärmepumpen kann es unter bestimmten Witterungsbedingungen zu einer Vereisung des Außenluftwärmeübertragers kommen. Da diese Eisbildung die Funktion des Wärmeübertragers beeinträchtigt, muss in diesen Fällen Energie aufgewendet werden, um das entstandene Eis abzutauen. Unter den vermessenen Systemen wurden zwei Betriebsweisen der Abtauung identifiziert: Direkt-elektrische Abtauung und Prozessumkehr. Bei der direkt-elektrischen Abtauung wurde der zusätzliche elektrische Energiebezug in den Aufwand der Bilanzgrenzen mit aufgenommen. Bei Systemen mit Prozessumkehr wurde neben dem elektrischen Energiebezug der beteiligten Komponenten auch die dem Heizungssystem wieder entzogene Wärme berücksichtigt. Diese wurde über die Wärmemengenzähler gemessen und bei der Berechnung der Arbeitszahl als Aufwand angerechnet.

Die Bilanzgrenze *Zwei* beschreibt im Wesentlichen die Effektivität der Wärmepumpe zur Wärmebereitstellung inklusive des Aufwandes zur Förderung der Energie aus der Umwelt. Der Unterschied zur Bilanzgrenze *Drei* schließt einzig den elektrischen Heizstab in die Betrachtung mit ein. Die Position der Heizstäbe, ob in der Wärmepumpe, in den Speichern oder an anderer Stelle, spielt bei der Betrachtung keine Rolle. Mögliche weitere Wärmeerzeuger im Gebäude, wie beispielsweise Ölkessel oder Öfen, gehen nicht in die energetische Bewertung der Bilanzgrenze ein. Im Vergleich mit einer Vermessung nach DIN EN 14511 zur Ermittlung und Zertifizierung der Effizienz von Wärmepumpen, zeigen sich Unterschiede. Die Norm berücksichtigt zusätzlich den anteilig Elektroenergieverbrauch der Ladepumpe im Sekundärkreis stellvertretend für den anteiligen Druckverlust im Kondensator. Für Systeme, die in der Lage sind eine Kühlung des Gebäudes durchzuführen, wurden entsprechende Energien ermittelt und aus der Bilanz abgezogen.

Wärmepumpensysteme dienen häufig sowohl der Bereitstellung von Heizwärme als auch zur Trinkwassererwärmung. Diese beiden Betriebsmodi unterscheiden sich in ihren Anforderungen an das Wärmepumpensystem. Für die vorliegenden Bilanzgrenzen werden daher zusätzlich Teilmengen für die einzelnen Betriebsmodi gebildet. Bei diesen Teilmengen handelt es sich um Energien, die eindeutig einem bestimmten Betriebsmodus zuordenbar sind. Diese haben keinen Anspruch in Summe der Gesamtbilanz zu entsprechen. Aufwendungen, die nicht direkt einem bestimmten Betriebsmodus zuordenbar sind, wurden im täglichen Verhältnis der angeforderten Wärme der einzelnen Betriebsmodi aufgeteilt. Dies betraf sowohl die elektrische Energie der Wärmepumpensteuerung als auch die thermische Energie zur Abtauung bei Außenluftanlagen mit Prozessumkehr.

¹ Die Annahme beruht auf der Auswertung aller Wärmepumpenanlagen, bei denen die Wärmemenge sowohl auf der Wärmequellen- als auch auf der Wärmesenkenseite gemessen wurde. Die Differenz bei der Bilanzierung wurde auf die Verdichterenergie bezogen.

5.2 Effizienz und Einflussgrößen

5.2.1 Wärmequellen Außenluft sowie Außenluft und Raumluft

Im Projekt wurden 32 Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung (Wärmquelle Außenluft) sowie neun Systeme mit je einer Wärmepumpe zur Raumheizung (Wärmquelle Außenluft) und einer Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung (Wärmquelle Raumluft; Brauchwasser-Wärmepumpe) untersucht. Im nachfolgenden Kapitel werden die Arbeitszahlen dieser Systeme und die auf sie wirkenden und direkt quantifizierbaren Einflüsse vorgestellt. Dabei werden die jeweils möglichen Bilanzgrenzen und Betriebsmodi berücksichtigt.

Die 32 Außenluft-Wärmepumpen können über beide Betriebsmodi sowie getrennt für Modus Raumheizung und Modus Trinkwassererwärmung bilanziert werden. Außerdem sind prinzipiell die beiden in Kapitel 5.1 genannten Bilanzgrenzen möglich, sofern die jeweils notwendige Messtechnik eingesetzt wurde. Die neun Außenluft-Wärmepumpen, die nur an den Heizkreis angeschlossen sind, werden dementsprechend nur in diesem Modus bilanziert. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln gemeinsam mit den Ergebnissen der 32 Außenluft-Wärmepumpen vorgestellt und entsprechend differenziert gekennzeichnet.

Die Anlage **ID 307** ist ein kompaktes Hybrid-Gerät (bivalentes System), welches einen Kältekreis und Heizöl-Brenner in einem Gehäuse vereint. Aufgrund der beengten Einbausituation für die Messtechnik kann für diese Anlage nur der Modus Raumheizung fundiert ausgewertet werden. Entgegen der Aufteilung der Wärmequellentypen in Kapitel 4.3 werden demnach nachfolgend 31 Außenluft-Wärmepumpen über beide Betriebsmodi und zehn Außenluft-Wärmepumpen für den Modus Raumheizung ausgewertet.

5.2.1.1 Jahresarbeitszahl 3, Anlagencharakterisierung und Betriebsbedingungen

In der Abbildung 44 werden Messergebnisse und charakteristische Eigenschaften der 41 untersuchten Außenluft-Wärmepumpen dargestellt. Hierfür wurden die Anlagen in drei Gruppen aufgeteilt. Links befinden sich die 29 Wärmepumpen, die sowohl zur Raumheizung (RH) als auch zur Trinkwassererwärmung (TWE) betrieben werden und die für den Zeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 auswertbar sind. Die Anlagen **ID 305** und **ID 374** auf der rechten Seite der Grafik werden ebenfalls über beide Betriebsmodi betrieben, können jedoch nicht für den Hauptzeitraum ausgewertet werden (vgl. Kapitel 4.1). Um dennoch Ergebnisse dieser Anlagen zu präsentieren, wird für diese Anlagen in diesem und den nächsten Kapiteln der Auswertzeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 berücksichtigt. Wegen der damit nicht vergleichbaren Witterungsbedingungen gehen die Ergebnisse dieser beiden Anlagen nicht in Mittelwertbildungen ein. Die dritte Gruppe in der Mitte der Grafik umfasst neun Außenluft-Wärmepumpen, die ausschließlich zur Raumheizung eingesetzt werden, da die Trinkwassererwärmung über Brauchwasser-Wärmepumpen erfolgt. Hinzukommt, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, die Wärmepumpe **ID 307**, welche nur zuverlässig für den Modus Raumheizung ausgewertet werden konnte.

In der Grafik werden die JAZ bezogen auf die Bilanzgrenze 3 dargestellt (vgl. Kapitel 5.1), wobei die hellgrünen Säulen die JAZ über beide Betriebsmodi und die dunkelgrünen Säulen die JAZ über den Betriebsmodus Raumheizung zeigen. Die JAZ sind auf der linken vertikalen Achse aufgetragen. Ebenso auf die linke vertikale Achse bezieht sich, zwischen 0 und 1, die von der Wärmepumpe bereitgestellten Energieanteile zur RH (rot) und TWE (blau). Auf der rechten vertikalen Achse werden als Rauten die über den Messzeitraum energetisch gewichteten mittleren Temperaturen zur Raumheizung (rot)

und Trinkwassererwärmung (blau) aufgetragen. Die jeweils dargestellten Bandbreiten geben die dazugehörigen mittleren Vor- und Rücklauftemperaturen an. Als braune Kreise werden die im Messzeitraum maximal von der Wärmepumpe zur RH bereitgestellten Vorlauftemperaturen dargestellt. Auf die Wärmequellentemperaturen wird in diesem Kapitel nur am Rande eingegangen.

Eine Auswahl charakteristischer Eigenschaften wird durch diverse Symbole dargestellt. Zum Beispiel sind Anlagen mit zusätzlichem Wärmeerzeuger, wie fossil betriebenen Kessel (Gas: schwarzgelber Kreis; Heizöl: schwarzer Kreis), Solarthermieanlage (RH: orangefarbener Kreis, TWE; gelber Kreis) sowie zusätzlichem Ofen (Dreiecke) entsprechend gekennzeichnet. Bei den Kamin- bzw. Schwedenöfen gibt die Färbung der Dreiecke deren Einfluss auf den Deckungsbeitrag zur Raumheizung wieder (vgl. Kapitel 4.6), wobei zwischen keinem (grün), geringem (gelb), größerem (rot) sowie unbekanntem (weiß) Beitrag unterschieden wird. Der lila eingefärbte Kreis gibt an, dass diese Anlage während der Messung smart betrieben wurde, was aufgrund des abweichenden Auswertungszeitraumes ausschließlich auf die Anlage **ID 374** zutrifft. Ferner verdeutlicht die Grafik in Form türkisfarbener Rauten, falls vorhanden, die Möglichkeit der Leistungsregelung. Bei Rauten mit Rahmen handelt es sich um zwei Verdichter-Stufen, ohne Rauten sind die Wärmepumpen Inverter geregelt. Die Wärmeübergabesysteme (WÜS) werden als geschichtete Säulen auf der linken vertikalen Achse zwischen 0 und 1 aufgetragen, wobei die 1 gleich 100 % entspricht. Die Färbung gibt die Art des WÜS, der Anteil den Flächenanteil an der beheizten Fläche an. Wohnbereiche, die ausschließlich über Flächenheizungen erwärmt werden, sind weiß dargestellt. Bei ausschließlicher Nutzung von Heizkörpern sind die Abschnitte schwarz, bei Gebläsekonvektoren grau gekennzeichnet. Kombiniert beheizte Flächen sind in der Regel mit Fußbodenheizungen und Heizkörpern ausgestattet und in der Grafik entsprechend schraffiert dargestellt. Weitergehende Informationen zu den WÜS vermittelt das Kapitel 4.5.1.

Wärmepumpen zur Raumheizung (RH) und Trinkwassererwärmung (TWE)

Die Messergebnisse der 29 Außenluft-Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung werden in der Abbildung 44 links dargestellt. Die Grafik verdeutlicht, dass die JAZ von 2,5 bis 4,6 reichen, wobei die JAZ der Anlagen **ID 354** und **ID 360** mit Werten von 4,1 und 4,6 nach oben abweichen. Daher werden die zusätzlich in der Abbildung 43 dargestellten Mittelwerte in zwei Gruppen geteilt: die Grafik links berücksichtigt die Ergebnisse aller 29 Wärmepumpen, in der Grafik rechts werden die Anlagen **ID 354** und **ID 360** nicht berücksichtigt. Inklusive Ausreißer liegt die mittlere JAZ bei 3,16, exklusive der Ausreißer bei 3,07. Die mittleren Betriebsbedingungen korrelieren entsprechend mit höheren Wärmesenken- sowie geringeren Wärmequellentemperaturen für die Anlagengruppe ohne Ausreiser. Die Differenzen sind jedoch, verglichen mit jenen einer identischen Betrachtung (mit/ohne Ausreißer) für die Erdreich-Wärmepumpen (vgl. Kapitel 5.2.2.1), relativ gering. Daher erfolgt die Ergebnisinterpretation bei den Außenluft-Wärmepumpen im Hinblick auf die Bandbreiten und Mittelwerte auf die gesamte Anlagengruppe inkl. beider Ausreißer, bei den Erdreich-Wärmepumpen hingegen ohne Ausreißer (eine Anlage).

Die Wärmepumpen dieser Anlagengruppe werden im Mittel (energetisch gewichtet) bei einer Wärmequellentemperatur von 4,8°C betrieben, wobei die Bandbreite von 2,2°C (**ID 376**) bis 7,1°C (**ID 360**) reicht. In der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt wird die Wärmepumpe **ID 364**. Diese nutzt als einzige eine solegeführte Wärmequellenanlage, wobei die Soleeintrittstemperatur im Mittel bei 3,0°C lag.

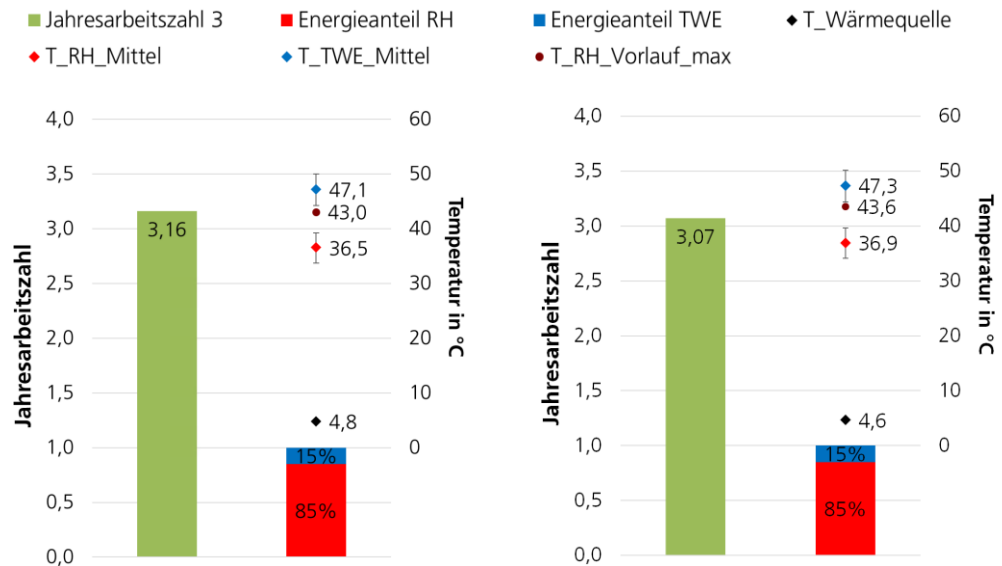


Abbildung 43: Mittelwerte diverser Größen der 29 Außenluft-Wärmepumpen im Messzeitraum Juli 2018 bis Juni 2019; links: alle Anlagen, rechts ohne ID 345 und ID 360 mit extrem hohen Jahresarbeitszahlen

Die von den untersuchten Wärmepumpen bereitgestellte thermische Energie wird im Mittel zu 85 % zur Raumheizung (RH) und zu 15 % zur Trinkwassererwärmung genutzt (TWE). Dieses Verhältnis verdeutlicht die Einflüsse der jeweils zur RH und TWE erforderlichen Temperaturniveaus auf die Gesamteffizienz. Entsprechend der individuellen Verbräuche zur RH und TWE weisen die Energieanteile eine große Bandbreite auf und reichen bzgl. der TWE von 4 % bei **ID 371** bis zu 42 % bei **ID 319**.

Die Mitteltemperaturen zur Trinkwassererwärmung liegen durchschnittlich bei 47,1°C und bewegen sich zwischen 41,2°C (**ID 339**) und 53,2°C (**ID 315**). Die Spreizungen zwischen Vor- und Rücklauf bei der TWE liegen im Mittel bei 5,8 K und reichen von 3,0 K (**ID 304**) und 9,8 K (**ID 368**).

Anders als beim Modus zur TWE zeigen sich im Modus RH Abhängigkeiten zwischen Temperaturen und Effizienz (vgl. Kapitel 5.3): höhere Jahresarbeitszahlen werden tendenziell für Wärmepumpen mit geringeren mittleren Heizkreistemperaturen ermittelt. Im Mittel liegen die Temperaturen zur Raumheizung bei 36,5°C, wobei die Bandbreite von 29,8°C bei **ID 354** bis 43,1°C bei **ID 330** reicht. Die Spreizungen zwischen Vor- und Rücklauf liegen im Mittel bei 5,5 K und reichen von 3,0 K bei **ID 371** bis 7,8 K bei **ID 368**. Die mittleren Heizkreistemperaturen lassen zunächst nicht vermuten, dass die untersuchten Wärmepumpen in Altbauten betrieben werden. Dies hängt u.a. mit folgenden Aspekten zusammen:

- Je nach Klimaregion konzentriert sich die zur RH erforderliche Energie bei Außenlufttemperaturen grob in einem Bereich zwischen 0°C und 5°C; entsprechend der hinterlegten Heizkurve liegt die mittlere Heizkreistemperatur auf einem damit korrespondierenden Niveau und weist eine entsprechende Differenz zur erforderlichen Heizkreistemperatur im Auslegungspunkt auf.
- Die mittlere Außenlufttemperatur im Auswertungszeitraum ist geringer als der langjährige Durchschnittswert, was sich gemäß hinterlegter Heizkurve in geringeren Heizkreistemperaturen widerspiegelt (vgl. Kapitel 4.7).
- Die Wärmepumpen werden in Gebäuden unterschiedlicher energetischer Qualität betrieben (vgl. Kapitel 4.2, vgl. Kapitel 5.3).
- Die Systeme werden mit sehr unterschiedlichen Heizkreistemperaturen betrieben. Dies ist zum einen auf unterschiedliche Arten der WÜS zurückzuführen

(Flächenheizung vs. Heizkörper). Zudem zeigt sich bei den Systemen, die (ausschließlich oder teilweise, aber temperaturbestimmend¹) Heizkörper einsetzen, eine große Bandbreite an Betriebstemperaturen. In dieser Gruppe der Systeme gibt es auch Anlagen, bei denen die mittleren Betriebstemperaturen auf dem Niveau der Systeme, die nur Fußbodenheizungen einsetzen, liegen. (vgl. Kapitel 5.3).

- Bei alternativ-bivalent betriebenen Wärmepumpensystemen liegt die minimale Außenlufttemperatur, bis zu der die Wärmepumpe betrieben wird, ggf. planmäßig oberhalb der Normauslegungstemperatur, und dementsprechend die mittleren Betriebstemperaturen höher als bei Wärmepumpensystemen mit gleicher Heizkurve, jedoch ohne Abschaltpunkt.

Die mittleren Heizkreisvorlauftemperaturen liegen bei 39,2°C. Die im Mittel maximal gemessenen Vorlauftemperaturen liegen bei 43,0°C, wobei hier die Bandbreite von 34,6°C (**ID 323**) bis 52,4°C (**ID 330**) reicht. Keine Berücksichtigung erfährt die maximal gemessene Vorlauftemperatur der **ID 368**, da für diese Anlage eine mit abnehmender Außenlufttemperatur absinkende Heizkreistemperatur ermittelt wurde. Die Maximaltemperaturen sind Tagesmittelwerte und es wurde darauf geachtet, dass diese Werte nicht durch den Betrieb zusätzlicher Wärmeerzeuger wie Heizstäbe, Heizkessel oder Solarthermieanlagen beeinflusst wurden. Die Außenlufttemperaturen an Tagen mit maximalen Heizkreisvorlauftemperaturen liegen im Mittel bei -3,0°C und damit oberhalb von den Normauslegungstemperaturen, die bei den untersuchten Anlagen zwischen -12°C und -16°C liegen.

Bezüglich der Wärmeübergabesysteme (WÜS) bestätigt die Abbildung 44, dass der Einsatz von Fußbodenheizungen (FBH) geringe Heizkreistemperaturen und damit hohe JAZ ermöglicht. Dem entsprechend sortieren sich JAZ von Anlagen, die ausschließlich FBH nutzen, tendenziell im oberen Bereich ein. Für Anlagen mit Fußbodenheizung wurden mittlere Heizkreistemperaturen von 33,2°C und mittlere maximale Heizkreisvorlauftemperaturen von 38,5°C gemessen, was über den für Neubauten typischen Temperaturen liegt (Günther et al. 2014). Hervorzuheben sind diesbezüglich die maximalen Vorlauftemperaturen der Wärmepumpen **ID 366** mit 43,4°C und **ID 321** mit 43,7°C. Bei ausschließlicher Nutzung von Heizkörpern wurden im Mittel höhere Temperaturen gemessen. Während bei diesen WÜS die mittleren Temperaturen bei 37,9°C liegen, wurden maximale Vorlauftemperaturen von 45,7°C gemessen. Bezüglich der maximalen Vorlauftemperaturen bei Heizkörper-Systemen sind die Anlagen **ID 349** mit 37,9°C und **ID 322** mit 41,1°C hervorzuheben. Beide Anlagen erreichen überdurchschnittliche JAZ von jeweils 3,3. Mit 3,8 eine noch höhere JAZ erreicht die Anlage **ID 350**, die ebenfalls ausschließlich mit Heizkörpern betrieben wird. Vor allem diese Beispiele, aber auch alle anderen dieser Gruppe (minimale JAZ: 2,5), verdeutlichen, dass Wärmepumpen auch mit Heizkörpern, zumindest unter ökologischem Gesichtspunkt (vgl. Kapitel 5.5), zweckmäßig betrieben werden können. Die geringen Temperaturniveaus können u.a. auf eine bereits bestehende Überdimensionierung, dem Austausch mit großzügig dimensionierten Heizkörpern oder der Reduzierung der Heizlast durch Maßnahmen an der Gebäudehülle zurückzuführen sein. Die Anlage **ID 327** wird ausschließlich mit Gebläsekonvektoren bei mittleren Heizkreistemperaturen (maximalen Heizkreisvorlauftemperaturen) von 39,1°C (48,6°C) betrieben und erreicht eine durchschnittliche JAZ von 3,0. Bei Anlagen mit kombinierten WÜS muss die Wärmepumpe im Mittel Temperaturen von 37,0°C bereitstellen, die maximalen Vorlauftemperaturen liegen bei 43,4°C. Zu dieser Gruppe gehört auch die Wärmepumpe **ID 360** mit der höchsten JAZ von 4,6. Das Gebäude ist (fast ausschließlich) über Flächenheizung be-

¹ Vgl. Kapitel 4.5.1

heizt und nur im Bad ist zusätzlich ein Heizkörper installiert, der jedoch nur auf dem für die Fußbodenheizung erforderlichen Temperaturniveau betrieben wird. Bei dieser Anlage liegen die mittleren Heizkreistemperaturen bei 31,6°C. Bei allen Außenluft-Wärmepumpenanlagen mit kombinierten WÜS stellt die Wärmepumpe die Wärme zur Raumheizung nur auf einem Temperaturniveau bereit. Sollte die für die FBH benötigte Heizkreistemperatur niedriger sein als für die Heizkörper erforderlich, so wird diese durch Rücklaufbeimischung verringert (Kapitel 4.5.1). Dies wird an dieser Stelle entsprechend „offen“ formuliert, da – wie oben erwähnt – es unter den untersuchten Anlagen mit kombinierten WÜS auch Beispiele gibt, bei denen die von der Wärmepumpe bereitgestellte Heizkreistemperatur bereits auf dem für FBH typischen Temperaturniveau liegt.

Ein Teil der Anlagen ist neben den Elektroheizstäben mit weiteren zusätzlichen Wärmeerzeugern, wie Heizkessel, Solarthermieranlagen oder autarken Kaminöfen o.ä. ausgestattet. Die in Abbildung 44 dargestellten JAZ betreffen allein den Wärmepumpenbetrieb, dennoch beeinflussen die genannten zusätzlichen Wärmeerzeuger durch ihre individuellen Deckungsbeiträge bei der RH und TWE die JAZ. Werden Heizkessel eingesetzt, sollten diese den tendenziell ineffizienteren Betrieb, wenn hohe Wärmesenken- und geringe Wärmequellentemperaturen vorliegen, abdecken und damit zu einer besseren JAZ der Wärmepumpen beitragen. In der hier adressierten Anlagengruppe liegen die JAZ der Wärmepumpen als Teil bivalenter Systeme, abgesehen von der **ID 356** mit 3,3, unterhalb des Mittelwertes von 3,17, was zum Großteil auf die jeweiligen Einsatzbedingungen zurückgeführt werden kann. Eine detaillierte Betrachtung der bivalenten Systeme erfolgt im Kapitel 5.4. Die bei den untersuchten Anlagen zusätzlich zum Einsatz kommenden Öfen können nur zur Raumheizung beitragen. Inwiefern sich deren Deckungsbeiträge auf die Effizienz der Wärmepumpen auswirken, ist stark vom Nutzerverhalten abhängig. Mit größeren Differenzen der erforderlichen Temperaturen zur RH und TWE, wird eine Zunahme der Deckungsbeiträge der Öfen zu einer Verringerung der JAZ der Wärmepumpe beitragen (d.h. Teile des effizienteren Modus werden vom Ofen gedeckt), insbesondere wenn die Deckungsbeiträge bei (gemäß Heizkurve) geringeren Heizkreistemperaturen auftreten. Ähnlich wie auch bei den Anlagen mit zusätzlichem Heizkessel liegen die JAZ der Anlagen mit Öfen eher im unteren Bereich: von sieben der zehn Messobjekte mit zusätzlichen Öfen liegen die JAZ unterhalb des Mittelwertes. Der tatsächliche Einfluss der Öfen kann jedoch aufgrund der nicht erfolgten messtechnischen Untersuchung dieser nicht quantifiziert werden.

Mit zunehmender Differenz zwischen den Temperaturen zur RH und TWE gewinnen die Energieanteile beider Betriebsmodi an Bedeutung für die JAZ. Bei den Anlagen **ID 330**, **ID 327** sowie **ID 356** ist dies aufgrund ähnlicher mittlerer Temperaturen kaum relevant. Das Gegenteil ist bspw. bei der Anlage **ID 319** der Fall. Bei dieser Anlage fallen die 47,8°C zur TWE aufgrund des 42 % Energieanteils der TWE ähnlich stark ins Gewicht wie die sehr geringen 32,1°C zur Raumheizung. Dieses Verhältnis und die vergleichsweise geringe Norm-Leistungszahl (vgl. Kapitel 4.4) tragen dazu bei, dass die JAZ relativ gering ausfällt.

Bezüglich der Wärmepumpen mit JAZ kleiner 2,8 kann neben den vergleichsweise hohen Temperaturen zur RH angemerkt werden, dass die JAZ der Anlage **ID 344** durch signifikanten Einsatz des Elektroheizstabes und die JAZ der Anlage **ID 368** durch eine vergleichsweise geringe Norm-Leistungszahl negativ beeinflusst wurden.

Die JAZ oberhalb von 3,5 werden, neben den geringen Temperaturen zur RH, bei den Anlage **ID 323** und **ID 350** durch relativ geringen Energieanteile zur TWE (9 % bzw. 12 %) und vergleichsweise hohen Norm-Leistungszahlen sowie bei den Anlagen **ID 354** und **ID 360** durch ebenfalls relativ hohe Norm-Leistungszahlen, zusätzlich positiv beeinflusst. Die Anlage **ID 360** wird zudem mit den im Mittel höchsten Wärmequellentemperaturen von 7,1°C betrieben. Ebenso gilt anzumerken, dass JAZ der Wärme-

pumpen **ID 323** (6 %) und **ID 354** (1 %) durch Einsatz der Elektroheizstäbe negativ beeinflusst wurden.

Die beiden für den Zeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 ausgewerteten Wärmepumpen **ID 374** und **ID 305** erreichen JAZ von 2,7 bzw. 2,9. Ein Vergleich mit den Mittelwerten der übrigen Gruppe ist aufgrund der unterschiedlichen Witterungsbedingungen nicht zulässig. Beide Anlagen nutzen ausschließlich Heizkörper als WÜS, weswegen die geringer mittlere Temperatur zur RH von 33,7°C bei der **ID 305** hervorzuheben ist. Bezüglich der Anlage **ID 374** muss darauf hingewiesen werden, dass diese im Auswertungszeitraum zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert wurde und entsprechend des individuellen Regelungsansatzes in ihrem Betriebsverhalten abweicht (vgl. Kapitel 6).

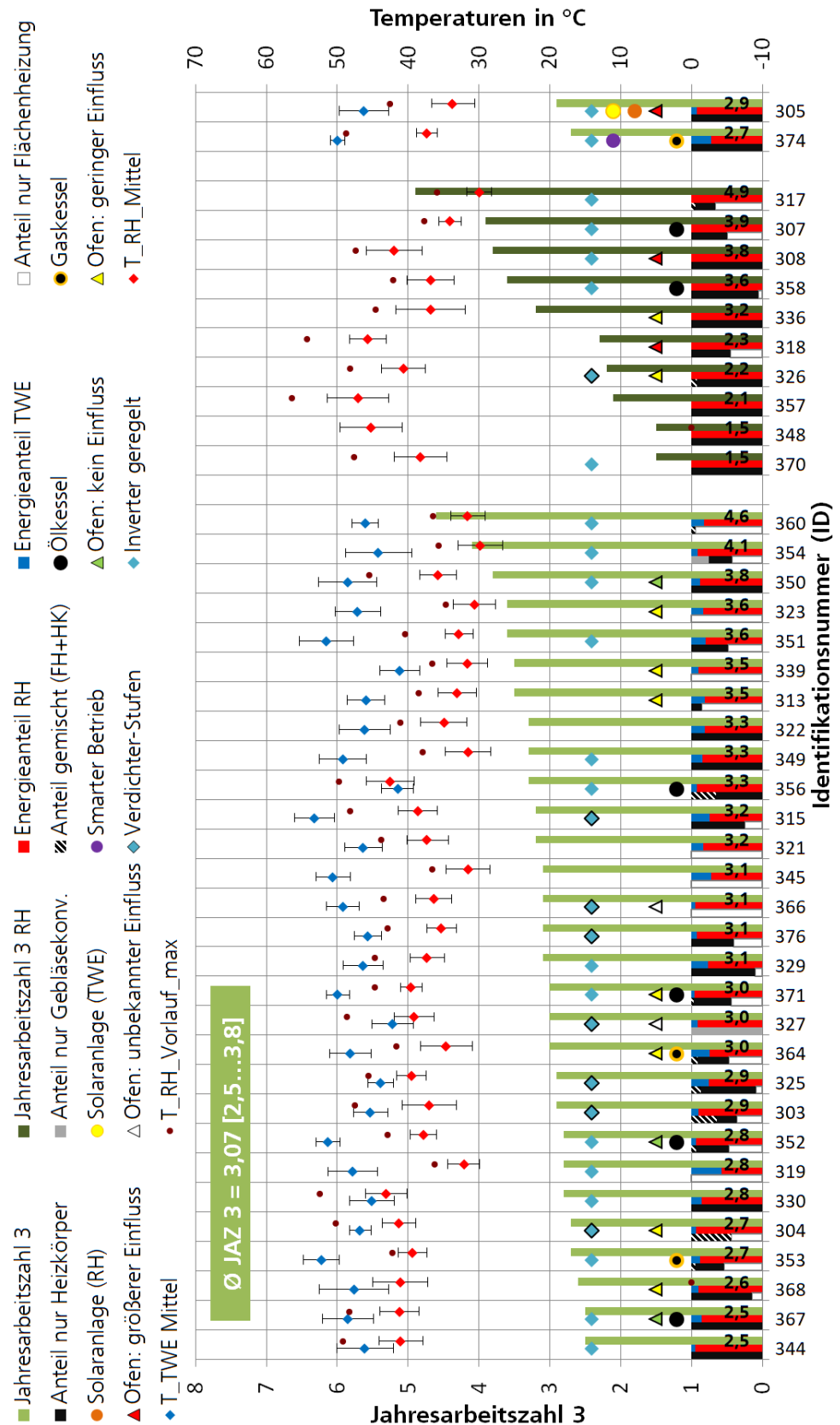


Abbildung 44: Messergebnisse und Eigenschaften der 41 Außenluft-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2018 bis Juni 2019 (ID 374, ID 305: Juli 2017 bis Juni 2018), wobei Anlagen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung Anlagen ausschließlich zur Raumheizung unterschieden werden

Wärmepumpen zur Raumheizung (RH)

Für die zehn Außenluft-Wärmepumpen umfassende zweite Gruppe werden in der Abbildung 23 Messergebnisse für den Modus Raumheizung (RH) dargestellt. Abgesehen von einer Wärmepumpe werden alle Anlagen ausschließlich im Modus RH betrieben. Die Anlage **ID 307** wird zur RH und TWE betrieben, aber kann aufgrund der Einbausituation für die Messtechnik nur für den Modus RH zuverlässig ausgewertet werden.

Auf die Wärmequellentemperaturen wird nachfolgend nicht im Detail eingegangen. Die Wärmepumpen dieser Anlagengruppe werden im Mittel (energetisch gewichtet) bei einer Wärmequellentemperatur von 5,0°C betrieben, wobei die Bandbreite von 1,3°C (**ID 326**) bis 7,0°C (**ID 307**) reicht. Bemerkenswert ist, dass die mittleren Wärmequellentemperaturen auf ähnlichem Niveau liegen wie bei den Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung, da letztgenannte kontinuierlich über das Jahr erfolgt und dadurch zu höheren Wärmequellentemperaturen beitragen. Dies verdeutlicht den im Mittel geringeren Anteil und damit geringen Einfluss des Modus TWE.

Die JAZ der Wärmepumpen weisen mit 1,5 bis 4,9 eine sehr große Bandbreite auf. Die mittleren Temperaturen zur RH (mittleren maximalen Vorlauftemperaturen zur RH) liegen im Schnitt bei 39,6°C (46,0°C) und damit um 3,1 K (3,0 K) über denen der Wärmepumpen, die für beide Betriebsmodi eingesetzt werden. Eine Korrelation zwischen diesen Temperaturwerten und den JAZ ist gut zu erkennen. Unabhängig von den vergleichsweise hohen mittleren Heizkreistemperaturen der Wärmepumpen **ID 370** bis **ID 318** fallen die JAZ von 1,5 bis 2,3 ungewöhnlich gering aus.

Die mittleren Temperaturen zur Raumheizung reichen von 29,9°C (**ID 317**) bis 47,0°C (**ID 357**). Die mittleren Spreizungen zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen liegen bei 6,8 K und reichen von 3,2 K (**ID 307**) bis 9,8 K (**ID 336**). Die höchste maximale Vorlauftemperatur als Tagesmittelwert erreicht die **ID 357** mit 56,4°C, die geringste die Wärmepumpe **ID 317** mit 35,9°C. Die maximalen Vorlauftemperaturen erreichen die Anlagen im Schnitt bei einer Außenlufttemperatur von -1,9°C, bei einer Bandbreite von -8,1°C bis 1,8°C. Daher geben die Messwerte nur keine Auskunft über die pro Messobjekt erforderlichen Temperaturen zur RH bei Norm-Außentemperaturen. Für die Anlage **ID 348** wird keine maximale Heizkreisvorlauftemperatur, die ausschließlich von der Wärmepumpe bereitgestellt wird, ermittelt. Bei dieser Anlage ist zu häufig der Heizstab in Betrieb gewesen, worauf im Kapitel 5.2.1.2 genauer eingegangen wird.

Fünf der zehn Anlagen nutzen ausschließlich Heizkörper als WÜS. Diese werden bei mittleren Temperaturen (maximalen Vorlauftemperaturen) zwischen bemerkenswert geringen 36,8°C (44,5°C, **ID 336**) und 47,0°C (56,4°C, **ID 357**) betrieben. Die übrigen fünf Anlagen verfügen über kombinierte WÜS. Auch bei diesen Anlagen stellt die Wärmepumpe die Energie zur Raumheizung nur auf einem Temperaturniveau bereit, das von dem Heizkreis mit der höheren Solltemperatur, den Heizkörpern, bestimmt wird. Dennoch reichen die mittleren Heizkreistemperaturen (maximalen Vorlauftemperaturen) von lediglich 29,9°C (35,9°C, **ID 317**) bis 45,7°C (54,2°C, **ID 318**).

Bei zwei Systemen ist zusätzlich ein Heizkessel integriert, worauf im Kapitel 5.4 näher eingegangen wird. Bei vier Systemen wird zusätzlich ein vom Heizsystem autarker Ofen eingesetzt, wobei bei zwei Öfen von einem hohen Deckungsbeitrag (> 15 %) für die Raumheizung ausgegangen werden muss. Bezüglich des Einflusses auf die JAZ der Wärmepumpen braucht hier nur der Modus Raumheizung betrachtet werden. Je geringer die Außenlufttemperaturen bei Einsatz des zusätzlichen Wärmeerzeugers, desto positiver der Einfluss auf die JAZ der Wärmepumpe.

Nachfolgend wird näher auf die auffällig geringen JAZ von 1,5 bis 2,3 der Wärmepumpe **ID 370** bis **ID 318** eingegangen. Während alle fünf Anlagen prinzipiell vergleichs-

weise hohe Temperaturen zur RH bereitstellen müssen, gibt es weitere Gründe, die im Vergleich mit den übrigen Systemen zu geringeren JAZ beitragen. Die Wärmepumpe **ID 370** mit einer JAZ von 1,5 verfügt über eine sehr geringe Norm-Leistungszahl. Gleiches gilt für die **ID 348**, die ebenfalls eine JAZ von nur 1,5 erreicht. Darüber hinaus handelt es sich bei dieser Anlage um ein älteres Gerät von 2009. Entscheidend ist jedoch, dass die Anlage aufgrund prinzipieller Probleme sehr oft den Elektroheizstab in Betrieb nehmen musste, worauf in Kapitel 5.2.1.2 näher eingegangen wird. Nach Behebung dieser Probleme ist für den Zeitraum Juli 2019 bis Juni 2020 mit einer JAZ von ca. 2,5 zu rechnen. Die Anlage **ID 357** erreicht eine JAZ von lediglich 2,1. Diese JAZ wird im Vergleich von den höchsten mittleren Heizkreistemperaturen (47,0°C) aller Außenluft-Wärmepumpen und, wenn auch geringfügig, vom Einsatz des Elektroheizstabes (3 %) negativ beeinflusst. Bei der Wärmepumpe **ID 326** mit einer JAZ von 2,2 handelt es sich um ein Gerät von 2006 mit sehr geringer Norm-Leistungszahl und auch bei dieser Anlage wurde der Elektroheizstab in Betrieb genommen. Darüber hinaus wird diese Anlage im Mittel bei der geringsten Außenlufttemperatur von 1,3°C betrieben. Die Anlage **ID 318** erreicht ein JAZ von 2,3, die unter anderem vom hohen Einsatz des Elektroheizstabes und einer geringeren Norm-Leistungszahl beeinflusst wurde. Darüber hinaus wurde der Ofen häufig eingesetzt, wobei der Einfluss dessen auf die JAZ nicht beurteilt werden kann, da nicht bekannt ist, ob dieser bei geringeren oder höheren Außenlufttemperaturen eingesetzt wurde.

5.2.1.2 Einfluss Elektroheizstab

Bei Außenluft-Wärmepumpen wird der Elektroheizstab üblicherweise zur alleinigen oder parallelen Wärmebedarfsdeckung ab einer definierten Außenlufttemperatur eingesetzt. Dadurch kann die Wärmepumpe kleiner dimensioniert werden, was ein geringeres Auseinanderdriften zwischen Wärmepumpenleistung und Heizlast des Gebäudes mit höheren Außenlufttemperaturen nach sich zieht. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, muss der Elektroheizstab mit seiner, im Vergleich zur Wärmepumpe geringeren Effizienz, bei der Bilanzierung der Wärmepumpenanlage berücksichtigt werden.

Das erwähnte Auseinanderdriften von Heizlast und Wärmepumpenleistung verursacht ein häufiges Einschalten des Verdichters, was sich negativ auf dessen Lebensdauer auswirkt. Um dennoch definierte Mindestbetriebszeiten zu gewährleisten, müssen entsprechende Puffervolumen bereitgehalten werden. Durch eine Leistungsregelung kann das Auseinanderdriften von Heizleistung der Wärmepumpe und Heizlast des Gebäudes wesentlich verringert werden. Eine Wärmepumpe mit (möglichst stufenloser) Leistungsregelung kann damit tendenziell eher auf Normaußentemperatur ausgelegt werden. Im Zuge dessen bräuchte der Elektroheizstab nicht oder nur zu einem geringeren Anteil in die Bedarfsdeckung mit eingeplant und das notendige Puffervolumen könnte verringert werden.

In der Abbildung 45 werden für die untersuchten Außenluft-Wärmepumpen die JAZ 3 (inkl. Elektroheizstab) und die JAZ 2 (exklusive Elektroheizstab) als Säulen dargestellt. Dabei wird analog zur Darstellung in Kapitel 5.2.1.1 eine Dreiteilung vorgenommen: links die 29 Wärmepumpen zur Raumheizung (RH) und Trinkwassererwärmung (TWE), in der Mitte die zehn Wärmepumpen, die ausschließlich zur Raumheizung eingesetzt werden. Die zwei Anlagen äußerst rechts werden für beide Betriebsmodi eingesetzt, wurden jedoch aufgrund fehlender Messdaten für den Zeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 ausgewertet. Der Unterschied zwischen JAZ 2 und JAZ 3 liegt in der von den Heizstäben bereitgestellten thermischen Energie sowie der benötigten elektrischen Energie. Die von den Heizstäben benötigte elektrische Energie wird als grauer Anteil der grau-gelb gestapelten Säulen dargestellt und entspricht dem Quotienten aus elektrischer Heizstabarbeit zur elektrischen Verdichterarbeit, dessen Wert auf diesen Säulen angegeben wird, sofern die Anlage über einen Elektroheizstab verfügt. Die hier dargestell-

ten Eigenschaften der Anlagen beschränken sich auf zusätzliche Wärmeerzeuger sowie etwaige Möglichkeiten der Leistungsregelung.

Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung

Von den 29 Anlagen verfügen 24 über einen Heizstab. Von den fünf Anlagen, die keinen Heizstab integriert haben, sind vier als bivalente Systeme ausgeführt, wovon zwei zusätzlich über einen vom Heizsystem autarken Ofen verfügen. Ausschließlich die Wärmepumpe **ID 354** verfügt weder über einen Heizstab noch über andere zusätzliche Wärmeerzeuger.

Von den 24 Anlagen mit Heizstab haben elf Anlagen diesen auch eingesetzt. Von diesen elf Anlagen hatten zwei mit je 0,1 % den Heizstab nur sporadisch in Betrieb. Bei fünf Anlagen liegt der Energieanteil zwischen 0,7 % und 3,0 %. Auf die übrigen vier Anlagen mit Energieanteilen von 4,2 % (**ID 321**), 5,3 % (**ID 366**), 6,5 % (**ID 323**) und 23,2 % (**ID 344**) wird nachfolgend näher eingegangen.

Bei der Anlage **ID 321** ist die relative Heizstabarbeit in Höhe von 4,2 % zu 91 % auf die Legionellenvermeidung zurückzuführen, bei welcher einmal wöchentlich die Trinkwasserspeichertemperatur signifikant angehoben wird. Die übrigen 9 % korrelieren unter -2°C mit den Außenlufttemperaturen, obwohl die Wärmepumpe weit von ihrer Auslastungsgrenze entfernt ist. Durch den Heizstabbetrieb wird die JAZ um 0,08 verringert.

Bei der Wärmepumpe **ID 366** hat die relative Heizstabarbeit von 5,3 % zu einer JAZ-Minderung von 0,11 geführt. Die relative Heizstabarbeit teilt sich zu 67 % in regulären Betrieb (unter -5°C Außenlufttemperatur bei 100 % Auslastung der Wärmepumpe) sowie 33 % bei moderaten Außenlufttemperaturen im April 2019, wobei die Ursache für diesen Heizstabeinsatz auf Basis der Messdaten nicht nachvollzogen werden kann.

Bei der Wärmepumpe mit der **ID 323** ging 99 % der Heizstabarbeit zu Lasten der einmal wöchentlich ausgeführten zusätzlichen Erwärmung des Trinkwasserspeichers für die Legionellenvermeidung und 1 % zur Raumheizung bei den tiefsten gemessenen Außenlufttemperaturen von -4,5°C. Der Heizstabbetrieb führte zu einer Verringerung der JAZ um 0,15.

Der sehr hohe Anteil von 23,2 % bei der Anlage **ID 344** ist auf eine Abweichung vom Regelbetrieb zurückzuführen, da lediglich 1 % der Heizstabarbeit auf tiefe Außenlufttemperaturen zurück zu führen sind. Dem gegenüber traten 74 % dieser Heizstabarbeit aufgrund eines Defektes der Wärmepumpe während der kältesten Woche der Auswerteperiode auf. Die übrigen 25 % der Heizstabarbeit traten bei moderaten Temperaturen im November 2018 auf. Infolge des Heizstabbetriebes verringerte sich JAZ um 0,32.

Bezogen auf alle mit Elektroheizstab ausgestatteten Wärmepumpenanlagen beträgt die relative Heizstabarbeit im Mittel 1,9 %. Signifikanter Heizstabbetrieb wurde lediglich infolge falscher Parametrierung, bei Defekten oder infolge von Legionellenvermeidung gemessen. Mit Blick auf den Einfluss der eingangs beschriebenen Leistungsregelung lässt sich feststellen, dass es sich bei den Anlagen mit signifikantem Heizstabbetrieb tendenziell nicht um Wärmepumpen mit Inverter geregelten Verdichtern handelt.

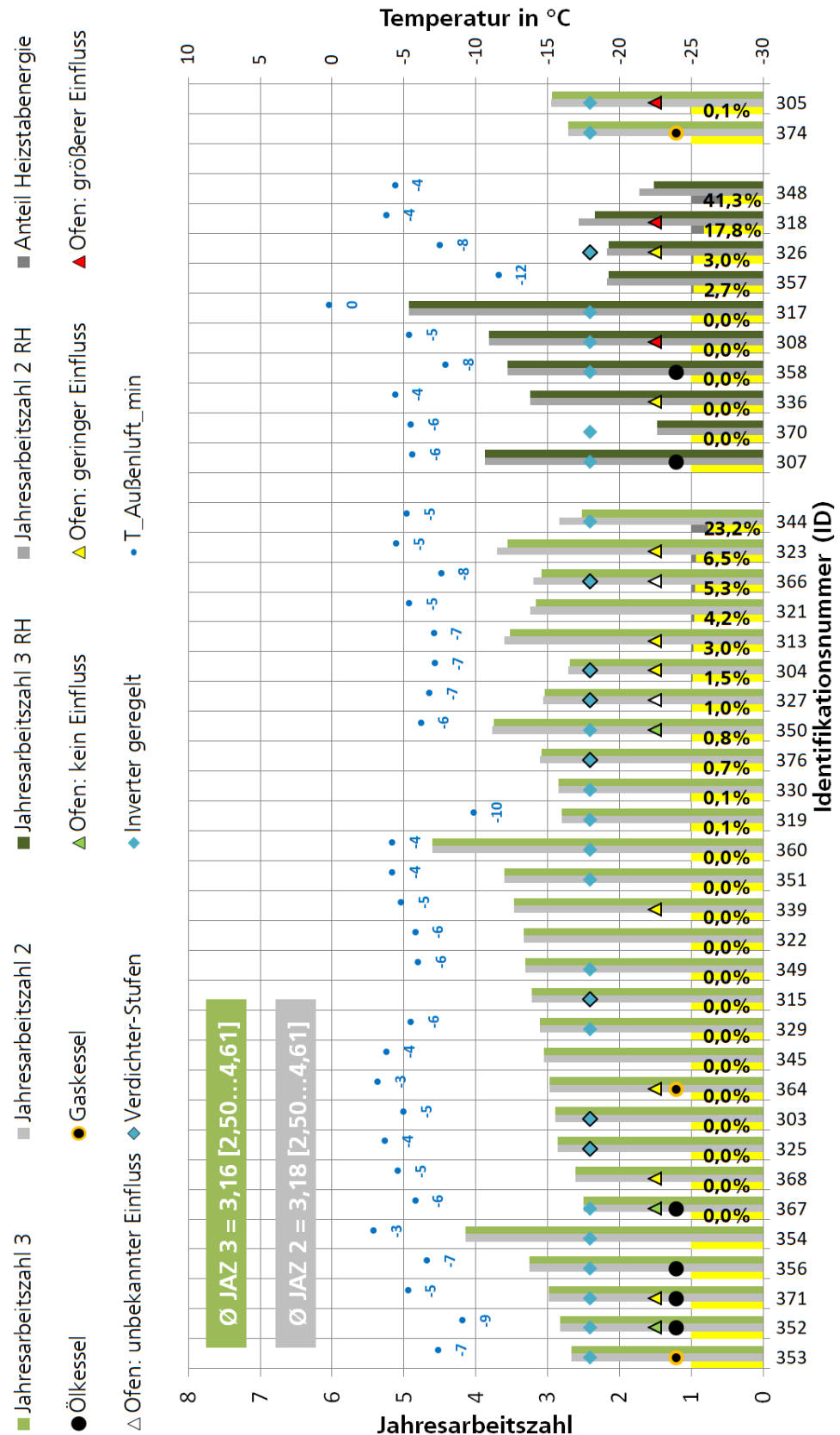


Abbildung 45: Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 2 (exklusive Elektroheizstab) und 3 (inklusive Elektroheizstab) sowie relative Heizstabsarbeit und Kennzeichnung diverser Eigenschaften für die 41 untersuchten Außenluft-Wärmepumpen

Wärmepumpen zur Raumheizung (RH)

Innerhalb dieser Anlagengruppe verfügen neun von zehn Wärmepumpen über einen Heizstab. Die eine Wärmepumpe ohne Heizstab ist als bivalentes System ausgeführt. Von den neun Wärmepumpen mit Heizstab haben vier diesen auch eingesetzt, wobei der Heizstabbetrieb bei den Anlagen **ID 318** mit 17,8 % und **ID 348** mit 41,3 % die JAZ signifikant beeinflusst hat.

Bei der Anlage **ID 318** ist zwischen Februar und Mai 2019 der Heizstab aus ungeklärten Gründen bei Außenlufttemperaturen zwischen 6°C und 20°C, ohne eine Korrelation zwischen bereitgestellter Energie und Außenlufttemperatur, in Betrieb gegangen. Dies führte zu einer JAZ-Minderung um 0,23.

Für die Wärmepumpenanlage mit der **ID 348** wurde mit einem Anteil von 41,3 % die höchste relative Heizstabarbeit ermittelt, was auf grundlegende Probleme des Geräts und der Wärmesenken-seitigen Hydraulik zurückzuführen war. Nur geringe Lasten konnten von der Wärmepumpe bei sehr geringer Effizienz gedeckt werden. Noch in der Übergangszeit musste zusätzlich der Heizstab in Betrieb gehen, wodurch die Effizienz nochmals gesenkt wurde. Anfang 2019 war daher mehrmals ein Servicetechniker im Einsatz, der aufgrund von Undichtigkeiten den Verdampfer gewechselt, Undichtigkeiten am Expansionsventil behoben, den Regler des Ventils getauscht und die Sensorik im Pufferspeicher neu positioniert hat. Die vorgenommenen Änderungen führten im Auswertungszeitraum Juli 2019 bis Mai Juni 2020 zu einer AZ von 2,5 bei einem relativen Heizstabanteil von 3,9 %. Die im hier adressierten Auswertungszeitraum ohnehin geringe Effizienz der Wärmepumpe führte dazu, dass der hohe Anteil relativer Heizstabarbeit die JAZ der Wärmepumpe um lediglich 0,2 verminderte.

Bei dieser Anlagengruppe verfügt keiner der Messobjekte mit Heizstabbetrieb über einen Inverter geregelten Verdichter.

5.2.2 Wärmequelle Erdreich und Wärmequellenanlage Eisspeicher

Im Projekt wurden 13 Wärmepumpen mit der Wärmequelle Erdreich (ausschließlich Erdwärmesonden) und zwei Wärmepumpen mit je einem Eisspeicher als Wärmequellenanlage untersucht. Der Eisspeicher ist ebenfalls ein soleführendes System, wobei der Verdampfer der Wärmepumpe einem im Erdreich positionierten Wasser-/Eisspeicher Wärme entzieht, welcher wiederum von einem solarthermischen System regeneriert wird. Alternativ nutzt der Verdampfer der Wärmepumpe direkt die Solarenergie. Genau genommen handelt es sich um Multiquellensysteme, die Solarenergie und Umweltenergie aus der Außenluft sowie dem Erdreich nutzt. Die gemeinsame Darstellung ist daher ausschließlich auf die möglichst kompakte Darstellung der Ergebnisse zurückzuführen.

5.2.2.1 Jahresarbeitszahl 3, Anlagencharakterisierung und Betriebsbedingungen

In der Abbildung 47 werden Messergebnisse und charakteristische Eigenschaften der 13 Erdreich-Wärmepumpen (links) und zwei Wärmepumpen mit Eisspeichern (rechts) dargestellt. Die Erdreich-Wärmepumpe äußerst rechts kann nicht für den Hauptzeitraum ausgewertet werden (vgl. Kapitel 4.1). Um dennoch Ergebnisse dieser Anlagen vorzustellen, wird für diese, hier und in den nächsten Kapiteln, der Auswertezeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 berücksichtigt. Wegen der somit nicht vergleichbaren Witterungsbedingungen gehen die Ergebnisse dieser beiden Anlagen nicht in Mittelwertbildungen ein.

Die prinzipiell dargestellten Größen und Eigenschaften entsprechen denen in der analogen Grafik zu den Außenluft-Wärmepumpen (Abbildung 44) und werden im Kapitel 5.2.1.1 erläutert. Zusätzlich werden nachfolgend auch die energetisch gewichteten Wärmequellentemperaturen (Vor- und Rücklauf sowie Mittel aus Vor- und Rücklauf) angegeben.

Erdreich-Wärmepumpen

Ergänzend zu den Messergebnissen der Einzelanlagen in der Abbildung 47 werden in der Abbildung 46 die Mittelwerte dieser Größen für die 12 Erdreich-Wärmepumpen dargestellt. Hierbei wird die Anlage **ID 369** aufgrund der extrem geringen Jahresarbeitszahl (JAZ) als Ausreißer betrachtet und Mittelwerte werden in der Abbildung 46 links inklusive und rechts exklusive der Anlage **ID 369** berechnet.

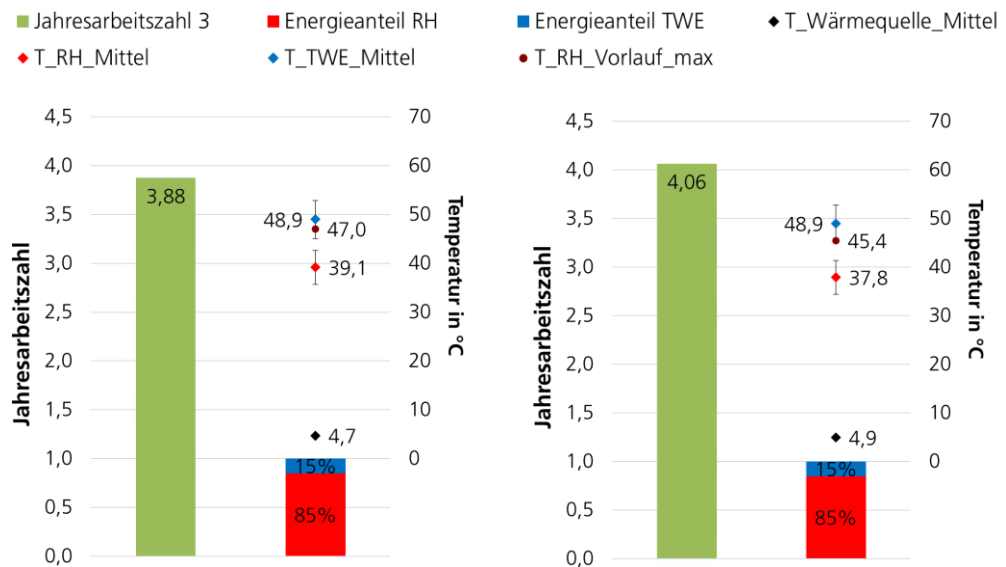


Abbildung 46: Mittelwerte diverser Größen der 12 Erdreich-Wärmepumpen im Messzeitraum Juli 2018 bis Juni 2019; links: alle Anlagen, rechts ohne ID 369 mit extrem geringer Jahresarbeitszahl

Unter Berücksichtigung aller Anlagen beträgt die mittlere JAZ 3,88, bei Einzelwerten von 1,8 (**ID 369**) bis 4,7 (**ID 328**). Ohne Berücksichtigung der **ID 369** liegt die mittlere die JAZ bei 4,06, was sich auch auf die übrigen Messgrößen auswirkt. Während die Energieanteile zur Raumheizung (RH) und Trinkwassererwärmung (TWE) mit 85 % bzw. 15 % gleich groß sind, verringern sich die erforderlichen mittleren Temperaturen zur RH (max. Vorlauftemperatur) von 39,1°C auf 37,8°C (von 47,0°C auf 45,4°C). Auf die mittlere Temperatur zur Trinkwassererwärmung mit 48,9°C hat die nicht Berücksichtigung des Ausreißers keine Auswirkung. Die mittlere Wärmequellentemperatur liegt mit 4,9°C bzw. 4,7°C in der gleichen Größenordnung. Legt man die Mittelwerte ohne Berücksichtigung des Ausreißers zu Grunde, müssen die Erdreich-Wärmepumpen im Mittel zur RH (1,3 K) und TWE (1,8 K) ein etwas höheres Temperaturniveau bereitstellen als die Außenluft-Wärmepumpen. Die maximalen Vorlauftemperaturen zur RH sind im Mittel 2,4 K höher. Die Energieanteile zur RH und TWE sind jedoch auf identischem Niveau. Im Mittel und auf die Wärmesenke bezogen haben die Erdreich-Wärmepumpen somit eine leicht schlechtere Voraussetzung im Hinblick auf die Effizienz als die Außenluft-Wärmepumpen.

Nachfolgende Mittelwertangaben beziehen sich, sofern nicht anders kommentiert, auf die Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Wärmepumpe mit der **ID 369**.

Die mittleren Wärmequellentemperaturen liegen im Durchschnitt bei 4,9°C, bei einer mittleren Spreizung von 3,7 K. Die minimale mittlere Wärmequellentemperatur wurde mit 3,3°C von der **ID 310**, die maximale mittlere Wärmequellentemperatur mit 9,4°C von der **ID 324** erreicht. Verglichen mit den Temperaturunterschieden auf der Wärmesenkenseite ist die Bandbreite und damit der Einfluss auf die Effizienz geringer.

Wie bereits erwähnt, stellen die Wärmepumpen im Schnitt 15 % der Energie zur TWE bereit. Die diesbezügliche Bandbreite reicht von 5 % bei **ID 310** bis zu 26 % bei **ID 343**.

Die Mitteltemperaturen zur TWE bewegen sich zwischen 44,3°C (**ID 310**) und 52,2°C (**ID 324**). Für die Anlagen **ID 375** und **ID 328** konnten keine Temperaturen zur TWE ermittelt werden. Bei diesen Anlagen handelt es sich um Kompaktanlagen mit integriertem Speicher ohne den notwendigen Platz zum Einbau der dafür erforderlichen Messtechnik.

Die mittleren Temperaturen zur Raumheizung bewegen sich zwischen 31,2°C (**ID 328**) und 41,3°C (**ID 363**). Der positive Einfluss geringerer Temperaturen zur RH auf die JAZ ist zu erkennen. Die maximal von den Wärmepumpen erzielten Vorlauftemperaturen zur RH reichen von 37,3°C (**ID 328**) bis 52,0°C (**ID 331**). Diese Temperaturen wurden bei Außenlufttemperaturen von durchschnittlich -4,6°C (Tagesmittelwert) erzielt, wobei die Bandbreite von -8,9°C (**ID 328**) bis 1,3°C (**ID 331**) reicht. Wie bereits für die Außenluft-Wärmepumpen erläutert, liegen die maximal gemessenen Heizkreisvorlauftemperaturen teils weit unter denen bei Norm-Außenlufttemperaturen (-12 bis -16°C) erforderlichen Heizkreisvorlauftemperaturen.

Es wurden drei Anlagen untersucht, die ausschließlich FBH als WÜS nutzen. Während die Anlagen **ID 328** mit 37,7°C und **ID 337** mit 38,6°C noch relativ typische maximale Vorlauftemperaturen aufweisen, liegt jene der **ID 375** mit 43,0°C über den üblichen Werten. Beim ausschließlichen Einsatz von Heizkörpern reichen die maximalen Vorlauftemperaturen von 45,7°C (**ID 324**) über 49,0°C (**ID 363**) bis zu 50,3°C (**ID 365**). Die dazugehörigen JAZ reichen von 3,7 bis 4,4. Dies zeigt, dass Wärmepumpen auch bei Einsatz von Heizkörpern zweckmäßig betrieben werden können. Bei den Anlagen mit kombinierten WÜS kann die **ID 333** mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 37,9°C hervorgehoben werden. Auch bei diesen Systemen muss die Wärmepumpe das Temperaturniveau des WÜS bereitstellen, welches die höhere Temperatur benötigt. Für die FBH kann in allen Fällen – falls notwendig – die Temperatur durch Rücklaufbeimischung auf das erforderliche Niveau abgesenkt werden.

Bei den Wärmepumpen **ID 306**, **ID 337** und **ID 324** wird ein Teil der erforderlichen Raumwärme von Öfen gedeckt, wobei dieser Anteil als gering eingestuft werden kann bzw. für die **ID 306** nicht bekannt ist. Der exakte Einfluss auf die JAZ der Wärmepumpen kann, wie zu den Außenluft-Wärmepumpen beschrieben (vgl. 5.2.1.1), jedoch nicht quantifiziert werden. Bei den Wärmepumpen **ID 365**, **ID 337** und **ID 310** wird die Trinkwassererwärmung solarthermisch unterstützt. Insbesondere bei **ID 365** mit 4,8 % und **ID 310** mit 4,5 % liegt der Energieanteil der Wärmepumpe zur TWE auf sehr geringem Niveau. Je größer die Differenz zwischen erforderlichen Temperaturen zur RH und TWE ist, desto größer ist auch der positive Einfluss eines zunehmenden Deckungsbeitrags der Solarthermieanlage zur TWE auf die JAZ der Wärmepumpe.

Mit Blick auf die Korrelation zwischen JAZ und mittlerer Temperatur zur RH fällt u.a. die relativ geringe JAZ der **ID 306** auf. Diese Anlage verfügt über eine vergleichsweise geringe Norm-Leistungszahl. Gleiches gilt für die **ID 365**, bei welcher die Wärmepumpe zudem ein älteres Gerät von 2009 ist. Dennoch liegt die JAZ dieser Wärmepumpen mit 4,0 nahe am Mittelwert, was u.a. auf den relativ geringen Energieanteil zur TWE zurückzuführen ist. Die **ID 337** verfügt über ein Gerät mit vergleichsweise hoher Norm-

Leistungszahl. Bei dieser Anlage wird die JAZ durch die hohen mittleren Temperaturen von 51,4°C bei gleichzeitig überdurchschnittlichem Energieanteil von 22 % der TWE negativ beeinflusst. Die höchsten beiden JAZ werden von Geräten mit vergleichsweise mittleren Norm-Leistungszahlen erzielt, wobei die Geräte aus den Jahren 2013 (**ID 333**) und 2011 (**ID 328**) stammen. Der einzig nennenswerte Heizstabbetrieb mit einem relativen Anteil von 3,9 % an der Verdichterarbeit wurde für die Anlage **ID 324** gemessen, wodurch die JAZ um 0,17 geringer ausfällt als ohne Heizstabeinsatz. Positiv fällt jedoch die vergleichsweise sehr hohe Wärmequellentemperatur von im Mittel 9,4°C ins Gewicht, was u.a. auf die großzügige Dimensionierung der Erdwärmesonden zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 4.3).

Die Anlage mit der **ID 369** stellt, abgesehen von der Energieverteilung zwischen RH (87 %) und TWE (13 %) sowie der mittleren Temperatur zur TWE (49,2°C), eine Ausnahme in dieser Anlagengruppe dar. Die mittlere Temperatur (maximale Vorlauftemperatur) zur RH liegt mit 53,3°C (64,7°C) mit 15,5 K (19,3K) deutlich oberhalb der Mittelwerte der übrigen Anlagengruppe. Darüber hinaus hat das Gerät die geringste Norm-Leistungszahl aller untersuchten Sole-Wärmepumpen und ist vergleichsweise alt (2010).

Die Wärmepumpenanlage mit der **ID 309** wurde für den abweichenden Messzeitraum Juli 2017 bis Juni 2018 ausgewertet und geht daher nicht in die Mittelwerte (entsprechend Abbildung 46) mit ein. Ausgehend von den sehr geringen mittleren Heizkreistemperaturen von 27,0°C und maximalen Vorlauftemperaturen von 33,1°C scheint die JAZ von 3,6 vergleichsweise gering. Diese wird im Vergleich zu den übrigen Anlagen negativ vom hohen Energieanteil zur TWE (30 %) und einer geringen Norm-Leistungszahl beeinflusst. Als Positivbeispiel kann diese Anlage bzgl. der Bereitstellung des höheren Temperaturniveaus für einen Handtuchrockner im Bad erwähnt werden. Aus einem Kombispeicher wird die Wärme für den Handtuchrockner dem oberen Volumenteil zur Bevorratung des Trinkwarmwassers entnommen.

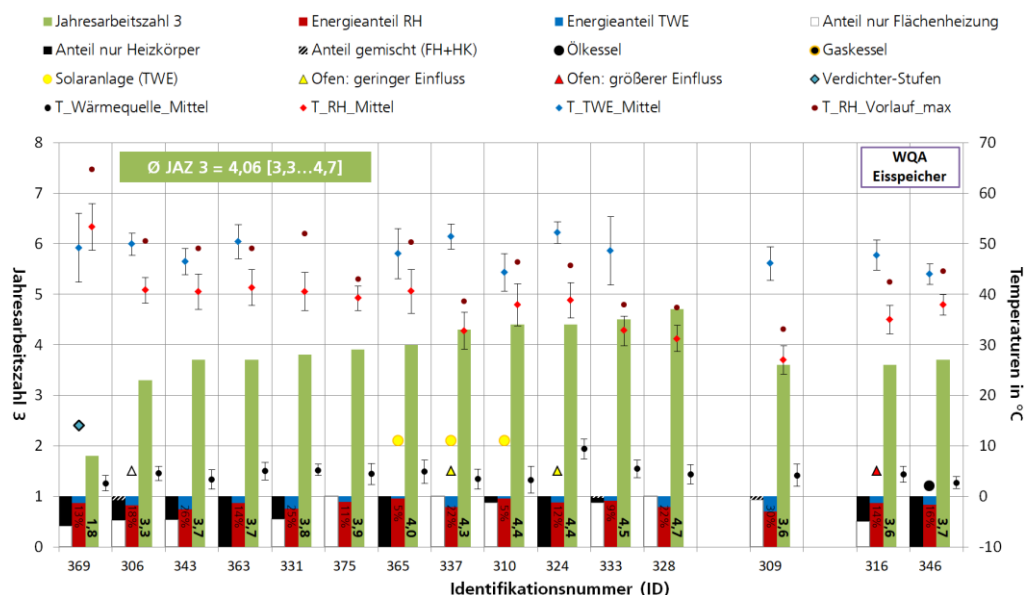


Abbildung 47: Messergebnisse und Eigenschaften der 13 Erdreich-Wärmepumpen und zwei Wärmepumpen mit Eisspeichern in der Auswertungsperiode Juli 2018 bis Juni 2019 (Anlage ID 309: Juli 2017 bis Juni 2018)

Wärmepumpen mit Eisspeichern

In der Abbildung 47 werden äußerst rechts die Ergebnisse der Wärmepumpen mit Eisspeicher als Wärmequellenanlage dargestellt. Die JAZ beider Wärmepumpen liegen mit 3,6 und 3,7 auf gleichem Niveau und etwas unter dem Mittelwert der Erdreich-Wärmepumpen. Auch die Betriebsbedingungen beider Anlagen sind ähnlich den mittleren Bedingungen der Erdreich-Anlagen. Die mittleren Wärmequellentemperaturen liegen mit 4,4°C und 2,7°C leicht unter dem Mittelwert der Erdreich-Wärmepumpen. Wärmesenkenseitig liegen die Energieanteile zur TWE mit 14 % und 16% um den Mittelwert der Erdreich-Wärmepumpen. Gleiches gilt für die mittleren Heizkreistemperaturen mit 37,9°C und 35,0°C. Die mittleren Temperaturen zur TWE liegen mit 47,7°C und 44,0°C leicht unter dem Durchschnitt.

Hervorzuheben sind die für die WÜS untypisch geringen maximalen Vorlauftemperaturen zur RH von 44,5°C (kombinierte WÜS) und 42,4°C (ausschließlich Heizkörper), die bei einer Außenlufttemperatur von -3,6 und -2,0°C gemessen wurden.

Die Anlage **ID 316** ist mit einem Ofen, für den eine relativ starke Deckung des Raumwärmebedarfs (>15 %) abgeschätzt wurde, ausgestattet. Zudem wird JAZ negativ vom Betrieb des Heizstabes beeinflusst (-0,11), worauf im Kapitel 5.2.2.2 näher eingegangen wird.

Die Anlage mit der **ID 346** verfügt zusätzlich über einen Ölkessel, worauf im Kapitel 5.4 näher eingegangen wird. Ferner gehört die Norm-Leistungszahl der Wärmepumpe zu den besten aller untersuchten Sole-Wärmepumpen.

5.2.2.2 Einfluss Elektroheizstab

In der Abbildung 48 wird analog zur Abbildung 45 für Außenluft-Wärmepumpen der Einsatz von Elektroheizstäben bei den Sole-Wärmepumpen dargestellt.

Erdreich-Wärmepumpen

Von den 12 Anlagen der Gruppe Erdreich-Wärmepumpen, die im Zeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 ausgewertet werden konnten, sind zehn mit einem Heizstab ausgestattet. Die Anlage **ID 306** verfügt zusätzlich über einen Ofen, wobei der dessen Deckungsbeitrag unbekannt ist. Einzig die Anlage **ID 365** verfügt neben der Wärmepumpe über keinen zusätzlichen Wärmeerzeuger. Von den zehn Wärmepumpen mit Heizstab haben zwei diesen auch eingesetzt, wobei nur der Einsatz bei der **ID 324** mit einer relativen Heizstabarbeit von 3,9 % einen nennenswerten Anteil verursachte. Der Heizstab wurde im Januar 2019 über drei Tage ohne erkennbare Korrelation zur Außenlufttemperatur im Modus RH betrieben, während die Wärmepumpe nicht in Betrieb war.

Bezogen auf die Anlagengruppe ist der Einfluss der Heizstabarbeit auf die mittlere Arbeitszahl mit 0,02 sehr gering.

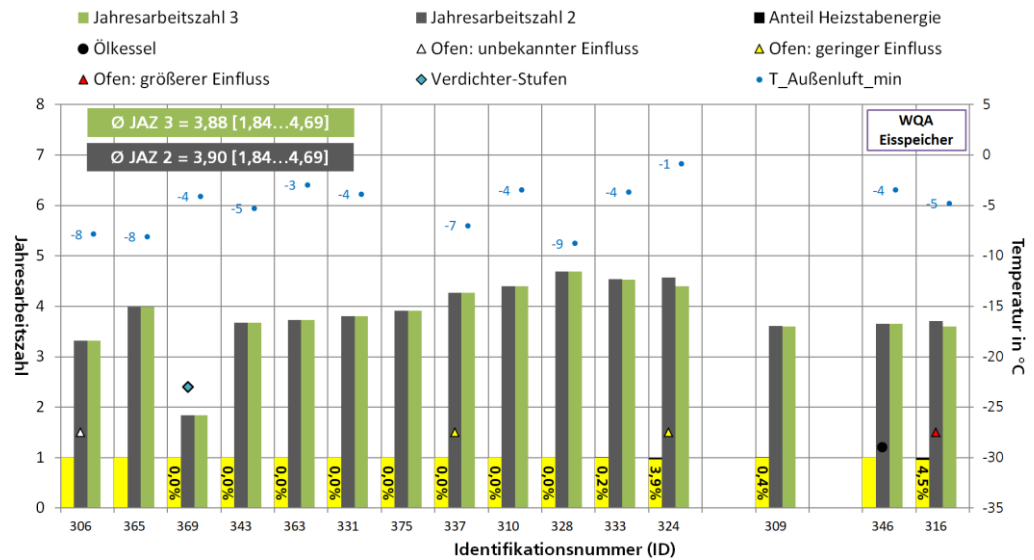


Abbildung 48: Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 2 (exklusive Elektroheizstab) und 3 (inklusive Elektroheizstab) sowie relative Heizstabarbeit und Kennzeichnung diverser Eigenschaften für die 15 untersuchten Sole-Wärmepumpen

Wärmepumpen mit Eisspeichern

Die Anlage **ID 346** verfügt als Backup über einen zusätzlichen Ölkessel und nicht über einen Elektroheizstab. Das System mit der **ID 316** ist mit einem Elektroheizstab ausgestattet, dessen relative Heizstabarbeit 4,5 % beträgt. Hiervon werden 64 % zur RH und 36 % zur TWE eingesetzt. In beiden Betriebsmodi zeigt sich eine gute Korrelation zwischen Heizstabarbeit und Außenlufttemperatur unterhalb von ca. 2°C. Oberhalb von 2°C bis ca. 10°C unterstützt der Heizstab an mehreren Tagen mit maximal 8 kWh am Tag im Modus RH. Im Modus TWE wird der Heizstab oberhalb von 2°C nicht eingesetzt.

5.3 Effizienz und Betriebsbedingungen vor dem Hintergrund von Baualter und Sanierungsgrad der Gebäude

In diesem Kapitel werden die Betriebsbedingungen und die Jahresarbeitszahl im Kontext des Gebäudealters untersucht. Im ersten Abschnitt des Kapitels wird der Raumheizbetrieb in den Blick genommen, im zweiten Abschnitt des Kapitels erfolgt die Einordnung in Hinblick auf die Gesamtperformance.

5.3.1 Analyse Raumheizmodus - Baualter, Gebäudequalität, Heizkreistemperatur und Anlageneffizienz

Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, weisen die Gebäude der Messobjekte sehr unterschiedliche Sanierungstiefen auf. Abbildung 49 zeigt den spezifischen Heizwärmeverbrauch, der nach dem Heizungsspeicher gemessen wurde (vgl. Kapitel 4.8). In 3 Messobjekten wurde dieser Wert nicht ermittelt und in der Abbildung wird für diese Gebäude der Heizwärmeverbrauch vor dem Heizungsspeicher – gesondert markiert – angegeben. Zur Kennzeichnung der Sanierungstiefe der einzelnen Gebäude wird der *Gebäudekennwert* herangezogen (vgl. Kapitel 4.2.3). Der *Gebäudekennwert* gibt anhand einer farblichen Skala einen Hinweis auf die energetische Gebäudequalität. Es zeigt sich eine große Bandbreite des spezifischen Heizwärmeverbrauches von Gebäuden gleicher Baualtersperiode. Dies ist zum einen auf unterschiedliche Sanierungstiefen der Gebäude zurückzuführen. Zum anderen wirken sich die weiteren Einflussfaktoren, wie Gebäudegestaltung, Standort und Nutzer auf den Heizwärmebedarf aus. Der Ein-

fluss des Standortes ist in Form des für die Witterungsbereinigung gebräuchlichen Klimafaktors in Kapitel 4.7 erläutert. Über das Nutzerverhalten, wie Lüftungsverhalten und gewählte Raumtemperatur, liegen im Projekt keine Informationen vor, letztere wurden auch nicht messtechnisch erfasst.

Legende:

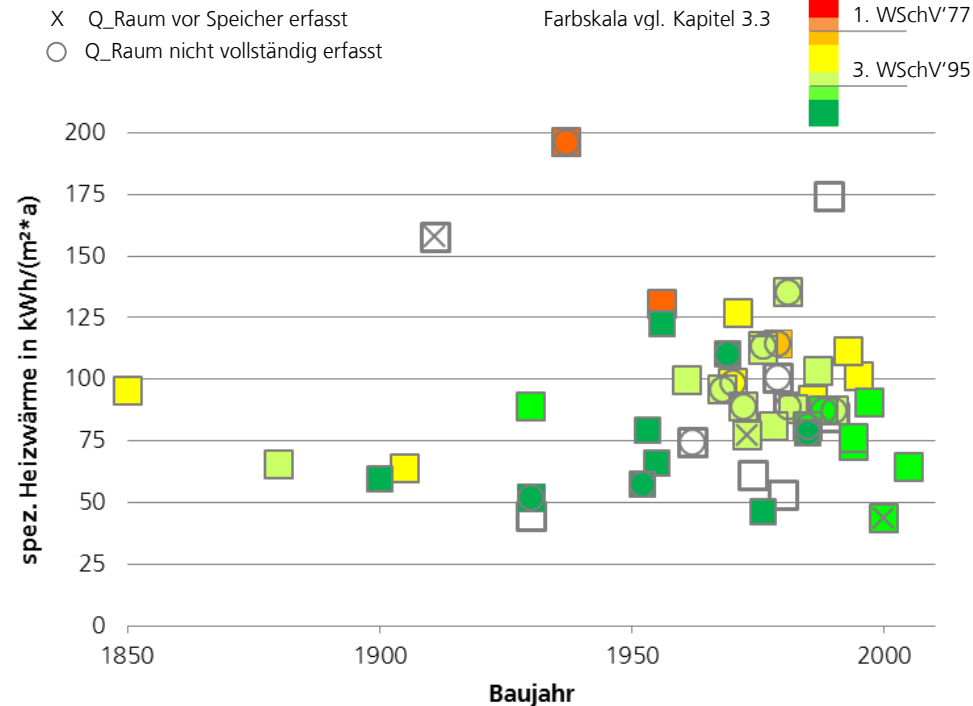


Abbildung 49: Spezifischer Heizwärmeverbrauch über dem Baujahr des Gebäudes klassifiziert nach dem *Gebäudekennwert* (Datenbasis: bivalente Wärmepumpenanlagen mit einem Deckungsbeitrag des Kessels > 10 % sind nicht dargestellt)

Ausschlaggebend für die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpenanlage im Raumheizbetrieb sind neben der Charakteristik des Wärmepumpengerätes (Gütegrad, u.a.) und deren Auslegung sowie Betriebsweise (mit Auswirkung auf den Heizstabeinsatz, u.a.) insbesondere die Betriebstemperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke. Die Wärmesenkentemperatur wird maßgeblich von der Heizkreistemperatur bestimmt. Weitere Randbedingungen (hydraulische Einbindung, Regelungskonzept, u.a.) üben ebenfalls einen Einfluss auf die Wärmesenkentemperatur aus. Ausschlaggebend für die Heizkreistemperatur sind die Heizlast des Gebäudes sowie der Typ und die Dimensionierung des Raumwärmeübergabesystems. Daneben wirken sich weitere Faktoren (hydraulischer Abgleich, u.a.) auf die vorhandenen Heizkreistemperaturen aus.

Abbildung 50 stellt für jedes Messobjekt¹ die Betriebstemperatur² der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung – als energetisch gewichteten Mittelwert aus Vorlauf und Rücklauf – über dem spezifischen Heizwärmeverbrauch dar. Es zeigt sich tendenziell der zu erwartende Zusammenhang, dass in Gebäuden mit einem hohen Heizwärmeverbrauch die Raumheizung bei höheren Temperaturen betrieben wird als in Gebäuden

¹ Datenbasis: WPA mit einem Deckungsbeitrag des Kessel über 10 % sind nicht mit dargestellt

² An dieser Stelle wurde nicht die Heizkreistemperatur („nach“ Heizungsspeicher) gewählt, sondern die Temperatur „vor“ Heizungsspeicher, um im Folgenden die Verknüpfung mit der JAZ direkter ziehen zu können.

mit einem geringeren spezifischen Heizwärmeverbrauch. Sehr offensichtlich ist die große Streuung der Temperaturen bei gleichem spezifischem Heizwärmeverbrauch. Dies ist auf unterschiedliche Effekte zurückzuführen.

Ein Aspekt ist die begrenzte Aussagekraft des Heizwärmeverbrauches als Indikator für die – die Heizkreistemperatur bestimmende – Heizlast des Gebäudes (bzw. der einzelnen Räume) sowie die Unschärfe der Angabe der beheizten Flächen (vgl. Kapitel 4.2.1). Ein weiterer Aspekt ist der große Einfluss des Wärmeübergabesystems auf die erforderliche Heizkreistemperatur. Die Art des Wärmeübergabesystems ist in Abbildung 50 farblich gekennzeichnet. Die gewählte Kategorisierung ist in Kapitel 4.5.1 beschrieben. Es bestätigt sich die Eigenschaft, dass (mit wenigen Ausnahmen) eine Raumheizung mit Flächenheizungen in Gebäuden mit gleichem spezifischem Heizwärmeverbrauch niedrigere Heizkreistemperaturen aufweisen als eine Raumheizung mit Heizkörpern. Auffällig ist auch die große Bandbreite innerhalb der Gruppe der Anlagen, die Heizkörper zur Raumheizung einsetzen. So liegt die mittlere Heizkreistemperatur bei Heizsystemen mit Heizkörpern in Gebäuden mit einem spezifischem Heizwärmebedarf von rund $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ im Bereich von 35°C^1 bis 45°C .

Neben der oben beschriebenen Einschränkung, die Heizwärmeverbrauch als Indikator für die Raumheizlast heranzuziehen, verdeutlicht die Bandbreite die Einflussmöglichkeit durch die Wahl des Heizkörpertyps (bspw. Gussradiator vs. Niedertemperaturheizkörper), dessen Dimensionierung und die Inbetriebnahme (bspw. mit/ohne hydraulischen Abgleich). Die folgende Beispielrechnung verdeutlicht die Auswirkung der Auslegung des Heizkörpers. Die Angaben beruhen auf Herstellerangaben^{2,3}. Es werden Plattenheizkörper des gleichen Fabrikats unterschiedlicher Längen und unterschiedlichen Aufbaus im Hinblick auf Platten- und Lamellenanzahl (Typ 21, Typ 22, Typ 33⁴) verglichen. Ermittelt wurde die erforderliche Heizkreistemperatur um 1 kW Wärmeleistung bereitzustellen⁵. Durch die Variation des Typs kann die Heizkreistemperatur (Mittelwert aus Vorlauf und Rücklauf) im betrachteten Beispiel von $63,0^\circ\text{C}$ (Typ 21) auf $54,1^\circ\text{C}$ (Typ 22) bzw. $47,1^\circ\text{C}$ (Typ 33) gesenkt werden. Die Änderung der Länge von 1,0 m auf 1,5 m geht mit einer möglichen Reduktion der Heizkreistemperatur um $11,6^\circ\text{C}$ (Typ 21), $9,2^\circ\text{C}$ (Typ 22) bzw. $7,3^\circ\text{C}$ (Typ 33) einher.

Die Leistungsangabe der Heizkörper kann auch im Hinblick auf den Einfluss der Gebäudesanierung und damit der Reduktion der Heizlast betrachtet werden. Der Zusammenhang wird hier am Beispiel des Heizkörpers Typ 21 verdeutlicht. Wenn die Heizkörper im unsanierten Gebäude die Heizlast bei einer Heizkreistemperatur von 70°C / 55°C decken, so kann nach einer Reduktion der Heizlast um ein Drittel bzw. die Hälfte die Heizkreistemperatur auf 57°C / 46°C bzw. 50°C / 41°C gesenkt werden.

¹ Bei dieser Angabe werden nur Messobjekte herangezogen, bei denen der spezifische Heizwärmeverbrauch vollständig erfasst wurde.

² Firma: Kermi; Typ: Flachheizkörper therm-x2 Profil; Bauhöhe: 600mm; T_{Raum}: 20°C . Spreizung VL/RL wurde in Abhängig der Temperatur gewählt (bspw. 70/55; 45/37,5)

³ Es werden die Angaben der Wärmeleistung der Heizkörper abhängig von der Betriebstemperatur ausgewertet. Es zeigt sich der als Heizkörperkennlinie bekannte Zusammenhang der Leistung von der logarithmischen Übertemperatur. Ein möglicher Einfluss der unterschiedlichen Oberflächentemperaturen und Flächen auf die operative Raumtemperatur, somit die erforderliche Raumtemperatur und dementsprechend die Heizlast können hiermit nicht erfasst werden.

⁴ Die erste Zahl beschreibt die Anzahl der Platten, die zweite Zahl die Anzahl der Reihen mit Konvektionslamellen.

⁵ Typ 21, 1,0 m: 70.5°C / 55.5°C ; 1,5 m: 56.9°C / 45.9°C

Typ 22, 1,0 m: 60°C / 48.1°C ; 1,5m: 49.2°C / 40.5°C

Typ 33: 1,0 m: 51.8°C / 42.3°C ; 1,5 m: 43.2°C / 36.2°C

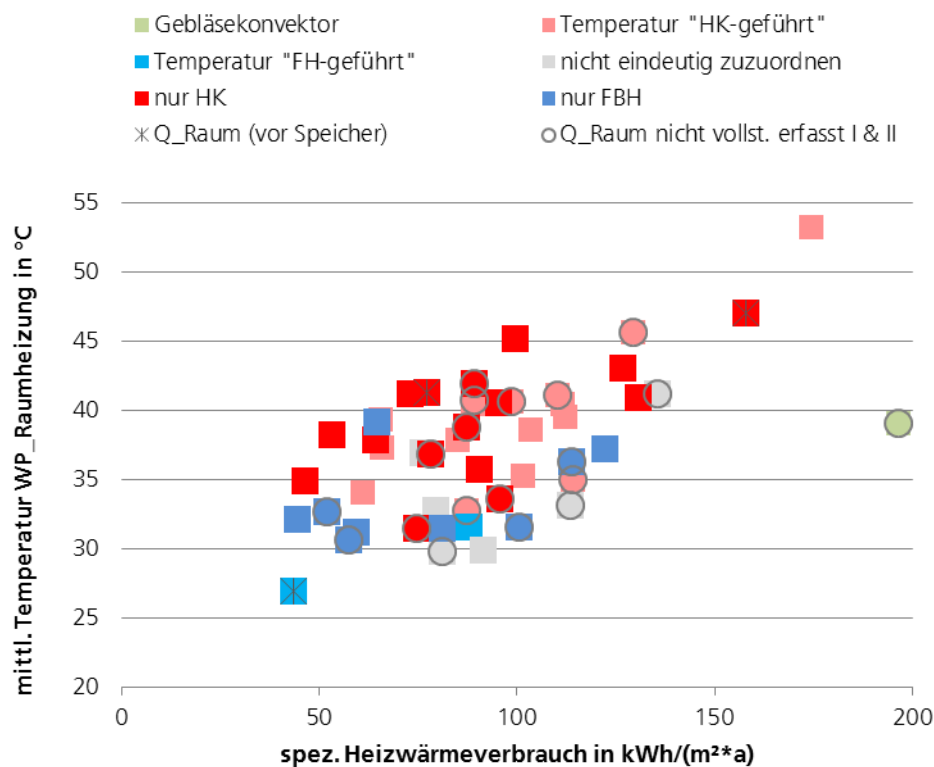


Abbildung 50: Mittlere Betriebstemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über dem spezifischen Heizwärmeverbrauch (Datenbasis: bivalente Wärmepumpenanlagen mit einem Deckungsbeitrag des Kessels > 10 % sind nicht dargestellt)

Die Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen die Jahresarbeitszahl der Bilanzgrenze 3 (inklusive Heizstab) der Außenluft-Wärmepumpen über der mittleren Betriebstemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung. Es zeigt sich der bekannte Zusammenhang von steigender Effizienz mit sinkender Wärmesenktemperatur. Die Bandbreite der JAZ_{RH} liegt – jeweils bei gleicher mittlerer Wärmesenktemperatur betrachtet – zwischen 20 % und 50 % (von Ausreißern abgesehen). Dies ist auf die weiteren Einflussfaktoren zurückzuführen. Hierzu zählen insbesondere die Wärmequellentemperatur (vgl. Kapitel 5.2.1.1), der Heizstabeinsatz (vgl. Kapitel 5.2.1.2), der Gütegrad der Wärmepumpe (vgl. Kapitel 4.4) und der Regelung. Auch ist zu beachten, dass ein energetisch gewichteter Mittelwert der Betriebstemperatur einen guten Indikator für die Betriebsbedingungen der Wärmepumpe darstellt, unterschiedliche Charakteristika der Heizkurven bei gleicher Jahresmitteltemperatur sich jedoch unterschiedlich auf die Jahresarbeitszahl auswirken. Die Ursachen für die niedrige Jahresarbeitszahl der beiden „Ausreißer“ sind in Kapitel 5.2.1.1 bzw. 5.2.2.1 beschrieben.

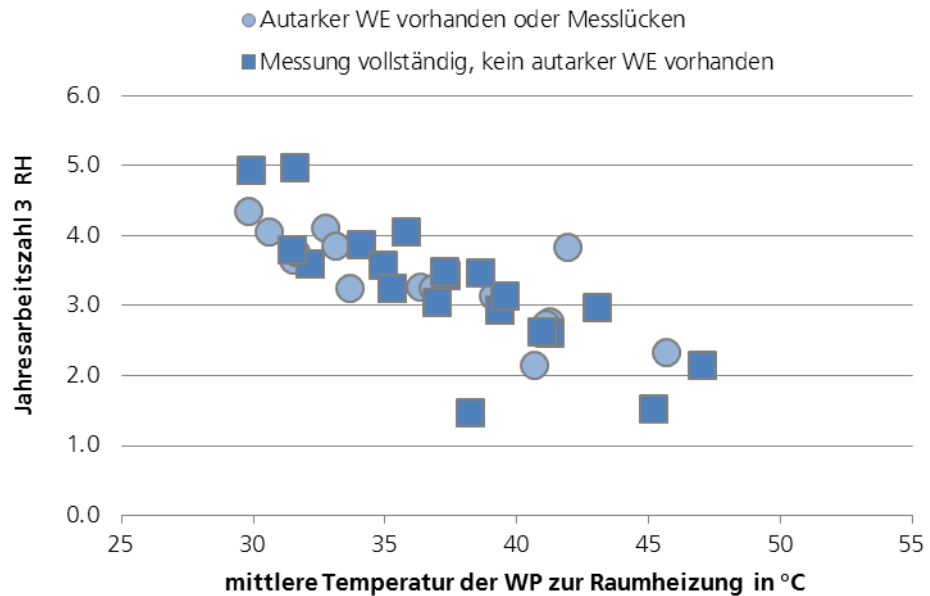


Abbildung 51: Jahresarbeitszahl der Außenluft-Wärmepumpen im Betriebsmodus Raumheizung über der energetisch gewichteten mittleren Betriebstemperatur der Wärmesenkenseite (Datenbasis: bivalente Wärmepumpenanlagen mit einem Deckungsbeitrag des Kessels > 10 % sind nicht dargestellt)

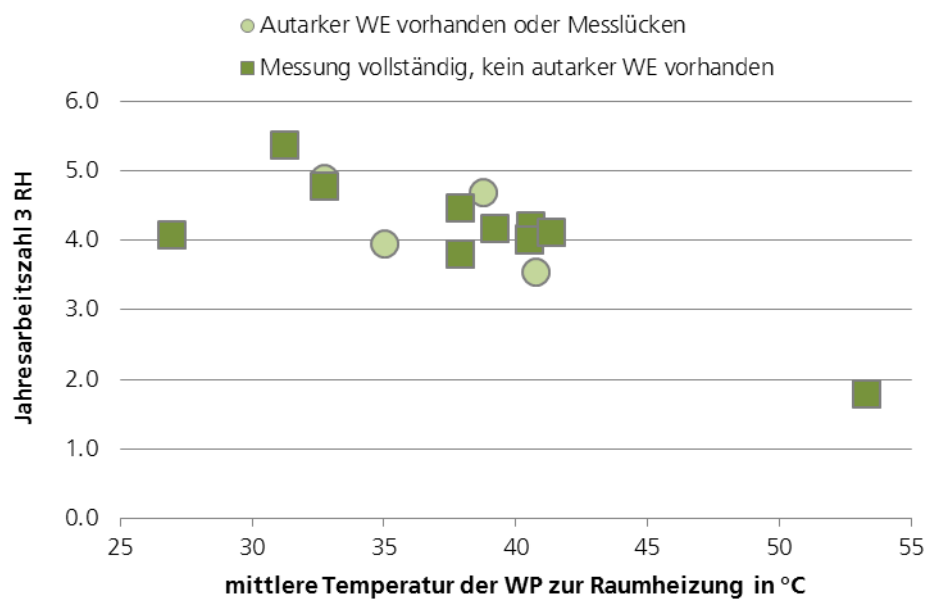


Abbildung 52: Jahresarbeitszahl der Sole-Wärmepumpen (Erdreich und Eisspeicher) im Betriebsmodus Raumheizung über der energetisch gewichteten mittleren Betriebstemperatur der Wärmesenkenseite (Datenbasis: bivalente Wärmepumpenanlagen mit einem Deckungsbeitrag des Kessels > 10 % sind nicht dargestellt)

5.3.2 Fokus Einzelanlagen – Baualter, Gebäudequalität, Heizkreistemperatur und Anlageneffizienz

In Kapitel 5.2 liegt der Fokus auf die Bewertung der Effizienz vor dem Hintergrund der Betriebsbedingungen, wie bspw. der Wärmequellen- oder Wärmesenkentemperaturen.

Ein weiterer Projektfokus besteht in der Bewertung der Wärmepumpeneffizienz sowie der Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung der energetischen Eigenschaften der Gebäude, in denen die Wärmepumpen eingesetzt werden. Über die detaillierte Bewertung eines Großteils der Gebäude wird Kapitels 4.2.3 berichtet. Das Ergebnis dieser Bewertung ist der in Kapitel 5.3.1 beschriebene *Gebäudekennwert* für den Original- und im Istzustand. In der Abbildung 53 werden diese Ergebnisse in Form der Farbcodierung für Vierecke (Originalzustand) und für Kreise (Istzustand) gemeinsam mit den Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenze 3, den mittleren Temperaturen und maximalen Vorlauftemperaturen zur Raumheizung, den Energieanteilen für Raumheizung (RH) und Trinkwassererwärmung (TWE) und den Informationen über Wärmeübergabesysteme (WÜS) und zusätzlichen Wärmeerzeugern dargestellt. Die Auswertung erfolgt für 28 Außenluft-Wärmepumpen, die sowohl zur RH als auch zur TWE eingesetzt wurden und für den Zeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 ausgewertet werden konnten. Die Datenbasis wurde damit analog zu jener Anlagengruppe auf der linken Seite in Abbildung 44 auf Seite 72 ausgewählt. Die einzige Abweichung besteht in der nicht Berücksichtigung des Messobjektes mit der **ID 366**, da für dieses Gebäude kein Baujahr bekannt ist. Die Sortierung der Anlagen erfolgt zuerst gemäß Baualter in vier Gruppen, wobei sich die oberen Grenzen an den Wärmeschutzverordnungen 1977 und 1995 orientieren sowie an der Baualtersklasse bis 1948 gemäß (Loga et al. 2015). Innerhalb der Baualtersperioden werden die Messobjekte nach der JAZ sortiert.

Wie im Kapitel 5.2 beschrieben, hat die erforderliche Temperatur zur Raumheizung einen wesentlichen Einfluss auf die JAZ der Wärmepumpe. Die erforderliche Heizkreistemperatur hängt im Wesentlichen vom spezifischen Heizwärmebedarf und den eingesetzten Wärmeübergabesystemen ab. Als Indikator für den spezifischen Heizwärmebedarf werden in der Grafik die entsprechend der Wärmeschutzverordnungen 1977 und 1995 skalierten U-Werte der Gebäude (*Gebäudekennwert*) im Original- sowie Istzustand gezeigt. Die den beiden jüngeren Baualtersperioden zuordenbaren Gebäude entsprachen in etwa den Anforderungen der WSchV'95 und wurden, falls überhaupt, nur unwesentlich energetisch saniert. Die Gebäude in den zwei älteren Baualtersperioden entsprachen ursprünglich, gemäß *Gebäudekennwert*, weitestgehend Gebäuden von vor der ersten WSchV und damit der untersten Kategorie der hier getroffenen Skalierung. Bei all diesen Gebäuden wurden Sanierungsmaßnahmen ergriffen, die kleinere, wie bspw. bei den **ID 327** und **ID 344**, oder größere energetische Verbesserungen nach sich zogen. Die größten Differenzen zwischen Original- und Istzustand konnten für die Messobjekte **ID 329**, **ID 321** und **ID 323** ermittelt werden. Diese und **ID 368** sowie **ID 322** (alle in Baualtersperiode 1949 bis 1979) sind als einzige bzgl. des Istzustandes der höchsten Kategorie zugeordnet. Bezüglich der WÜS lässt sich lediglich feststellen, dass die Messobjekte in der Baualtersperiode 1949 bis 1979 tendenziell weniger über kombinierte WÜS verfügen: von 12 Systemen sind je vier ausschließlich mit Heizkörpern bzw. Fußbodenheizungen ausgestattet.

Ungeachtet der energetischen Qualität der Gebäude und der installierten WÜS ist eine relativ breite Verteilung von Jahresarbeitszahlen und Heizkreistemperaturen über fast alle Baualtersperioden hinweg festzustellen, allen voran in den beiden mittleren Baualtersperioden. In den Gebäuden von 1949 bis 1979 (1981 bis 1994) werden die Wärmeübergabesysteme im Mittel mit 31°C bis 43°C (30°C bis 41°C) betrieben und Arbeitszahlen zwischen 2,5 und 3,6 (2,5 und 3,6 plus den zwei Ausreißern mit 4,1 und 4,6) erreicht. Auch die drei Messobjekte mit der geringeren energetischen Qualität der Gebäude reihen sich mit JAZ von 2,5 (**ID 344**), 2,8 (**ID 330**) und 3,5 (**ID 313**) in dieser Bandbreite ein. Bei denen der ältesten Baualtersperiode zugeordneten Messobjekte sind die mittleren Heizkreistemperaturen mit 39°C bis 43°C (eine Anlage mit 32°C) etwas höher, die JAZ mit 2,7 bis 3,3 im Mittel jedoch auf ähnlichem Niveau. Die drei der jüngsten Periode zugeordneten Messobjekte erzielen JAZ von 2,8, 3,1 und 3,8 bei mittleren Heizkreistemperaturen von 38°C, 35°C und 36°C.

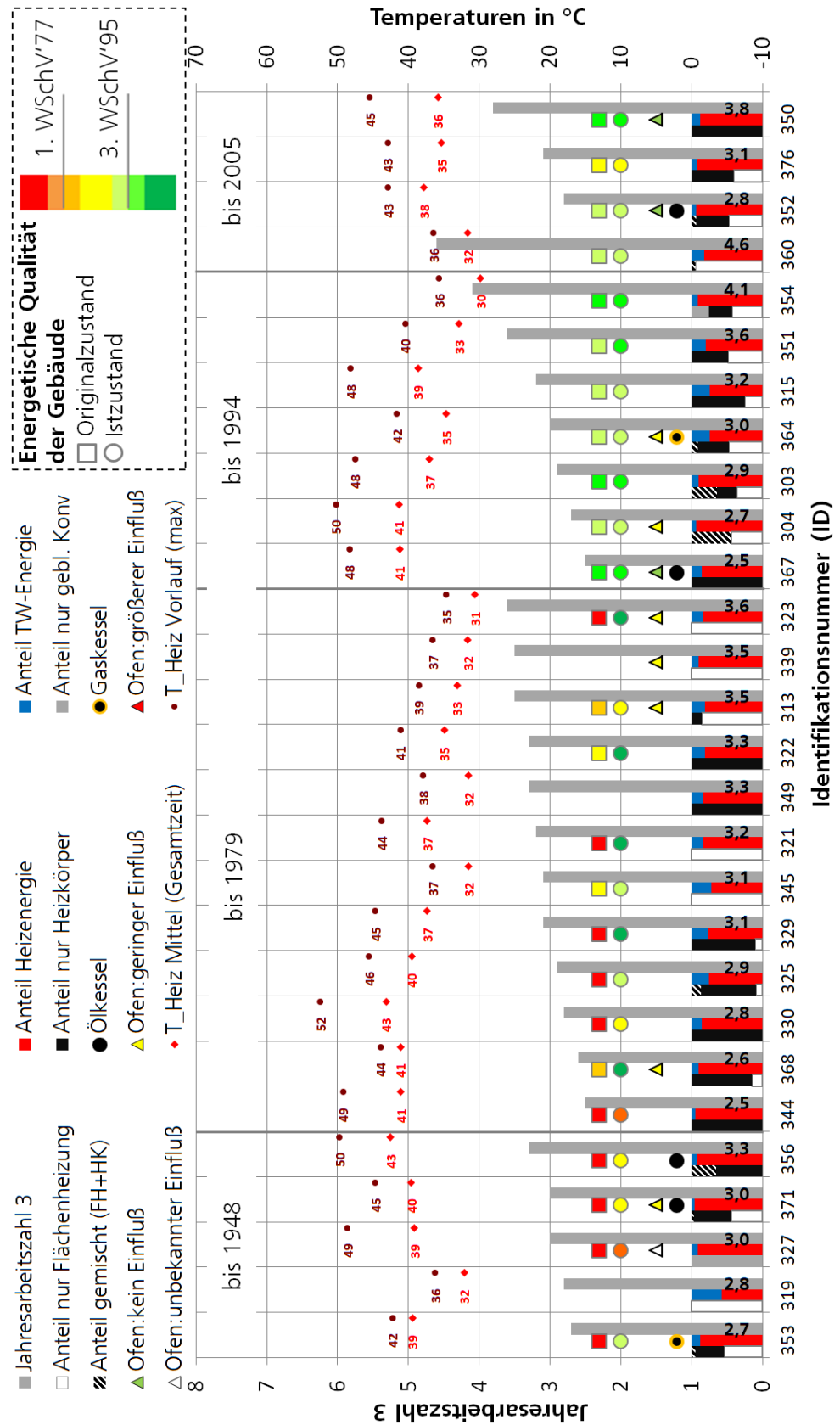


Abbildung 53: Messergebnisse, typische Eigenschaften und die Ergebnisse der energetischen Gebäudebewertung in Kapitel 4.2.3 für 28 Außenluft-Wärmepumpen sortiert nach Bauabschnitten orientiert an den Wärmeschutzverordnungen 1977 und 1995

Analog zur Abbildung 53 für die Außenluft-Wärmepumpen gibt die Abbildung 54 die entsprechenden Inhalte für die 12 Erdreich-Wärmepumpen wieder. Die Anlage mit abweichendem Auswertungszeitraum (**ID 309**) wird dabei nicht berücksichtigt. Insgesamt sind die Baualtersperioden mit einer, zwei oder vier Anlagen relativ klein, was bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden muss.

Die Gebäude der Baualtersperiode bis 1949 hatten entsprechend der damaligen Bauweise alle einen geringen energetischen Standard. Die jeweils durchgeführten Sanierungsmaßnahmen führten bei den Gebäuden mit **ID 337** und **ID 328** zu mittleren U-Werten, die über den Grenzwerten der WSchV'95 liegen. Darüber hinaus sind beide Systeme ausschließlich mit Fußbodenheizungen ausgestattet. Die in Summe sehr geringen mittleren Temperaturen zur RH ermöglichen die vergleichsweise hohen JAZ von 4,3 und 4,7. Bei den beiden anderen Anlagen wurden geringere JAZ vom 3,8 (**ID 331**) und 4,0 (**ID 365**) ermittelt, was u.a. auf die höheren U-Werte und die Nutzung von Heizkörpern bzw. kombinierten WÜS zurückzuführen ist.

Die beiden Gebäude der nächst jüngeren Baualtersperiode bis 1979 haben sehr unterschiedliche Entwicklungen des Energiebedarfs seit Ihrer Errichtung. Bei **ID 363** lag der energetische Standard des Gebäudes bereits zwischen den Anforderungen von WSchV'77 und WSchV'95. Die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen führten nur zu einer geringfügigen Verbesserung des *Gebäudekennwertes*. Die Heizkörper werden im Schnitt mit 40,5°C betrieben und die JAZ beträgt 3,7. Bezogen auf das Gebäude hatte die **ID 333** schlechtere Voraussetzungen. Die Sanierungsmaßnahmen haben jedoch eine Verringerung der U-Werte bis etwas oberhalb der Mindestanforderungen der WSchV'95 ermöglicht. Zusammen mit der überwiegenden Nutzung von Fußbodenheizung als WÜS sind sehr geringe Temperaturen zur Raumheizung (32,8°C) und eine entsprechend hohe JAZ von 4,5 möglich.

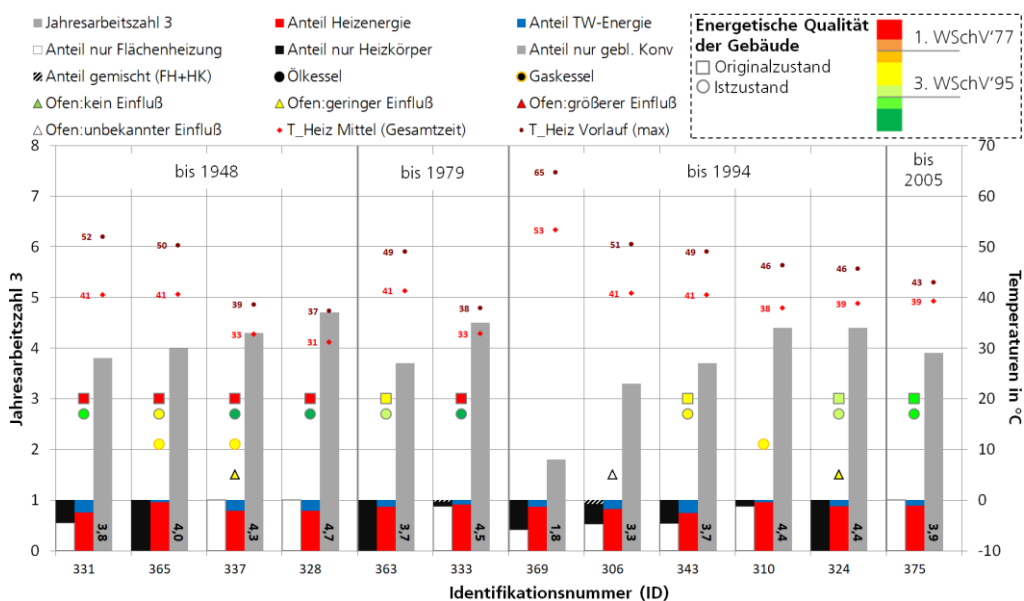


Abbildung 54: Messergebnisse, typische Eigenschaften und die Ergebnisse der energetischen Gebäudebewertung in Kapitel 4.2.3 für 12 Erdreich-Wärmepumpen sortiert nach Baualtersperioden orientiert an den Wärmeschutzverordnungen 1977 und 1995

In der Baualtersperiode 1980 bis 1994 erfolgte die Analyse der energetischen Zustände der Gebäude nur für die **ID 343** und **ID 324**, wobei beide *Gebäudekennwerte* zwischen WSchV'77 und WSchV'95 bzw. knapp unter WSchV'95 anzusiedeln sind. Falls Sanierungsmaßnahmen erfolgten, haben diese nicht zu einer wesentlichen Verbesserung der *Gebäudekennwerte* beigetragen. Bezogen auf alle Anlagen dieser Gruppe

liegen die mittleren Heizkreistemperaturen, abgesehen von jener der **ID 369**, auf einem ähnlichen Temperaturniveau zur Raumheizung. Dennoch reichen die JAZ von 3,3 bis 4,4, worauf im Kapitel 5.2.2 näher eingegangen wird.

Die jüngste Baualtersperiode enthält nur das Messobjekt mit der **ID 375**. Gemäß Baujahr entsprach die energetische Qualität des Gebäudes bereits den Vorgaben der WSchV'95. Für die Fußbodenheizung sind untypisch hohe Temperaturen von 39,2°C erforderlich.

Zusammenfassend lässt sich für die untersuchten Messobjekte kein Zusammenhang zwischen Baualter bzw. - Baualtersklasse und JAZ feststellen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass auch die Anforderungen an die Wärmepumpen im Hinblick auf die erforderlichen Temperaturen für die RH keinen Zusammenhang zum Alter der Gebäude aufweisen. Wie bereits erwähnt, hängen diese Temperaturen in erster Linie vom spezifischen Heizwärmebedarf und dem installierten Wärmeübergabesystem ab. Die Gebäude der beiden Baualtersperioden bis 1979 wiesen ursprünglich überwiegend mittlere U-Werte auf, die unterhalb der Anforderungen der WSchV'77 lagen. Bei all diesen Gebäuden wurden Sanierungsmaßnahmen vorgenommen, die eine Verbesserung der U-Werte in sehr unterschiedlichen Ausmaßen nach sich zogen. Die Bandbreite reicht nun im Istzustand vom Niveau der WSchV'77 bis oberhalb der Grenzwerte für die WSchV'95. Einige Messobjekte weisen damit auch einen Zustand auf, der besser als der Ist-Zustand der Gebäude der jüngeren Baualtersperioden ist. Somit besteht eine große Vielfalt in den mittleren U-Werten (*Gebäudekennwerten*) bei den Messobjekten der älteren Baualtersperioden, während die U-Werte der jüngeren Gebäude in einem ähnlichen Bereich und überwiegend auf dem Niveau rund um der WSchV'95 liegen. Es kann festgehalten werden, dass das Baualter zuerst kein Kriterium für die Effizienz des Anlagenbetriebs ist, sondern die individuellen Voraussetzungen bezüglich der erforderlichen Systemtemperaturen.

5.4 Analyse bivalente Systeme

5.4.1 Jahresbilanz

Der Einsatz bivalenter Systeme kann sehr unterschiedliche Ziele verfolgen. Im Einfamilienhausbereich sind dies heutzutage u.a.:

- Einsatzgrenzen (Temperaturen) der Wärmepumpe könnten (zeitweise) nicht eingehalten werden,
- Stufenweise Gebäude- und Anlagensanierung¹,
- Nutzung eines vorhandener Kessels als Backup,
- Minimierung der Betriebskosten²,
- Minimierung des Primärenergieeinsatzes oder des CO₂-Äquivalentes³.

Entsprechend der Anwendungssituation und der Zielstellung des Bewohners sind bivalente Anlagen unterschiedlich ausgelegt und es werden unterschiedliche Betriebskonzepte umgesetzt. Man unterscheidet eine parallele Betriebsweise (unterhalb des Biva-

¹ Wird zunächst nur die Anlagentechnik erneuert und eine Gebäudesanierung zu einem deutlich späteren Zeitpunkt durchgeführt, so wird die Wärmepumpe nur auf den zukünftigen Anwendungsfall hin ausgelegt. Zunächst wird die vorhandene Kesselanlage - oder falls erforderlich bzw. sinnvoll ein neuer Kessel bzw. Mehrkesselanlage - zusammen mit der Wärmepumpe betrieben

² Abhängig der aktuellen Energiepreise und Effizienz wird der jeweils günstigere Wärmeerzeuger genutzt.

³ Abhängig des aktuellen mutmaßlichen spez. PE-Faktors bzw. CO₂-Äquivalentes und der Effizienz wird der jeweils günstigere Wärmeerzeuger genutzt.

lenzpunktes kann zusätzlich zur Wärmepumpe auch der Kessel in Betrieb gehen) und eine alternative Betriebsweise (unterhalb des Abschaltpunktes wird die Heizlast alleine von dem Kessel übernommen.) Es ist auch eine Kombination beider Betriebsweisen möglich. Die Regelung verwendet entweder einen festen Bivalenz- bzw. Abschaltpunkt (bspw. Außenlufttemperatur, Wärmesenktemperatur, Sperrzeiten) oder ermittelt den Bivalenz- bzw. Abschaltpunkt variabel in Abhängigkeit der Betriebs- oder weiterer veränderlicher Randbedingungen. Zu den variablen Betriebsstrategien zählen u.a.:

- Minimierung der Betriebskosten:
Berücksichtigung der (variablen) Energiepreise, der Effizienz der Wärmeerzeuger und ggf. der Eigenstromverfügbarkeit zum jeweiligen Zeitpunkt.
- Minimierung des Primärenergiebedarfes oder der CO_{2,Äq}-Emissionen:
Berücksichtigung der Primärenergie- bzw. CO_{2,Äq}-Faktors der eingesetzten Endenergieträger, der Effizienz der Wärmeerzeuger und ggf. der Eigenstromverfügbarkeit zum jeweiligen Zeitpunkt.

Anhand der Betriebsdaten der untersuchten Anlagen zeigt sich, dass bei den Messobjekten sehr unterschiedliche Betriebskonzepte verfolgt wurden. Da keine Informationen über die jeweiligen Zielstellungen und Regelungskonzepte vorliegen, erfolgt die Auswertung der Betriebsdaten, ohne diese in den Kontext der jeweiligen Zielstellungen einordnen zu können.

Abbildung 55 zeigt den Deckungsanteil der Wärmepumpenanlage (WP & Heizstab) bzw. des Kessels getrennt für die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung. Für zwei Anlagen erfolgt eine abweichende Darstellung. Bei der Anlage **ID 367** war aus technischen Gründen keine getrennte Vermessung der beiden Betriebsmodi möglich. Der Deckungsbeitrag ist hier auf den Gesamtbetrieb bezogen dargestellt. Bei der Anlage **ID 307** konnte nur der Betriebsmodus Raumheizung ausgewertet werden, da aus technischen Gründen kein Wärmemengenzähler im Trinkwasserspeicher-Ladekreis des Kessels eingebaut werden konnte. Die zehn bivalenten Anlagen weisen entsprechend der unterschiedlichen Betriebsstrategien sehr unterschiedliche Deckungsanteile der Wärmepumpe auf. Der Deckungsanteil reicht von einer Anlage, bei der der Kessel nicht zum Einsatz kam, bis zu Deckungsanteilen der Wärmepumpe von 48 % (Raumheizung) bzw. 38 % (Trinkwassererwärmung). Bei den drei Anlagen mit Deckungsbeiträgen der Wärmepumpe über 93 %, war der Kessel entweder nur sporadisch oder nur bei sehr niedrigen Temperaturen in Betrieb. Bei zwei dieser Anlagen ist zudem ein Anteil des Kesselbetriebes auf Zeiten zurückzuführen, an den die Wärmepumpe – aus nicht bekannten Gründen – außer Betrieb war. In den übrigen sechs bivalenten Anlagen wurden die Kessel häufiger eingesetzt. Die Deckungsanteile lagen hier zwischen 89 % und 48 % (Raumheizung) und 81 % und 39 % (Trinkwassererwärmung). Während bei einer Anlage der Betrieb sowohl im Raumheizungs- als auch im Trinkwasser-Modus (weitgehend) unabhängig von der Außenlufttemperatur war und bei einer Anlage ebenfalls im Trinkwasser-Modus, so zeigte sich bei den anderen Anlagen eine außenlufttemperaturabhängiger Einsatz des Kessels. Die Auswertung der täglichen Deckungsbeiträge lässt vermuten, dass (zumindest bei einigen der Anlagen) kein fixer Bivalenz-/Abschaltpunkt, sondern vielmehr ein variabler Betriebspunkt (bspw. abhängig von der Effizienz - und damit den Betriebsbedingungen - und dem Kostenverhältnis von Strom und Brennstoff) genutzt wird. Die meisten Anlagen werden bivalent-alternativ betrieben, entweder Kessel oder Wärmepumpe ist im Einsatz. In Kapitel 5.4.2 werden die Anlagen einzeln auf Basis von Tageswerten untersucht.

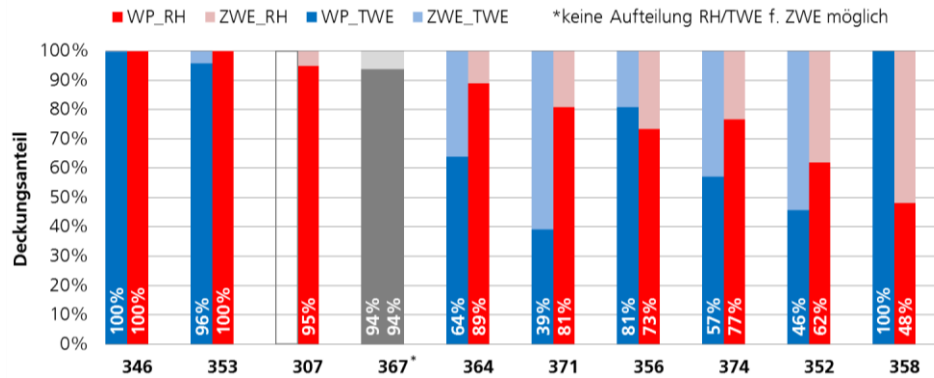


Abbildung 55: Deckungsanteil der Wärmepumpe bzw. des Kessels für die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung. Heizperiode 2018/2019 (Ausnahme ID 374: 2017/2018, vgl. Kapitel 4.1)

Bei fünf bivalenten Anlagen kann der Brennstoffbezug bewertet werden¹. Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der Deckungsanteile, der Betriebsbedingungen und der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe sowie des Nutzungsgrades der Kessel.

Tabelle 6: Bivalenten Anlagen, bei denen der Brennstoffbezug ausgewertet wurde: BWK: Typ des Kessels (Brennwertkessel, TTK: Tieftemperaturkessel), Deckungsanteil der Wärmepumpe in den Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung, energetisch gewichtete mittlere Betriebstemperatur der Wärmepumpe bzw. des Kessels getrennt für die beiden Betriebsmodi, JAZ_3 (Gesamtjahresarbeitszahl; ** Ausnahme ID 358: nur RH), Nutzungsgrad NG (bezogen auf den oberen Heizwert und auf den unteren Heizwert). Auswertungsperiode 2018 / 2019, Ausnahme ID 364* Nutzungsgrad des Kessels ist nur für den Zeitraum Juli 2018 – April 2019 bekannt

ID	Kessel	Anteil WP RH	Anteil WP TWE	T_WP RH; TWE	T_K RH; TWE	JAZ_3	NG H _o , H _u
364*	Gas, BWK	89%	64%	34°C; 48°C	41°C; 75°C	3.0	70%; 78 %
356	Öl, TTK	73%	81%	42°C; 41°C	54°C; 56°C	3.3	77%; 82 %
358	Öl, BWK	48%	100%	37°C	53°C ;	3.6**	87%; 92 %
371	Öl, BWK	81%	39%	40°C; 50°C	50°C; 60°C	3.0	92%; 97 %
352	Öl, TTK	62%	46%	38°C; 51°C	52°C; 61°C	2.8	75%; 80 %

Zu den fünf betrachteten Systemen zählt eine Anlage mit Gas-Brennwertgerät und je zwei Anlagen mit Öl-Brennwertgerät bzw. mit Öl-Tieftemperaturkessel. Die Öl-Tieftemperaturkessel erreichten Jahresnutzungsgrade von 77 % bzw. 75 % brennwertbezogen und 82 % bzw. 80 % heizwertbezogen. Beide Kessel zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Effizienz von der täglichen Auslastung. Bei geringer täglicher

¹ Bei den anderen Anlagen konnte der Brennstoffbezug entweder nicht gemessen werden oder die Messung war nicht fehlerfrei möglich.

Auslastung sinkt die Effizienz sehr stark ab (vgl. Kapitel 5.4.2). Ursache hierfür könnte der Einfluss von Taktverhalten und – falls vorhanden – interner Wasserkapazitäten sein. Der Jahresnutzungsgrad des Gas-Brennwertkessel liegt mit 70 % bzw. 78 % in der gleichen Größenordnung. Bei der Einordnung des Nutzungsgrades dieses Brennwertkessels sind die Temperaturbedingungen in den Blick zu nehmen. Gut zwei Drittel der Wärme stellte der Kessel zur Trinkwassererwärmung bei einer mittleren Betriebstemperatur von 75°C bereit, ein Drittel zur Raumheizung bei 41°C. Der Jahresnutzungsgrad eines der Öl-Brennwertkessel, der nur zur Raumheizung (53°C) eingesetzt wird, ergibt sich zu 97 % brennwertbezogen bzw. 92 % heizwertbezogen. Der andere Öl-Brennwertkessel erreichte einen Jahresnutzungsgrad von 92 % brennwertbezogen bzw. 97 % heizwertbezogen mit mittleren Betriebstemperaturen von 50°C (Raumheizung) und 60°C (Trinkwassererwärmung).

Bei vier Anlagen ist auch eine Auswertung des Brennstoffbezuges auf Tagesebene möglich (vgl. Kapitel 5.4.2). Für diese Anlagen wird der Betrieb von Wärmepumpen und Öl-Kessel auf Basis der $\text{CO}_{2,\text{Äq}}$ -Emissionen und der verbrauchsgebundenen Kosten gegenübergestellt. Es werden folgende Randbedingungen des Jahres 2018, bzw. für den $\text{CO}_{2,\text{Äq}}$ -Faktoren Heizöl abweichend des Jahres 2015 zu Grunde gelegt.

- $\text{CO}_{2,\text{Äq}}$ (INAS 2019)
 - Strom Haushalt: 505 g/kWh_{EE}
 - Heizöl Haushalt: 269 g/kWh_{öl,Hu}
- Preis (Bundesnetzagentur 2020), (Statistische Bundesamt)
 - Strom Wärmepumpentarif: 21,71 ct/ kWh_{EE}
 - Heizöl Haushalt¹: 5,45 ct/ kWh_{Gas,Ho}

Es zeigt sich, dass die vier Außenluft-Wärmepumpen unter allen Betriebsbedingungen (auf Tagesbasis betrachtet) stets ökologisch vorteilhaft gegenüber dem Kesselbetrieb sind. Aus ökonomischer Sicht verhält es sich anders. Je nach Betriebsbedingungen (bspw. den Betriebstemperaturen und der Betriebsweise und ggf. auch dem Wasserinhalt des Kessels) ist der Betrieb der Wärmepumpe – bei der angesetzten Kostenstruktur – erst bei Außenlufttemperaturen über 0°C bis 8°C günstiger als der Betrieb des Kessels.

5.4.2 Tagesbilanz

Die einzelnen bivalenten Anlagen werden in der Reihenfolge des Jahresdeckungsanteils des Kessels beschrieben.

ID 346

Bei dieser Anlage war der Ölkessel (BJ 1975) nicht in Betrieb. Laut Aussage der Bewohner ist der Bestandskessel nur als Backup vorhanden und es war nicht geplant, diesen regulär für die Gebäudeheizung oder Trinkwassererwärmung einzusetzen.

ID 353²

Der Kessel (Flüssiggas) ist als Beimischschaltung in den Heizungsvorlauf nach dem Pufferspeicher eingebunden. Die Erwärmung des Trinkwasserspeichers erfolgt über zwei separate speicherintegrierte Wärmeübertrager für die Außenluft-Wärmepumpe und den Kessel. Der Kessel war zur Trinkwassererwärmung an einzelnen Tagen zu unterschiedlichen Zeiten im Jahr, verstärkt im Juni 2019, in Betrieb. Der tägliche Deckungs-

¹ Mit: 57,82 €/Hektoliter, Brennwert: 10,51 kWh/l

² Da für diese Anlage kein Brennstoffverbrauch ermittelt wurde, erfolgt keine ökologische und ökonomische Bewertung.

anteil an der Trinkwassererwärmung variierte an diesen rund 50 Tagen sehr stark, von wenigen Prozent bis zu einer (fast vollständigen) Deckung. Daraus resultierte ein Jahres-Deckungsanteil zur TWE von 4 %. Ein Betrieb zur Unterstützung der Raumheizung war - bis auf drei Tagen mit einem täglichen Deckungsanteil unter 3 % - nicht zu verzeichnen. Aus den Messdaten lassen sich keine Rückschlüsse über die zugrunde liegende Regelungsstrategie ziehen.

ID 307²

Der Öl-Brennwertkessel ist in Reihe in den Vorlauf der Außenluft-Wärmepumpe eingebunden, wobei die Wärmepumpe auch im Bypass umgangen werden kann. Der Jahres-Deckungsbeitrag des Kessels an der Raumheizung von 5 % ist auf zwei unterschiedliche Einflüsse zurückzuführen (vgl. Abbildung 56). Anfang Januar 2019 war die Wärmepumpe für 7 Tage nicht in Betrieb. Hier übernahm der Kessel die Wärmeversorgung vollständig. Dies verursachte rund ein Drittel des Kesselbetriebes. Im regulären Betrieb zeigt sich ein mit sinkender Außenlufttemperatur zunehmender Einsatz des Kessels. Bei Außenlufttemperaturen (Tagesmittelwert) zwischen + 5°C und - 5°C liegt der tägliche Deckungsbeitrag meist zwischen 2 % und 20 %. An den beiden Tagen mit niedrigeren Außenlufttemperaturen deckte der Kessel einen höheren Anteil der Heizlast ab (35 % bzw. 55 %). Teils ist der Kessel zeitgleich mit der Wärmepumpe in Betrieb, teils ist der Kessel alleine in Betrieb. Der Kessel kann auch zur Trinkwassererwärmung eingesetzt werden. Aus technischen Gründen konnte jedoch kein Wärmemengenzähler im Trinkwasserspeicher-Ladekreis eingebaut werden.

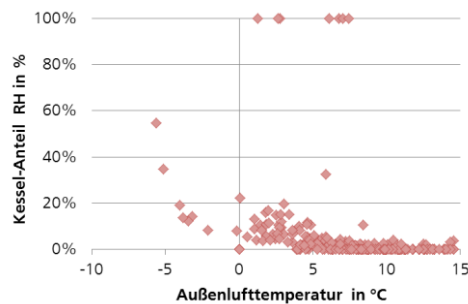


Abbildung 56: Täglicher Deckungsanteil des Kessels an der Raumheizung der Anlage ID 307 während der Auswertungsperiode 2018/2019

ID 367²

Bei dieser Anlage sind Kessel und Wärmepumpe separat an den Kombispeicher eingebunden. Daher können die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung nicht unterschieden werden. Der Jahres-Deckungsanteil des bodenstehenden Öl-Kessels (BJ 1994) liegt bei 6 %. Dies ist zu gut der Hälfte auf einen unplanmäßigen Betrieb im Herbst 2018 zurückzuführen, als die Wärmepumpe für 5 Wochen nicht in Betrieb war (vgl. Abbildung 57). Im regulären Betrieb war der Kessel an nur 4 Tagen bei niedrigen Außenlufttemperaturen im Einsatz. An diesen Tagen lief die Anlage im Alternativbetrieb; entweder der Kessel oder die Wärmepumpe war in Betrieb. Der Abschaltzeitpunkt der Wärmepumpe liegt im Bereich von - 2°C bis - 5°C. Aus den Messdaten lassen sich die Abschaltkriterien nicht genau bestimmen, da zum einen – wie bei den anderen Anlagen auch – die gemessene Außenlufttemperatur von Anlagenregler und Monitoringmesstechnik aufgrund unterschiedlicher Positionierungen voneinander abweichen kann und zum anderen nicht bekannt ist, ob bzw. welches Mittelungsintervall der Außenlufttemperatur in der Regelung hinterlegt ist. Möglicherweise ist auch nicht die Außenlufttemperatur das (alleinige) Kriterium für den Abschaltzeitpunkt.

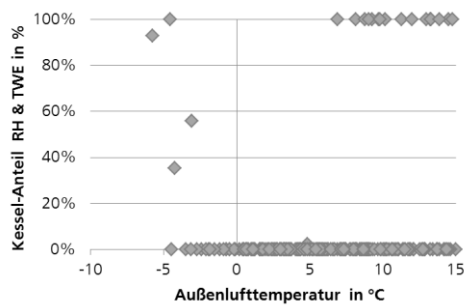


Abbildung 57: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 367 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2018/2019

ID 364

Bei dieser Anlage sind der wandhängende Gas-Brennwertkessel (BJ 2011) und die Außenluft-Wärmepumpe jeweils über getrennte Ladekreise an den Heizungsspeicher und den Trinkwasserspeicher angebunden. Im Betriebsmodus Raumheizung ist der Kessel bei Außenlufttemperaturen unter + 8°C (vereinzelt auch bei höheren Temperaturen) in Betrieb (vgl. Abbildung 58). Der tägliche Deckungsanteil des Kessels liegt meist zwischen 5 % und 40 %, wobei sich nur eine geringe Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur zeigt. Es überwiegt eine starke Streuung des Deckungsbeitrages an Tagen gleicher Außenlufttemperatur. Teils sind Wärmepumpe und Kessel zeitgleich in Betrieb, teils zu unterschiedlichen Zeiten. Aus den Messdaten lassen sich keine Rückschlüsse auf das Regelungskonzept ziehen. Der Jahres-Deckungsbeitrag des Kessels an der Raumheizung ergibt sich zu 11 %. Zur Trinkwassererwärmung ist der Kessel täglich – unabhängig von der Außenlufttemperatur – in Betrieb. Der tägliche Deckungsbeitrag liegt i.d.R. zwischen 10 % und 80 %. Über das Jahr betrachtet beläuft sich der Deckungsbeitrag zur Trinkwassererwärmung auf 36 %.

Der Gasverbrauch wurde bis Mai 2019 monatlich vom Anlagenbetreiber schriftlich übermittelt. Bezogen auf den Zeitraum Juli 2018 bis April 2019 liegt der brennwertbezogene Nutzungsgrad des Kessels bei 70 %. Der Kessel stellt gut ein Drittel der bereitgestellten Wärme zur Raumheizung bei einer mittleren Betriebstemperatur¹ von 41°C und entsprechend knapp zwei Drittel zur Trinkwassererwärmung bei einer mittleren Betriebstemperatur von 75°C bereit. In diesem Betriebsmodus kann der Brennwerteffekt nicht genutzt werden.

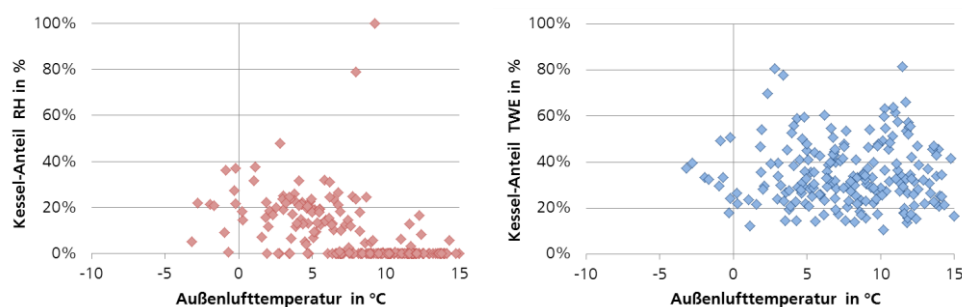


Abbildung 58: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 364 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2018/2019

¹ Energetisch gewichteter Mittelwert aus Vorlauf und Rücklauf

ID 371

Diese bivalente Anlage besteht aus einer Außenluft-Wärmepumpe und einem zweistufigen Öl-Brennwertkessel (BJ 2007). Kessel und Wärmepumpe erwärmen den Trinkwasserspeicher über denselben speicherintegrierten Wärmeübertrager. An den Heizkreis sind beide Wärmeerzeuger separat, jeweils über eine hydraulische Weiche eingebunden.

Der Jahres-Deckungsanteil des Kessels an der Raumheizung liegt bei 19 %. Die Auswertung über den Jahresgang zeigt, dass diese Anlage im Laufe der Auswertungsperiode mit unterschiedlichen Regelungskonzepten bzw. Parametrierungen der Regelung betrieben wurde. Der Bivalenz- / Abschaltpunkt bzw. weitere Regelungsparameter wurden mehrfach verändert (vgl. Abbildung 59). Da hierzu keine Angaben vorliegen, der Betrieb keine genauen Rückschlüsse auf die Regelung ermöglicht und die Änderungen häufig vorgenommen wurden, wird an dieser Stelle auf eine Beschreibung der täglichen Deckungsgrade verzichtet. Auch die Betriebsstrategie im Betriebsmodus Trinkwassererwärmung wurde vermutlich mehrmals geändert. Meist erfolgte die Trinkwassererwärmung nur über den Kessel oder die Wärmepumpe, also alternativbivalent. Aufgrund der mehrfachen Änderungen und der unbekannten Betriebskonzepte kann der Jahres-Deckungsbeitrag des Kessels zur Trinkwassererwärmung von 61 % in keinen Kontext gesetzt werden.

In Abbildung 59 erfolgt ein Vergleich des brennwertbezogenen Nutzungsgrades des Kessels mit der Arbeitszahl der Wärmepumpe vor dem Hintergrund einer ökologischen und einer ökonomischen Betrachtung, getrennt in zwei Diagrammen. Die Darstellung basiert auf Tageswerten. Die Effizienzkennwerte sind jeweils auf zwei unterschiedlich skalierte y-Achsen (WP links; Kessel rechts) bezogen dargestellt. Die Skalierung entspricht für die ökologische Betrachtung dem Verhältnis der $\text{CO}_{2,\text{Aq}}$ -Faktoren und zur ökonomischen Betrachtung dem Verhältnis der Kosten der Energieträger. Hierbei wird der Wärmepumpentarif zu Grunde gelegt (vgl. Kapitel 5.4.1). Die Arbeitszahl (RH & TWE) der Wärmepumpe zeigt die typische Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur mit einer großen Streuung. Dies ist zum einen auf die variierenden Anteile der Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung zurückzuführen. Zum anderen wirkt sich die Änderung der Heizkurve um knapp 10 K im Februar 2019 deutlich aus. Der brennwertbezogene Nutzungsgrad (RH & TWE) des Kessels lag weitestgehend unabhängig von der Außenlufttemperatur bis Anfang Februar 2019 bei rund 94 % und anschließend bei rund 79 %. Hintergrund hierfür ist, dass zu diesem Zeitpunkt anscheinend eine Änderung der Regelung erfolgte, in dessen Folge der Kessel nicht mehr zur Raumheizung und nur noch zur Trinkwassererwärmung verwendet wurde, während zuvor meist der Betriebsmodus Raumheizung dominierte. Somit liegt der Nutzungsgrad zur Raumheizung mit einer mittleren Betriebstemperatur von 50°C in der Größenordnung von 94 % und zur Trinkwassererwärmung mit einer mittleren Betriebstemperatur von 60°C bei rund 79 %. Die Skalierung der Achsen zeigt, dass die Wärmepumpe aus ökologischen Gesichtspunkten an allen Tagen in der Auswertungsperiode vorteilhaft ist. Hinsichtlich der Betriebskosten ist der Betrieb der Wärmepumpe nur im Betriebsmodus Raumheizung bei der niedriger eingestellten Heizkurve (Vorlauftemperatur < 40°C) bei Außenlufttemperaturen über 2°C im Vorteil.

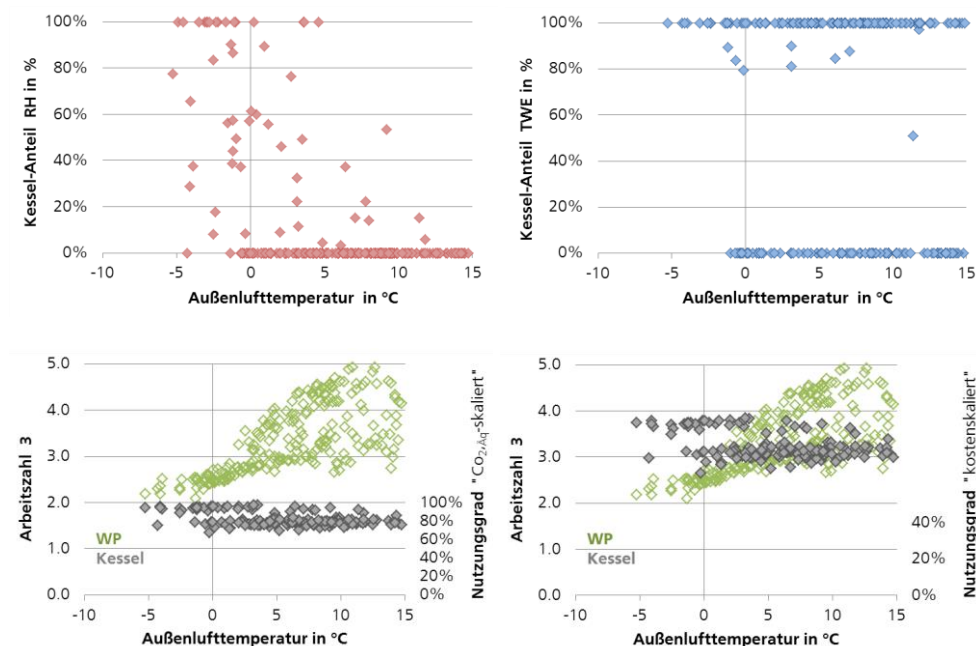


Abbildung 59: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 371 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2018/2019, sowie Arbeitszahl und brennwertbezogener Nutzungsgrad von Wärmepumpe bzw. Kessel (y-Achsen skaliert nach dem Verhältnis der Kosten der Energieträger bzw. dem CO₂-A_q)

ID 356

Der Öl-Tieftemperaturkessel ist als Beimischschaltung in den Vorlauf der Außenluft-Wärmepumpe eingebunden. Die Anlage zeigt eine alternative Betriebsweise: es ist entweder der Kessel oder die Wärmepumpe in Betrieb. Die Regelungsparameter für das Abschaltkriterium der Wärmepumpe wurden Ende Dezember 2018 geändert (vgl. Abbildung 60). Bis Ende Dezember 2019 wurde die Wärmepumpe – entweder abhängig von der Außenlufttemperatur oder einem variablen, von den Betriebsbedingungen abhängigen Abschaltpunkt – bei Außenlufttemperaturen unter + 5°C ... + 10°C nicht in Betrieb genommen. Anschließend lag der Abschaltpunkt im Bereich von – 3°C bis + 2°C. Die Abschaltkriterien betreffen die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung in gleichem Maße. Über das Jahr betrachtet liegt der Deckungsbeitrag des Kessels bei 27 % (Raumheizung) bzw. 19 % (Trinkwassererwärmung).

Der Nutzungsgrad des Kessels zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der täglichen Betriebszeit (vgl. Abbildung 60). Bei einer täglichen Betriebszeit über 10 Stunden liegt der brennwertbezogene Nutzungsgrad im Bereich von 71 % bis 79 %; bei 5 Stunden zwischen 60 % und 72 %. An Tagen mit nur einer Stunde Laufzeit werden oft nur Nutzungsgrade von 33 % erreicht. Die mittlere Betriebstemperatur des Kessels beträgt 54°C (Raumheizung) bzw. 56°C (Trinkwassererwärmung). Aus ökologischen Gesichtspunkten ist die Außenluft-Wärmepumpe an allen Tagen günstiger als der Kessel. Die Betriebstemperaturen der Wärmepumpe lagen im Jahresmittel bei 43°C (Raumheizung) bzw. bei 41°C (Trinkwassererwärmung). Der geringe Nutzungsgrad des Kessels bei wenigen Betriebsstunden pro Tag hat zur Folge, dass der Kesselbetrieb außerhalb der Kernheizperiode auch bezüglich der Betriebskosten die schlechtere Wahl als der Wärmepumpenbetrieb darstellt. Insbesondere die Betriebsstrategie, die einen hohen Bivalenzpunkt zur Folge hat, ist hier nicht geeignet. Aber auch bei Wahl eines geringen Bivalenzpunktes bietet der Kessel nur bei einer hohen Auslastung einen ökonomisch günstigeren Betrieb als die Wärmepumpe.

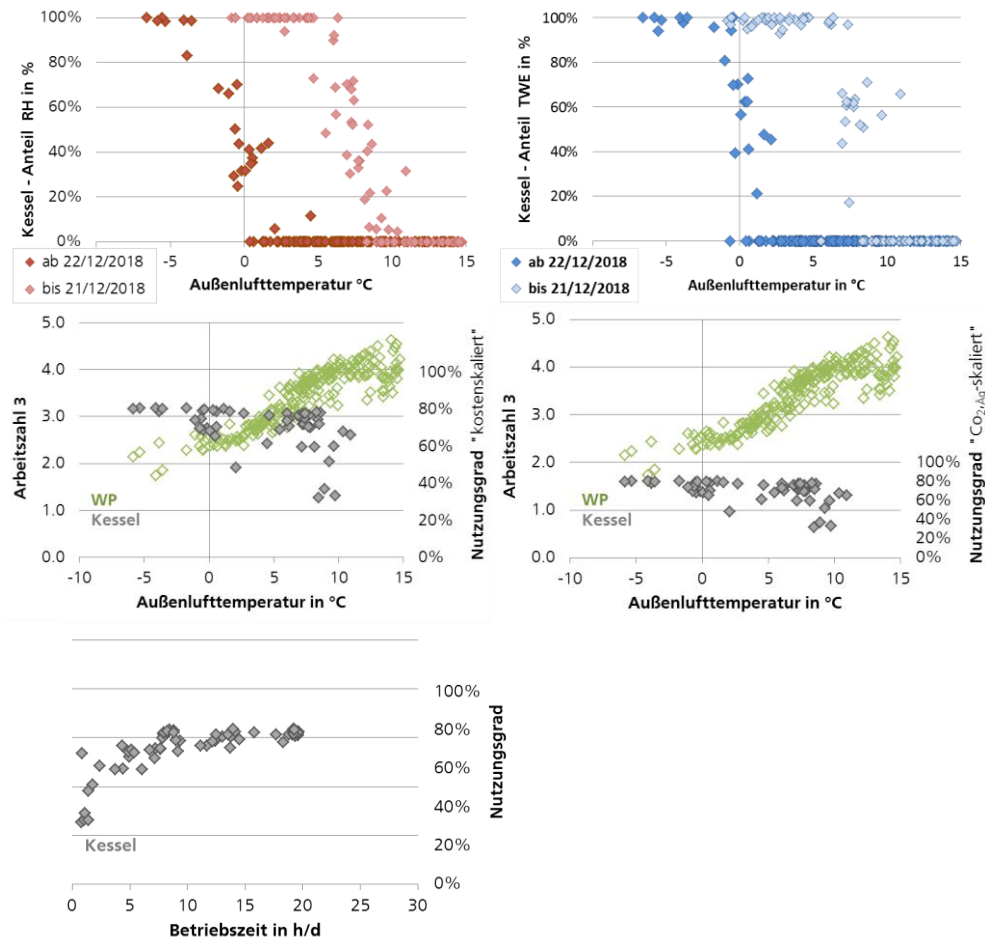


Abbildung 60: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 356 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2018/2019, sowie Arbeitszahl und brennwertbezogener Nutzungsgrad von Wärmepumpe bzw. Kessel (y-Achsen skaliert nach dem Verhältnis der Kosten der Energieträger bzw. dem $\text{CO}_2\text{-Äq}$)

ID 374¹

Der Gas-Brennwertkessel (BJ 2016) ist parallel zur Wärmepumpe in den Ladekreis des Trinkwasserspeichers und in den Heizkreis eingebunden. Der wärmeerzeugerseitige Teil des Heizkreises ist mit einer hydraulischen Weiche von dem gebäudeseitigen Teil getrennt.

Auf Jahresbilanz beläuft sich der Deckungsbeitrag des Kessels auf 23 % (Raumheizung) bzw. 43 % (Trinkwassererwärmung). Der tägliche Deckungsbeitrag des Kessels variiert in beiden Betriebsmodi (nahezu) unabhängig von der Außenlufttemperatur jeweils in einem größerem Ausmaß, i.d.R. zwischen 0 % bis 40 % (Raumheizung) bzw. 20 % und 60 % (Trinkwassererwärmung). Kessel und Wärmepumpen sind hierbei nie zeitgleich, sondern zu unterschiedlichen Zeiten am Tag in Betrieb. Vereinzelt treten auch höhere Deckungsraten auf (vgl. Abbildung 61).

¹ Der Gasverbrauch konnte bei dieser Anlage nicht fehlerfrei erfasst werden, daher entfällt die Ermittlung eines Nutzungsgrades.

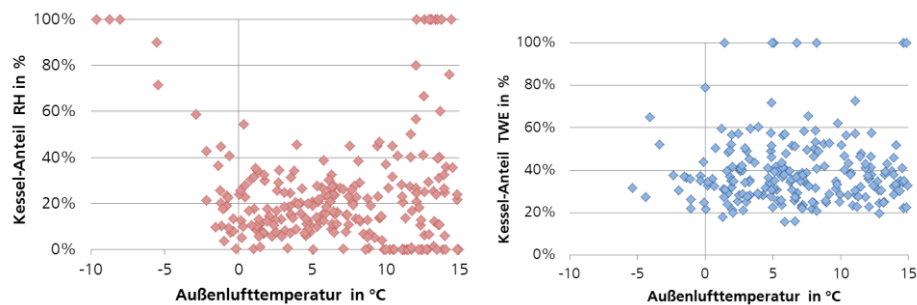


Abbildung 61: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 374 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2017/2018

ID 352

Der Öl-Tieftemperaturkessel ist über eine Beimischschaltung in den Vorlauf der Außenluft-Wärmepumpe eingebunden. Sowohl zur Trinkwassererwärmung als auch zur Raumheizung ist meist nur einer der beiden Wärmeerzeuger in Betrieb. Teilweise werden sie auch zeitgleich als Reihenschaltung betrieben. In beiden Betriebsmodi zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und dem Deckungsanteil des Kessels, jedoch auch eine hohe Streuung (vgl. Abbildung 62). So liegt bei einer mittleren Außenlufttemperatur von + 5°C der Deckungsbeitrag des Kessels zur Raumheizung zwischen 0% und 40%, zur Trinkwassererwärmung zwischen 60 % und 100 %. Bei Außenlufttemperaturen unterhalb von 0°C beträgt der Deckungsgrad des Kessels in beiden Betriebsmodi meist 100 %. Das Anlagenverhalten deutet darauf hin, dass ein variabler Bivalenzpunkt auf Basis ökonomischer Gesichtspunkte (Verhältnis der momentanen Effizienz der beiden Wärmeerzeuger im Kontext des Verhältnisses der Preise der Energieträger Öl und elektrischer Energie) in der Regelung eingestellt sein könnte. Die gewählte Betriebsweise resultiert in einem Jahres-Deckungsanteil des Kessels von 38 % bzw. 45 % zur Raumheizung bzw. Trinkwassererwärmung.

Aus ökologischen Gesichtspunkten ist der Betrieb der Wärmepumpe – auf Tagesebene betrachtet - vorteilhafter als der Betrieb des Kessels. Die Betriebstemperaturen der Wärmepumpe lagen im Jahresmittel bei 38°C (Raumheizung) bzw. bei 61°C (Trinkwassererwärmung). Der brennwertbezogene Nutzungsgrad des Kessels zeigt eine klare Abhängigkeit von der Betriebszeit. Während bei einer täglichen Betriebszeit von 10 Stunden der Nutzungsgrad rund 82 % beträgt, so liegt der Wert bei 5 Stunden zwischen 68 % und 82 % und bei einer Stunde zwischen 30 % und 50 %. Auf die gesamte Auswertungsperiode bezogen ergibt sich ein Jahresnutzungsgrad von 75 % bei mittleren Betriebstemperaturen von 52°C (Raumheizung) bzw. 61°C (Trinkwassererwärmung). Der Kesselbetrieb ist bei Außenlufttemperaturen unter + 2°C – mit der angesetzten Kostenstruktur – günstiger als der Betrieb der Wärmepumpe. Bei Außenlufttemperaturen über + 8°C ist der Wärmepumpenbetrieb preisgünstiger. Im Bereich dazwischen, ist es von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängig.

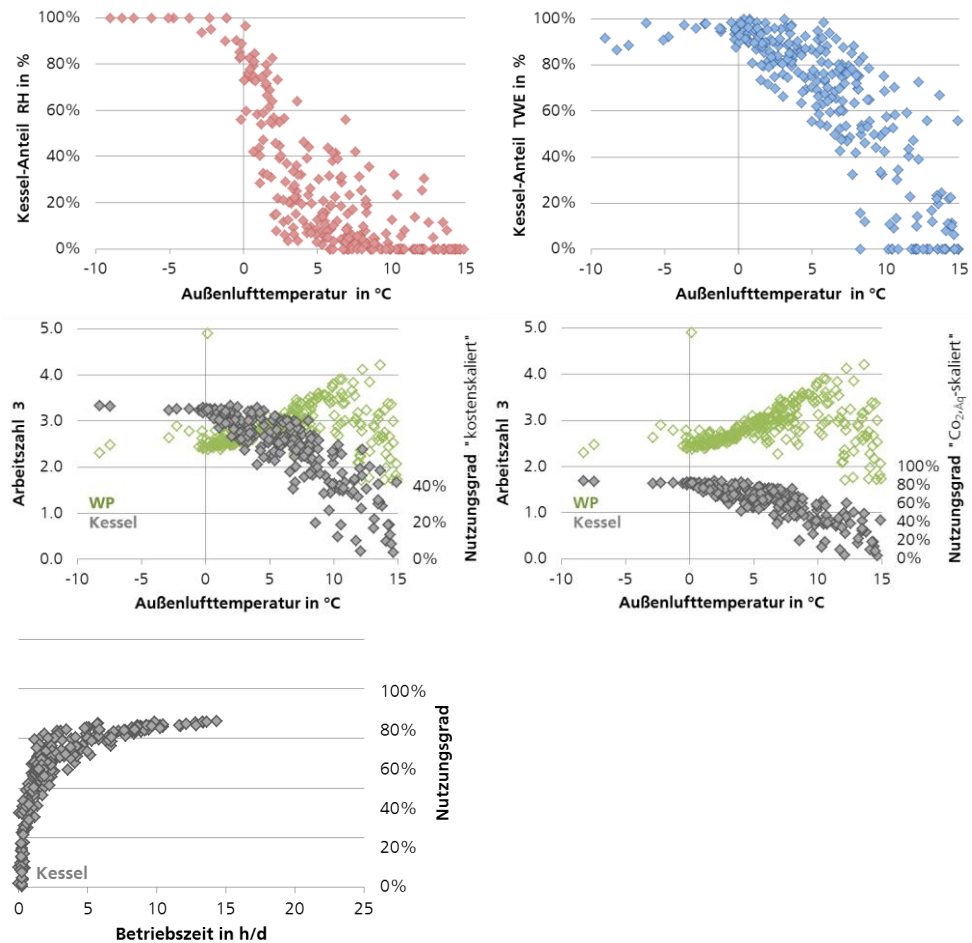


Abbildung 62: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 352 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2018/2019, sowie Arbeitszahl und brennwertbezogener Nutzungsgrad von Wärmepumpe bzw. Kessel (y-Achsen skaliert nach dem Verhältnis der Kosten der Energieträger bzw. dem $\text{CO}_2\text{-Äq.}$)

ID 358

Der bodenstehende Öl-Brennwertkessel (BJ 2013) ist über eine Beimischschaltung in den Vorlauf der Außenluft-Wärmepumpe eingebunden. Der Kessel wurde in der Auswertungsperiode nur im Raumheiz-Modus eingesetzt. Die Trinkwassererwärmung wurde ausschließlich von der Brauchwasser-Wärmepumpe übernommen. Im Betriebsmodus Raumheizung ist entweder die Wärmepumpe oder der Kessel in Betrieb. Die Anlage wird demnach alternativ-bivalent betrieben. Unter einer Außenlufttemperatur (Tagesmittel) von 0°C ist (mit wenigen Ausnahmen) nur der Kessel in Betrieb, bei Temperaturen (Tagesmittel) über 7°C ist (mit mehreren Ausnahmen) überwiegend nur die Wärmepumpe in Betrieb. Damit wird ein Deckungsbeitrag des Kessels von 52 % erreicht.

Während die Wärmepumpe mit einer mittleren Betriebstemperatur von 37°C arbeitet, liegt die mittlere Betriebstemperatur des Kessels bei 53°C . Die deutlich höhere Betriebstemperatur des Kessels ergibt sich aus der hohen Vorlauftemperatur. Diese ist außenlufttemperaturunabhängig auf rund 70°C bzw. in einer anderen Periode im Jahr auf rund 80°C eingestellt. Der brennwertbezogene Nutzungsgrad des Kessels liegt an Tagen mit hohen Betriebszeiten im Bereich von 89 %. Bei einer täglichen Betriebszeit im Bereich von 4 Stunden sinkt der Nutzungsgrad auf Werte zwischen 50% und 70%. Aus ökologischer Sicht ist auch bei dieser Anlage der Betrieb der Wärmepumpe an jedem Tag des Jahres günstiger als der Betrieb des Kessels. Demgegenüber ist der Kes-

selbetrieb bei Außenlufttemperaturen unter + 2°C – bei der betrachteten Kostenstruktur - kostengünstiger als der Wärmepumpenbetriebe. Ab einer Außenlufttemperatur von + 8°C kehrt es sich ins Gegenteil. Im Temperaturbereich dazwischen hängt es von den jeweiligen Betriebsbedingungen des Tages ab.

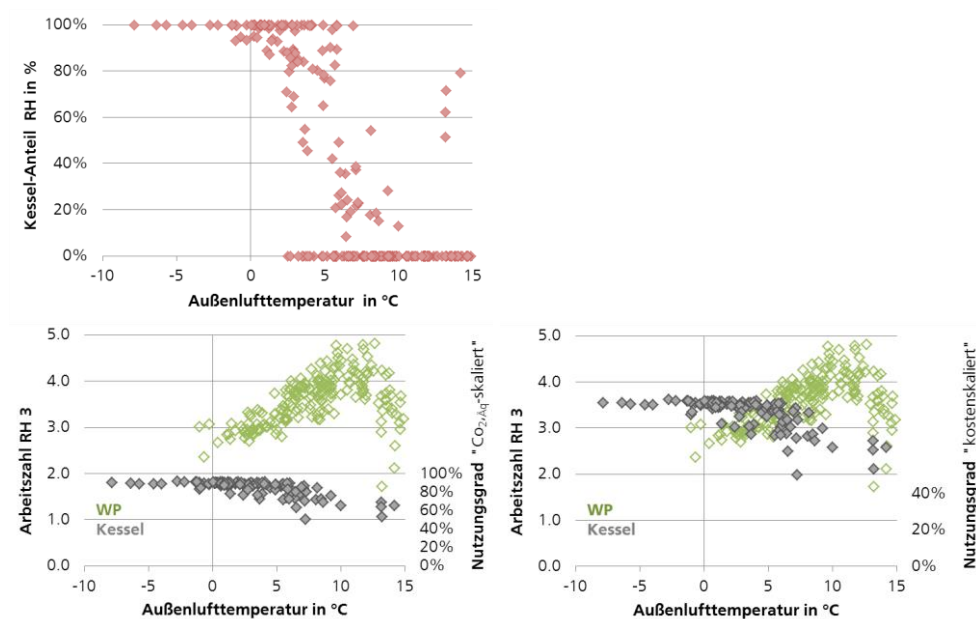


Abbildung 63: Täglicher Deckungsanteil des Kessels in ID 358 für Raumheizung und Trinkwassererwärmung während der Auswertungsperiode 2018/2019, sowie Arbeitszahl und brennwertbezogener Nutzungsgrad von Wärmepumpe bzw. Kessel (y-Achsen skaliert nach dem Verhältnis der Kosten der Energieträger bzw. dem CO₂-Äq)

5.5 Bewertung der CO₂-Äq-Emissionen

Die ökologische Bewertung bezieht sich auf einen Vergleich der durch die untersuchten Wärmepumpen verursachten Emissionen an CO₂-Äquivalenten mit denen eines Gas-Brennwertkessels. Neben dem Gas- zählt der Öl-Brennwertkessel als dominierender Wärmeerzeuger im hier adressierten Anwendungsbereich. Die Nutzung von Heizöl verursacht noch höhere Emissionswerte an CO₂-Äquivalente als die Nutzung von Erdgas, weswegen an dieser Stelle auf einen Vergleich zwischen den hier untersuchten Wärmepumpen und einem fiktiven Ölkessel verzichtet wird.

Bei der hier vorgenommenen ökologischen Bewertung des Wärmepumpenbetriebs wird ein bilanzieller Ansatz auf Jahresbasis verwendet. Im Zuge dessen werden sowohl für die Wärmepumpeneffizienz als auch für die CO₂-Äq-Faktoren der Elektroenergie mittlere Jahreswerte zu Grunde gelegt. Alternativ kann zeitabhängig die variable Wärmepumpeneffizienz und die wechselnden Kraftwerksarten mit ihren individuellen CO₂-Äq-Faktoren berücksichtigt werden. Diesen Zusammenhängen wird sich das Fraunhofer ISE im Rahmen den Forschungsprojektes „WP-QS im Bestand“ widmen.

Die ökologische Bewertung umfasst für die Endenergieträger Strom und Gas die Aufwände für die Gewinnung der Primärenergieträger, die Umwandlung (Strom) und den Transport bis zu den Gebäuden. Die Aufwände für Erstellung und Recycling der Wärmeerzeuger (inkl. Kältemittel) sowie den weiteren Komponenten eines Heizsystems werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. In (Miara et al. 2013) wird bspw. der Einfluss des Kältemittels durch Leckage und Recycling an den Gesamtemissionen mit 2 % (Kältemittel R32 in einer Erdschicht-Wärmepumpe) bis 7 % (Kältemittel R410A in einer Außenluft-Wärmepumpe) angegeben. Im Zuge des durch die F-Gas-Verordnung

forcierten Trends hin zu Low-GWP Kältemitteln ist mit einer Abnahme der Anteile direkter Emissionen durch Kältemittel zu rechnen.

Da ein Großteil der untersuchten Wärmepumpen unter Annahme einer Nutzungsdauer von 20 Jahren (Quelle VDI 2067) auch noch im Jahr 2030 betrieben werden, wird in der Bewertung außerdem die Entwicklung im Stromsektor (u.a. weiterer Zubau von Windkraft- und Photovoltaik-Kapazitäten) sowie im Gassektor (Zubau von Power-to-Gas Technologien) berücksichtigt.

Die ökologische Bewertung bezieht sich auf die Wärmeerzeuger, nicht auf die Gesamtsysteme inkl. Wärmespeicherung und -verteilung. Für die Wärmepumpen werden die in Kapitel 5.2 vorgestellten JAZ mit der Bilanzgrenze 3, für die Gas-Kessel ein Jahresnutzungsgrad aus der Literatur angesetzt. Nach (Jagnow and Wolff 2004) wurden im Rahmen einer Feldmessung von 60 Brennwert-Gaskesseln mittlere Jahresnutzungsgrade von 86,6 %, bezogen auf den oberen Heizwert (Brennwert), bzw. 96,4 %, bezogen auf den unteren Heizwert, ermittelt¹.

Im Sinne der vergleichenden Betrachtung wird eine Vereinfachung vorgenommen. Während beide Wärmeerzeuger in der Regel mit einem Trinkwasserspeicher ausgestattet sind, verfügen Wärmepumpen, insbesondere im Altbaubereich bzw. bei Nutzung der Wärmequelle Außenluft, auch über einen Pufferspeicher für die Raumheizung. In den konkreten, nachfolgend berücksichtigten Fällen, sind 21 von 29 Außenluft-Wärmepumpen (mittleres Volumen: 249 l) und neun von 12 Erdreich-Wärmepumpen (mittleres Volumen: 247 l) mit einem Pufferspeicher ausgestattet. Auf dessen Einfluss bei der vergleichenden ökologischen Bewertung wird mit folgendem Ansatz eingegangen. Gemäß Formel (13) wird in Anlehnung an (DIN 4701-10) und unter Berücksichtigung der konkreten Messobjekte bzw. Messgrößen ein mittlerer Speicherverlust am Tag von 2,66 kWh/(m²*a) ermittelt. Unter Berücksichtigung der von den Wärmepumpen bereitgestellten mittleren Wärmemenge zur Raumheizung in Höhe von 11.900 kWh/a und einer mittleren beheizten Wohnfläche von 183 m² beträgt der mittlere Wärmeverlust des Pufferspeichers 4,1 %.

$$Q_{\text{Speicherverlust}} = 1,2 * \frac{T_{RH,m} - T_{Umg,m}}{45} f_a * f_{HP} * q_{B,S} \quad (13)$$

$T_{RH,m}$	Mittlere Temperatur zur Raumheizung (Mittelwert aus Messung: 37,2°C)
$T_{Umg,m}$	Mittlere Temperatur am Aufstellort des Speichers (Annahme: 13°C)
f_a	Wärmeverlustfaktor (da außerhalb thermischer Hülle: 1)
t_{HP}	Dauer der Heizperiode (Mittelwert auf Basis der Messung: 272 Tage)
$q_{B,S}$	Bereitschaftswärmeverlust nach $0,5 + 0,25 V^{0,4}$ (mit mittleren Speichervolumen von 248 l: 2,77 kWh/d)

¹ Da sich die zugrundeliegenden Emissionsfaktoren auf den unteren Heizwert beziehen, wird an dieser Stelle ein Jahresnutzungsgrad von 96,4 % angesetzt.

Die Ergebnisse zur vergleichenden ökologischen Betrachtung werden in der Abbildung 64 dargestellt. Im oberen Bereich der Grafik werden die JAZ aller Wärmepumpen, die über beide Betriebsmodi und für den Auswertungszeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 berücksichtigt werden konnten, dargestellt. Die Ausreißer sind als Kreise dargestellt und sind nicht im Wert der mittleren JAZ enthalten. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5.2 können die JAZ von 29 Außenluft-Wärmepumpen und 12 Erdreich-Wärmepumpen berücksichtigt werden. Im unteren Bereich der Grafik ist die Einsparung (bzw. der Mehrverbrauch) an $\text{CO}_2\text{-Äq}$ -Emissionen einer Wärmepumpenanlage gegenüber einem Gas-Brennwertkessel über der JAZ dargestellt. Die Darstellung zeigt die Bewertung für das Jahr 2018 sowie für das Jahr 2030 bei einem konservativen und bei einem optimistischen Szenario. Für die vermessenen Anlagen lässt sich durch Fällung eines Lotes von der jeweiligen JAZ im oberen Bereich der Grafik auf den unteren Bereich der Grafik am Schnittpunkt mit einer der drei Kurven die jeweilige Einsparung an $\text{CO}_2\text{-Äq}$ -Emissionen ablesen. Stellvertretend sind in der Grafik die Einsparungen bei Zugrundelegung der geringsten JAZ einer Außenluft-Wärmepumpe und der höchsten JAZ einer Erdreich-Wärmepumpe dargestellt.

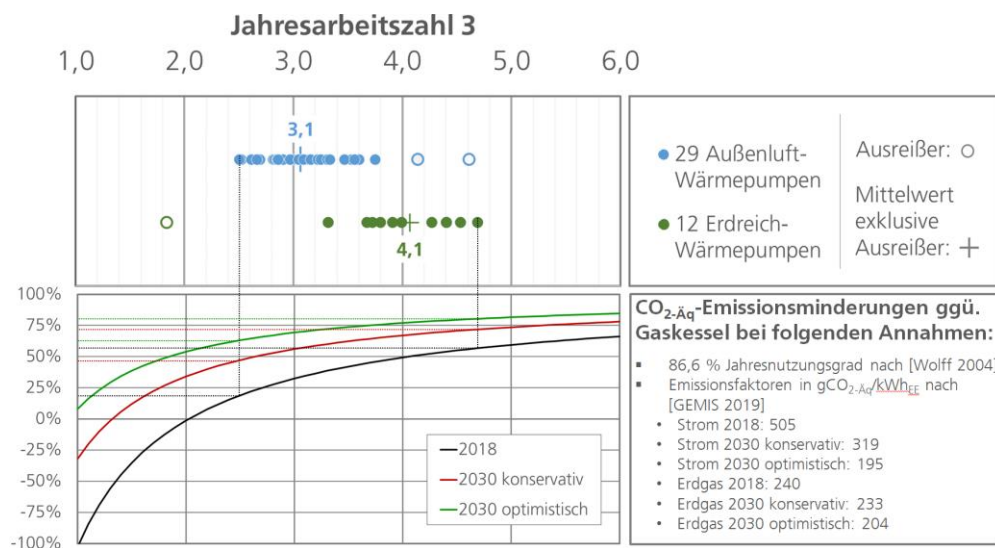


Abbildung 64: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Effizienzwerten der Wärmeerzeuger Wärmepumpe und Gas-Kessel auf die $\text{CO}_2\text{-Äq}$ -Emissionen mit den Beispielen geringste (Außenluft-Wärmepumpe) und höchste (Erdreich-Wärmepumpe) Jahresarbeitszahl

Bezogen auf die Emissionsfaktoren für Strom und Gas im Jahr 2018 liegen die Einsparungen der untersuchten Außenluft-Wärmepumpen zwischen 19 % und 47 %; der Mittelwert liegt bei 35 %. Entsprechend der höheren JAZ reichen die Einsparungen der Erdreich-Wärmepumpen von 39 % bis 57 %, bei einem Mittelwert von 51 %.

Anhand der beiden Projektionen der Emissionsfaktoren für Strom und Gas für das 2030 lässt sich vor allem der positive Beitrag der zunehmenden Durchdringung von regenerativer Erzeugung im Stromsektor nachvollziehen. Bei einer konservativen (bzw. optimistischen) Prognose beider Emissionsfaktoren würden sich die Einsparungen bei Außenluft-Wärmepumpen zwischen 47 % und 65 % (bzw. 63 % und 76 %) und bei den Erdreich-Wärmepumpen zwischen 60 % und 72 % (bzw. 72 % bis 80 %) bewegen.

Die Grafik verdeutlicht neben den deutlichen Einspareffekten durch den Einsatz der Wärmepumpen, dass mit höheren JAZ bei Änderung der JAZ um den gleichen fixen Wert die zusätzlichen prozentualen Einsparungen abnehmen. Zudem wird deutlich, dass bei einer Verbesserung der $\text{CO}_2\text{-Äq}$ -Faktoren für die Elektroenergie die damit ein-

hergehende prozentuale Erhöhung der Emissionseinsparungen stärker im Bereich niedriger JAZ als im Bereich höherer JAZ zum Tragen kommt.

Unter Berücksichtigung der vorab erwähnten Speicherverluste zur Raumheizung von 4,1 % – in Form einer mittelwertbasierten Korrektur der JAZ – würden die Einsparungen bei den Außenluft-Wärmepumpen zwischen 16 % und 45 % (Mittelwert 32 %) und jene der Erdreich-Wärmepumpen zwischen 36 % und 55 % (Mittelwert 49 %) liegen. Der Einfluss des zusätzlichen Pufferspeichers zur Raumheizung für Wärmepumpen ist bei der vergleichenden ökologischen Bewertung damit relativ gering.

Wie im Kapitel 5.3 beschrieben, lassen sich bei den untersuchten Messobjekten zwischen Baualter bzw. Baualtersperiode der Gebäude und JAZ keine Abhängigkeiten feststellen. Hierfür streut die Haupteinflussgröße auf die Wärmepumpeneffizienz, die erforderliche Heizkreistemperatur, zu sehr ohne Korrelation zum Baualter der Gebäude. Entsprechend zeigt sich auch keine Korrelation von Gebäudealter und Vermeidung von $\text{CO}_{2,\text{Äq}}$ -Emissionen. Es besteht jedoch ein Zusammenhang zur mittleren Heizkreistemperatur, die im Wesentlichen vom spezifischen Heizwärmeverbrauch und den eingesetzten Wärmeübergabesystemen abhängt. Dieser Zusammenhang wird in der Abbildung 65 dargestellt.

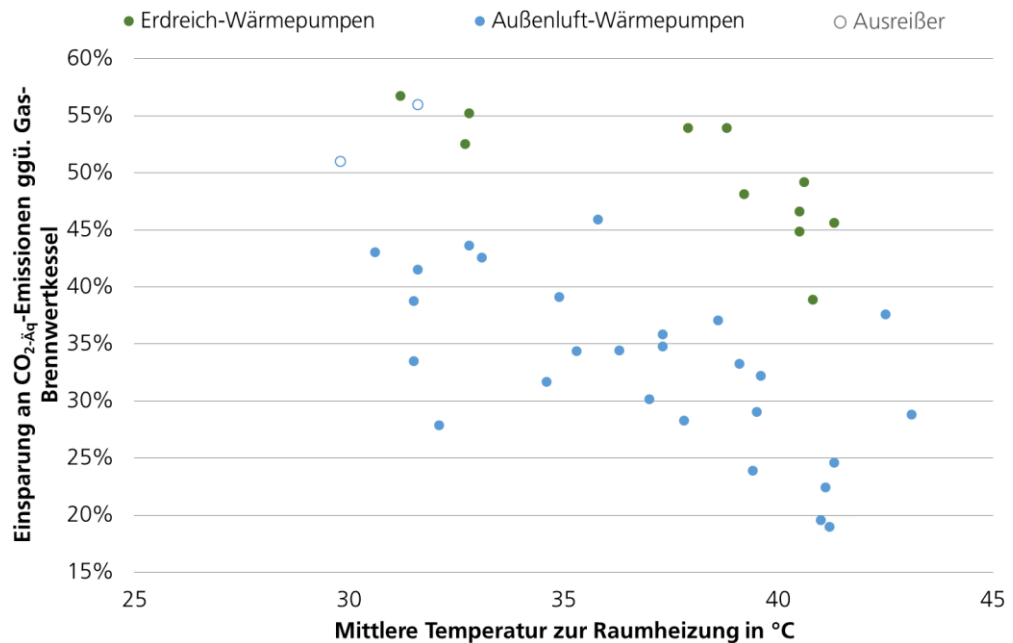


Abbildung 65: $\text{CO}_{2,\text{Äq}}$ -Emissionen von 29 Außenluft-Wärmepumpen und 12 Erdreich-Wärmepumpen im Vergleich zu einem Gas-Brennwertkessel in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur zur Raumheizung bezogen auf das Jahr 2018

Die Einsparungen bei den Außenluft-Wärmepumpen (Erdreich-Wärmepumpen) reichen, von einem Ausreißer bei den Erdreich-Wärmepumpen abgesehen, – unter Berücksichtigung der $\text{CO}_{2,\text{Äq}}$ -Faktoren vom Jahr 2018 – von 19 % bis 56 % (von 39 % bis 57 %). Trotz großer Streuung lässt sich der Trend zu größeren Emissionseinsparungen mit geringerer Temperatur zur Raumheizung gut erkennen. So betragen die Emissionseinsparungen bei den Wärmepumpenanlagen, die mit mittleren Heizkreistemperatu-

ren¹ unter 35°C betrieben werden, mehr als 28 % (Außenluft-Wärmepumpen) bzw. 53 % (Erdreich-Wärmepumpen). Für eine übersichtlichere Darstellung wurde die Erdreich-Wärmepumpe mit der sehr geringen JAZ von 1,8 nicht berücksichtigt. Diese Anlage liegt mit einer JAZ von 1,8 bei mittleren Temperaturen zur Raumheizung von 53,3°C bezüglich der CO₂-Einsparungen im negativen Bereich und würde 10,5 % mehr Emissionen, verglichen mit dem hier angenommen Gas-Brennwertkessel, verursachen.

¹ Energetisch gewichteter Mittelwert aus Vorlauf und Rücklauf der Wärmepumpe im Raumheizmodus

Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen

Dieser Abschnitt widmet sich der Forschungsfrage: Welche Flexibilität Wärmepumpen dem Gesamtstromversorgungssystem bieten können? Hierzu wird zunächst die Frage von Wärmepumpen im Smart Grid gefolgt von der Frage nach dem richtigen Geschäftsmodell für Wärmepumpen diskutiert. Dies bildet die Grundlage für die Simulation eines mit SG-Ready Signalen gesteuerten WP-Pools und die Betrachtung im abschließenden Feldtest.

6.1 Wärmepumpen im Smart Grid

In den letzten Jahren hat sich im Bereich des Stromsystems die Vision eines Intelligen-
ten Netzes „Smart Grid“ verbreitet. Diese wurde getrieben durch den Zubau von de-
zentralen erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen und der Möglichkeiten der Integrati-
on und Steuerbarkeit von Erzeugern und Verbrauchern durch Fortschritte im Bereich
der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT).

Durch die Verbreitung kostengünstiger Kommunikationstechnologie ist es möglich, auch Geräte mit geringer Anschlussleistung einzubinden und anzusteuern (vgl. Abbildung 66). Besonders Geräte mit hohem Automatisierungsgrad, zeitlichen Freiheitsgraden im Betrieb und einem vergleichsweise hohen Anteil am Jahresstromverbrauch sind für eine Smart Grid Einbindung im Haushaltsbereich attraktiv. In diese Gruppe fallen Wärmepumpensysteme. Eine erfolgreiche Integration der Wärmepumpe in ein Smart Grid hängt unter anderem maßgeblich vom technischen Verständnis der Systeme ab.

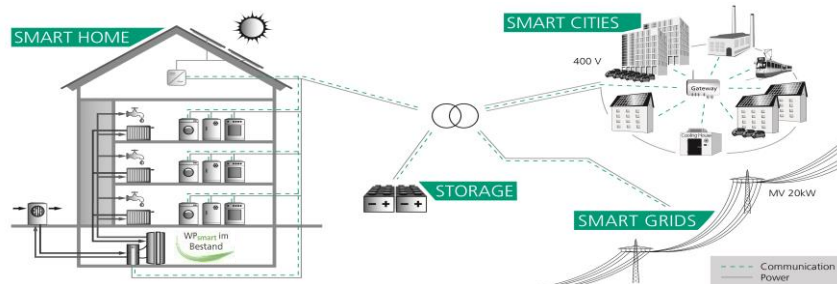


Abbildung 66: Schematische Darstellung der Smart Grid Vision

Wärmepumpensysteme im deutschen Wohnsektor bestehen in den meisten Fällen aus drei Hauptbestandteilen:

- Wärmeerzeugung,
- Wärmespeicherung,
- Wärmeverteilung bzw. Wärmenutzung.

In Abbildung 67 ist ein exemplarisches Wärmeversorgungssystem mit Wärmepumpe für ein deutsches Wohnhaus abgebildet. Die Wärmeerzeugung erfolgt über eine Luft-Wasser Wärmepumpe und kann durch eine Zusatzheizung (hier Heizstab) unterstützt werden. Die Wärmepumpe wird sowohl für die Erzeugung von Warmwasser als auch für Heizwärme genutzt.

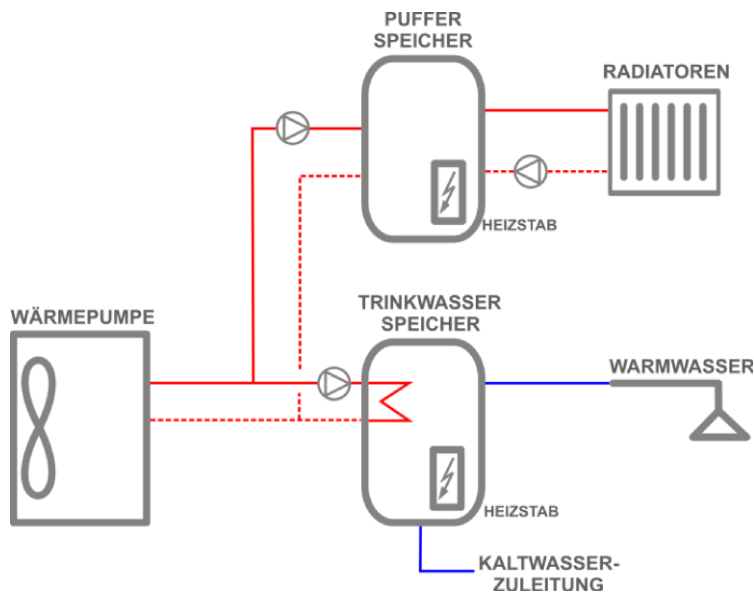


Abbildung 67: Wärmepumpensystem mit Heizungs- und Warmwasserspeichern

Die mögliche Flexibilität von Wärmepumpensystemen wird im Wesentlichen von 4 Parametern bestimmt, welche in Abbildung 68 dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden.

WP Leistung	•Bestimmt wieviel Leistung zu bzw. abgeschaltet werden kann (Abhängig von momentaner thermischer Nachfrage)
Speicherkapazität	•Bestimmt wie lange zu und abgeschaltet werden kann (Abhängig von Füllstand)
Thermische Nachfrage	•Bestimmt welche Energiemenge zur Lastverschiebung über Zeitraum zur Verfügung steht •Bestimmt Erholungszeiten bis zu einem erneut möglichen Schalten (Befüllung/Leerung des Speichers)
Dynamische Eigenschaften des Systems	•Bestimmt Min. Laufzeit in einem Betriebspunkt •Maximale Anzahl erlaubter Lastwechsel •Erlaubte Lastgradienten

Abbildung 68: Wichtige Einflussfaktoren und Wechselwirkungen für den flexiblen Betrieb einer Wärmepumpe.

Grundsätzlich kann nur diejenige thermische Energiemenge flexibel erzeugt werden, die auch vom Gebäude benötigt wird. Der Energiebedarf zur Raumheizung und / oder Trinkwarmwasserbereitung sind bestimmende Größen für die Einsatzzeiten und damit das Lastprofil einer Wärmepumpe. Der tägliche Trinkwarmwasserbedarf ist über das Jahr gesehen relativ konstant und folgt meist nutzertypischen Zapfprofilen. Die Heizlast des Gebäudes orientiert sich (vereinfacht) an den Witterungsbedingungen, wodurch sich saisonal starke Lastunterschiede ergeben. Aus der tageszeitlich und saisonal schwankenden thermischen Nachfrage resultiert, dass auch die Möglichkeit eines flexiblen Einsatzes von Wärmepumpen einer tageszeitlichen und vor allem saisonalen Charakteristik unterliegt.

Abbildung 69 zeigt exemplarisch die Reduktion des Flexibilitätspotentials unter Berücksichtigung wichtigsten System Parameter. Das Verhältnis von Wärmepumpenleistung zu thermischer Last bestimmt, ob es zu einem Zeitpunkt möglich ist, den Speicher zu befüllen (ggf. zusätzlich begrenzt durch den derzeitigen Speicherladezustand). Reicht die Wärmepumpenleistung gerade aus, um die thermische Last zu decken, so gibt es keinen Spielraum den Speicher zu befüllen. Ein Ausschalten der Wärmepumpe könnte - wenn gewünscht - bei ausreichendem Speicherfüllstand erfolgen. Das Verhältnis von thermischer Last zur verfügbaren Speicherkapazität beeinflusst, wie lange die Wärmepumpe ausgeschaltet bzw. unter Berücksichtigung der WP Leistung bei Speicherbeladung eingeschaltet werden kann.

Der Einfluss der Speichergröße auf die Flexibilität muss im Kontext der Flexibilitätsanforderung und dem Verhältnis von Wärmepumpenleistung zur Nachfrage gesehen werden. Speichergröße meint hier die direkt im System integrierten Speicher. Die thermische Gebäudemasse wird ausgeblendet, um die Systeme besser vergleichen zu können. Bei wenigen dafür jedoch langen Abrufen der Wärmepumpe bei geringer thermischer Nachfrage wird ein großer thermischer Speicher benötigt, um große Mengen über große Zeiträume zu puffern. Hingegen bei hochfrequenten Abrufen, welche zu einer häufigen Be- und Entladung eines Speichers führen, kann bei identischer Speichergröße mehr Energie flexibel eingesetzt werden als im Fall von niederfrequenten Abrufen. Im Fall von hochfrequenten Abrufen ist es wichtig in kurzer Zeit viel Energie dem Speicher zuzuführen. Der Wärmepumpenleistung kommt in solchem Fall eine maßgebliche Bedeutung zu.

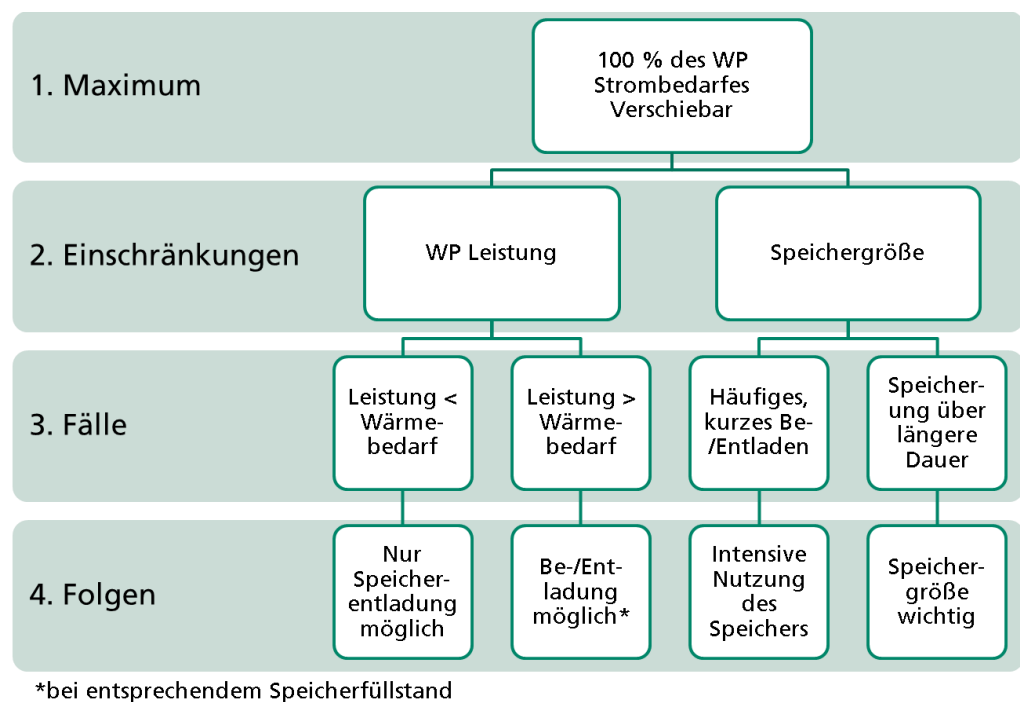


Abbildung 69: Wesentliche Parameter und Einschränkungen für die Flexibilität von Wärmepumpen.

Des Weiteren sind für die mögliche Flexibilität von Wärmepumpen der Wärmepumpen-Typ und die Betriebsweise zu beachten. Bei An/Aus-Wärmepumpen erfolgt die Anpassung der Leistung an den Energiebedarf durch Taktbetrieb. Eine modulierende Wärmepumpe kann durch eine Veränderung der Verdichterdrehzahl die Wärmeenergieerzeugung an den Bedarf anpassen. Hierbei ändert sich die elektrische Leistungsaufnahme. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um die Leistungsaufnahme (in den Grenzen des Wärmepumpenleistungsbereiches) an die Stromproduktion einer PV-Anlage anzupassen.

Weitere Einschränkungen der Flexibilität ergeben sich sicherlich durch die dynamischen Eigenschaften der Wärmepumpe. Einige Wärmepumpen benötigen eine Mindestlaufzeit zwischen 30 s und 3 Minuten in bestimmten Betriebspunkten zur Stabilisierung des Kältekreislaufes, bevor ein neuer Betriebspunkt angefahren werden kann. Dies reduziert die Möglichkeit für schnelle Lastwechsel.

Um die Lebensdauer der Wärmepumpe zu erhöhen, wird meist eine minimale Verdichterlaufzeit zwischen 6 und 20 Minuten festgelegt. Auch diese wirkt sich negativ auf die Flexibilität in kürzeren Zeitskalen aus. Der negative Einfluss von häufigen Schaltvorgängen auf die Lebensdauer ist ein weiterer wichtiger Faktor, welcher bei einem flexiblen Einsatz von Wärmepumpen beachtet werden muss.

Auch die Betriebsart der Wärmepumpe hat einen Einfluss auf die nutzbare Flexibilität. Wird eine Wärmepumpe monoenergetisch mit einem Heizstab betrieben, so kann bei Bedarf der Strombezug erhöht werden. Hiermit kann einerseits die Leistung und infolge der Effizienzreduzierung der Wärmebereitstellung, auch der elektrische Energiebezug erhöht werden. Die Kombination aus Wärmepumpe und Gaskessel erlaubt eine Wärmebereitstellung wahlweise unter Nutzung von Gas oder Strom als Energieträger. Es ergibt sich ein zusätzlicher Flexibilitätsfaktor durch die Möglichkeit die Wärmepumpe bei Bedarf über längere Zeiträume komplett abzuschalten.

6.2 Entwicklung von Geschäftsmodellen

Durch die kommunikative Anbindung von Wärmepumpen ist es möglich, diese aus der Ferne anzusteuern und so gezielt den zeitlichen Verlauf des Strombezugs zu beeinflussen. Es ergibt sich die Möglichkeit diese Flexibilität zu vermarkten. Es ist davon auszugehen, dass eine dritte Partei die Vermarktung der Flexibilität übernehmen wird – der Flexibilitätscontractor. Dieser kann sowohl beim EVU, Netzbetreiber oder Wärmepumpenhersteller integriert sein. Im Rahmen des Projekts wurden mit Hilfe von Workshops, Experteninterviews und einer Marktrecherche (Stand 2016) mögliche Geschäftsmodelle evaluiert und sowohl qualitativ als auch quantitativ abgeschätzt. Da Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, stark vom aktuellen Geschehen an den Strommärkten, sowie den regulatorischen Rahmenbedingungen abhängig sind, wurden die Ergebnisse schon während der Projektlaufzeit in [Fischer, 2016] veröffentlicht. Im folgenden Kapitel sind einige grundlegende Überlegungen und Erkenntnisse beschrieben, welche immer mit Hinblick auf den Durchführungszeitraum des Projekts, sowie nationalen Gegebenheiten in Deutschland zu sehen sind.

Für die Betrachtung der Wärmepumpe im Stromsystem müssen unterschiedliche Akteursgruppen berücksichtigt werden. Jede Akteursgruppe verfolgt eigene Ziele und besitzt Möglichkeiten mit den anderen Gruppen zu interagieren. Die für den betrachteten Fall wichtige Gruppen und deren Ziele sind:

- Bewohner:
Dieser möchte, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Wärme für Heizung und Trinkwassererwärmung zur Verfügung steht, um seine Komfortbedürfnisse zu decken, und dafür oft möglichst wenig bezahlen.
- Wärmepumpen Besitzer:
Dieser möchte, in den meisten Fällen eine hohe Rentabilität des Objekts. Dies bedeutet, dass die Kosten über die Lebenszeit möglichst gering sein sollten. (geringer Wärmegestehungspreis)
- Wärmepumpenhersteller:
Dieser möchte durch Anlagenverkauf und ggf. Serviceleistungen, bspw. Wartung der Anlage, Gewinn erzielen.
- Contractor und Energieversorgungsunternehmen:
Dieser möchte Produkte verkaufen. Hierunter fallen alle Dienstleistungen im Energiesektor an den Endkunden – Stromverkauf, Wärmeverkauf, Bereitstellung von Anschlussleistung und Flexibilität.
- Der Gesetzgeber schafft durch die Gestaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen die Grundlagen für mögliche Geschäftsmodelle.

Um die Flexibilität, welche durch die Integration von Wärmepumpen in Smart Grids geschaffen wird, nutzbar zu machen, müssen Win-Win Situationen zwischen den oben genannten Akteuren geschaffen werden.

Dabei kann der Wärmepumpenhersteller höhere Absätze erzielen, wenn er seine Anlagen für zukünftige Anforderungen, wie die Möglichkeit zur intelligenten Betriebsführung, vorbereitet. Da die Wärmepumpenhersteller sowohl über Anlagenwissen als auch Zugang zur Anlage verfügen, ist es denkbar, dass dieser die Anlagenflexibilität selbst vermarktet.

Der Bewohner wird sich nur für ein Geschäftsmodell interessieren, welches für ihn einen Mehrwert bringt, hauptsächlich in Form von Kosteneinsparungen, oder durch zusätzlichen Komfort (beispielsweise durch Contracting).

Der Flexibilitätscontractor kann nur durch die Schnittstellen, Systemeigenschaften und Regelmöglichkeiten der Wärmepumpe, welche vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden, in die Lage versetzt werden neue Geschäftsfelder zu erschließen.

6.2.1 Flexibilitätscontracting

Mit der aus der Ferne nutzbaren Flexibilität der Wärmepumpen entstehen Möglichkeiten für neue Contracting Modelle. Als neuer Akteur ist der Betriebsführungs- bzw. smarte Contractor denkbar, welcher die Anlage nicht besitzt, sie aber steuert und ihre Flexibilität vermarktet. Das hierdurch entstehende Contracting Modell unterscheidet sich vom klassischen Energieliefercontracting (Nutzenergie-Lieferung) insofern, als dass die Mehrwerte lediglich durch einen veränderten Betrieb entstehen. Die klassischen Contractingmodelle, Energiesparcontracting und Energieliefercontracting werden um das Flexibilitätscontracting erweitert.

Bei dem Energiesparcontracting (ESC) werden vom Contractor Einsparungsmaßnahmen vorgeschlagen und durchgeführt, dabei werden Mindesteinsparungen garantiert. Ein Teil der Einsparungen erhält der Contractor zur Refinanzierung der Maßnahmen. Beim Energieliefercontracting (ELC) stellt der Contractor eine Heizungsanlage zur Verfügung und rechnet zu vertraglich vereinbarten Konditionen die genutzte Wärmemenge mit dem Kunden ab. Es existieren auch Mischformen der beiden Contracting Varianten.

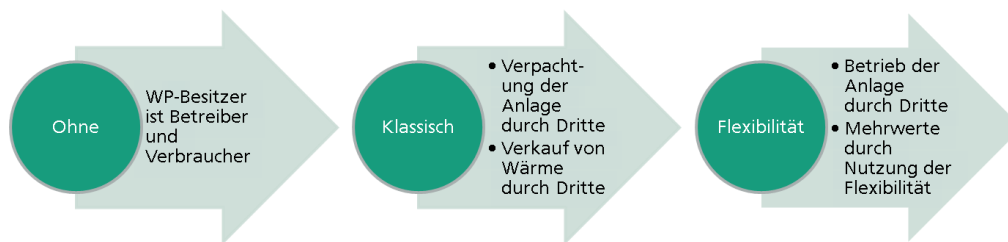


Abbildung 70: Beschreibung der Contracting Varianten

Das Flexibilitätscontracting legt den Fokus auf den Betrieb der Anlage und die Nutzung der Flexibilität. Es ist somit eine Weiterentwicklung des Energieliefercontractings, bei welchem durch Betriebsoptimierung Effizienzgewinne und somit monetäre Einsparungen erwirtschaftet werden. Im Zuge des Flexibilitätscontractings wird dieser Gedanke aufgegriffen und der Betrieb der Anlage dahingehend optimiert, um durch die Flexibilität Mehrwerte zu erwirtschaften. Abbildung 70 zeigt den Wandel der Contracting Varianten hin zum Flexibilitätscontracting.

6.2.2 Beziehungen der Akteure

Ein Weg, finanzielle Mehrwerte durch Flexibilität zu erwirtschaften, ist es diese dem Energiesystem Strom zur Verfügung zu stellen. Hierfür muss der Flexibilitätscontractor vertragliche Beziehungen zu den unterschiedlichen Akteuren im Stromsystem, dem Wärmepumpenbesitzer und ggf. dem Bewohner eingehen. Es ergeben sich neue Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Akteuren. Abbildung 71 zeigt die finanziellen Beziehungen sowie den Austausch von Leistungen.

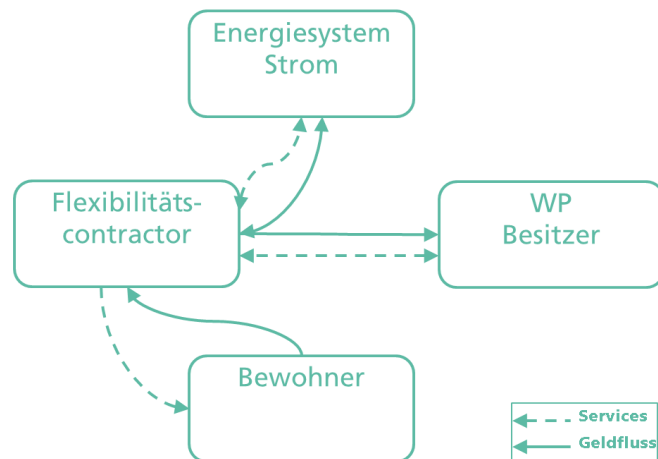


Abbildung 71: Services und Geldflüsse, zwischen Akteuren abhängig von der Vertragsbeziehung.

Die Organisation der Bereitstellung von Wärme in Gebäuden verändert sich durch Contracting. Ohne Contracting ist der Besitzer der Wärmepumpe deren Betreiber und im Falle eines Einfamilienhauses auch der Bewohner. In den neunziger Jahren entwickelte sich das Contracting. Beim klassischen Wärmecontracting (ELC) wird der Hausbesitzer Wärmekunde der Anlage, welche dem Contractor gehört (vgl. Abbildung 70). Beim Flexibilitätscontracting ist nicht festgelegt, ob der Hausbesitzer auch Besitzer der Anlage ist, oder ob der Contractor diese Rolle übernimmt. In jedem Fall ist der Betrieb nicht mehr vollständig in der Hand des Hausbesitzers und Bewohners, sondern kann teilweise oder ganz durch den Contractor erfolgen. Es verändern sich die Beziehungen der Akteure untereinander. Hierbei wird zwischen folgenden Aktivitäten unterschieden:

- Besitzen:
Eigentümer des Wärmepumpensystems.
- Betreiben:
Den Betrieb der Wärmepumpe gewährleisten durch adäquate Steuerung, Instandhaltung und ggf. Wartung der Anlage.
- Finanzieren:
Finanzielle Mittel für den Kauf der WP zur Verfügung stellen.
- Wärmeverkauf:
Mit der WP erzeugte Wärme an den Letztverbraucher verkaufen.
- Flexibilitätsverkauf:
Die Vergütung der Möglichkeit die Wärmepumpe zu einem bestimmten Zeitpunkt ein bzw. auszuschalten.

6.2.3 Geschäftsmodelle

Die Nutzung und Vermarktung der Flexibilität von Wärmepumpen im Wohnsektor, wird zu neuen Akteuren oder einem Wandel der Tätigkeit der im Umfeld von Wärmepumpen aktiven Akteure führen. Eine mögliche neue Rolle im Markt ist die des Flexibilitätscontractors, welcher die Flexibilität der Wärmepumpe nutzt und vermarktet.

Je nach Geschäftsmodell gibt es unterschiedliche Kundensegmente. Jedoch muss für den Wärmepumpenbesitzer ein Vorteil entstehen, damit dieser seine Wärmepumpe zur Verfügung stellt. Für den Hausbewohner dürfen in diesem Fall jedoch keine Nachteile entstehen. Die Wertangebote welche durch flexiblen Betrieb entstehen, unterscheiden sich je nach Anwendungsfall. Allen ist gemeinsam, dass zusätzliche Erlöse, Energie- oder CO₂-Einsparungen oder positive Auswirkungen auf das Stromnetz entstehen. Dementsprechend unterscheiden sich Hauptakteure und Einnahmequellen.

Schlüsselaktivität für die Nutzung der Wärmepumpenflexibilität ist das direkte Ansteuern von extern oder die Übermittlung eines Anreizes zur Änderung des Betriebszustandes der Wärmepumpen. Dies kann über ein Echtzeitsignals oder die Übermittlung eines Fahrplans oder Prognosesignals erfolgen. Des Weiteren spielt das Messen von Zuständen im System Haus und Stromsystem, das agieren am Markt sowie Prognose eine wichtige Rolle.

Schlüsselressource ist zum einen die für die smarte Regelung der Wärmepumpe benötigte Schnittstelle für die Kommunikationsanbindung sowie neue Regelungskonzepte. Kosten für die kommunikative Einbindung und Abrechnung stellen den wesentlichen Anteil der anfallenden zusätzlichen Kosten dar.

Schlüsselpartner in jedem Geschäftsmodell sind Technologieanbieter, wie beispielsweise Wärmepumpenhersteller, IKT-Anbieter, Softwareentwickler.

Die entstehenden Erlöse bilden die finanzielle Grundlage für die jeweiligen Geschäftsmodelle. Zum Zeitpunkt der Betrachtung zeigte sich, dass sowohl die Reduktion der Netzentgelte als auch die Teilnahme am Markt für Sekundärregelleistung ein hohes Erlöspotential aufzeigen. Bei der Betrachtung der Sekundärregelleistung erscheinen sowohl positive als auch negative Regelleistungen finanziell attraktiv. Allerdings muss hier gesagt werden, dass in den vergangenen Jahren ein Verfall der Regelleistungspreise beobachtet wurde.

Eine Erhöhung der Effizienz sowie des Eigenverbrauchs stellen weitere attraktive Möglichkeiten dar. Der hohe Endkundenpreis wirkt sich in diesem Fall positiv auf das Erlöspotential aus. Die Erlösmöglichkeiten von Netzentgeltreduktion, Effizienzsteigerung und PV-Eigenverbrauchserhöhung sind stark durch die regulatorischen Rahmenbedingungen geprägt.

Auf einem mit der PV-Eigenverbrauchserhöhung vergleichbaren Niveau befinden sich die Erlöse, welche der Bilanzkreisverantwortliche mit der Vermeidung von Ausgleichsenergie erwirtschaften kann. Die Komplexität des Geschäftsmodells „Vermeidung von Ausgleichsenergie“ erscheint jedoch deutlich höher verglichen mit einer Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs.

Dies ist gefolgt von einer Teilnahme der Wärmepumpe am Primärregelleistungsmarkt. Geringes finanzielles Potential bietet eine Teilnahme am Markt für Minutenregelleistung (MRL). Dies ist hauptsächlich auf die geringe Anzahl von Abrufen bei diesem Regelleistungstyp zurück zu führen.

Die Erlöse welche durch eine optimierte Strombeschaffung am Spotmarkt erzielen lassen sind gering. Dies ist mitunter den geringen Strompreisen bzw. geringen Spreizung sowie deren geringen Anteil am Endkundenpreis geschuldet.

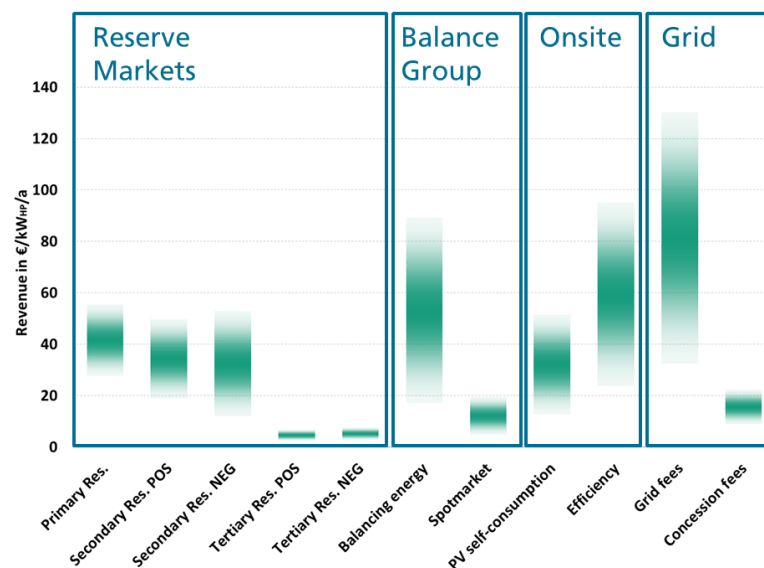


Abbildung 72: Gesamterlöse aus den einzelnen Geschäftsmodellen (Datenlage von 2015) [Fischer, 2017a].

Neben der Erlösattraktivität, welche in Abbildung 72 dargestellt ist, müssen sowohl die technischen Herausforderungen als auch das Risiko, welches bei der Wahl des jeweiligen Geschäftsmodells entsteht berücksichtigt werden.

Zudem gibt es unterschiedliche Faktoren, welche die Verbreitung von Wärmepumpen und neuen Geschäftsmodellen bremsen. Dazu gehören die relativ hohen Investitionskosten für Wärmepumpen und hohe Strompreise, insbesondere im Vergleich zu den aktuell niedrigen Preisen für fossile Brennstoffe. Dies ist besonders durch die hohen Abgaben durch Steuern und Umlagen beim Energieträger Strom bedingt. In Bezug auf den Haushaltsstrompreis ist der Anteil der Einkaufskosten vergleichsweise gering. Weshalb durch eine verbesserte spotmarktorientierte Betriebsweise nur eine geringe Reduktion des Endkundenpreises erzielt werden kann.

Die Prognose des Wärmebedarfs, welche für die Teilnahme am Regelleistungsmarkt (Primär und Sekundär) notwendig ist, ist komplex und birgt somit ein erhöhtes Risiko. Kürzere Zeiträume für die Bereitstellung von Regelleistung wären generell für eine leichtere Integration von Wärmepumpenpools im Regelleistungsmarkt hilfreich.

6.3 Simulation der Flexibilität von Wärmepumpen

Ein Zentraler Punkt für das Gelingen des Smart Grids ist eine systemdienliche Ansteuerung der Wärmepumpe als flexible Last. Hierfür ist es wichtig, das Verhalten sowohl einzelner als auch einer großen Anzahl an Wärmepumpensystemen zu verstehen. Das Projektkonsortium hat sich daher entschieden diese Aspekte sowohl in Simulation, als auch Feldtests zu untersuchen.

In der Vergangenheit waren die verfügbaren direkten Steuerungsmöglichkeiten für Wärmepumpen das Aus- und Einschalten der Geräte. Um diese Möglichkeiten zu erweitern, wurde die SG-Ready-Schnittstelle entwickelt und in den letzten Jahren für Wärmepumpen eingesetzt. Sie bietet einen standardisierten Zugang zu den Wärmepumpeneinheiten und bietet die Möglichkeit, vier verschiedene Betriebszustände der Wärmepumpen auszulösen. Diese sind "Ausschalten", "Normalbetrieb", "Empfohlener Betrieb", "Zwangseinschaltung". Damit erhöht SG-Ready den Optionsraum für die direkte Laststeuerung, die in diesem Projekt angesprochen wird.

In der Simulation ([Fischer, 2017a], [Fischer, 2016]) wurden grundlegende Fragen untersucht:

- Was passiert, wenn ein SG-Ready -Signal an einen Pool von WPs gesendet wird?
- Wie verändert sich die Flexibilität der WP im Laufe des Jahres?
- Hängt die Flexibilität vom gesendeten Signal ab?

Sie bilden die Grundlage für die Gestaltung von Reglern und das Verständnis des Verhaltens eines WP-Pools. Da SG-Ready außerdem neue Möglichkeiten für digital loop carrier (DLC) Signale bietet, wird ein besonderer Schwerpunkt auf diese Fragen gelegt.

Im folgenden wird ein weiterer Schritt in Richtung auf die Entwicklung angepasster DLC-Strategien für WP-Pools unternommen. Dazu wird zunächst ein generisches Poolmodell entwickelt, wie es in [Fischer, 2016] ausführlich dargestellt und im Folgenden kurz erläutert wird. Durch die Charakterisierung der Reaktion eines WP-Pools auf Trigger-Signale werden nützliche Erkenntnisse für die Reglerentwicklung über ihre Bedürfnisse geeigneten DLC-Ansätzen gewonnen.

Darüber hinaus wird die Auswirkung der verschiedenen SG-Ready-Signale auf die Flexibilität des WP-Pools untersucht und dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich die Notwendigkeit, verschiedene Signaltypen zu berücksichtigen. Eine weitere zentrale Frage, die in dieser Studie behandelt wird, ist der Einfluss einer wiederholten Aktivierung von WP-Pools, die durch einen Aggregator ausgelöst wird. Auch hier werden die Auswirkungen auf die verwendeten Flexibilitätsparameter verschiebbare Energie und jährliche Lastverschiebeeffizienz dargestellt. Darüber hinaus zeigt sich, dass bestimmte Wiederholungsmuster vorteilhaft sind, wenn es um die Aufgabe geht, möglichst viel Energie zu verschieben, aber auch die wiederholte Auslösung hat ihren Preis und eine starke Abhängigkeit vom Monat.

6.3.1 Wärmepumpen Pool

Ziel der Analyse ist die Bewertung von Auswirkungen verschiedener DLC-Signale, basierend auf der SG-Ready Schnittstelle. Für einen Pool von Wärmepumpen für Wohngebäude wurde ein Modell entwickelt. Ziel der Modellentwicklung war es, eine große Anzahl von Gebäuden unter Berücksichtigung ihrer Vielfalt zu simulieren und gleichzeitig den Modellierungsaufwand und die Rechenanforderungen gering zu halten. Es

wurde ein stochastischer Bottom-up-Ansatz gewählt, der in [Fischer, 2016] erläutert und validiert wird. Die Hauptteile werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Ziel der Simulationsstudie ist es, die allgemeinen Eigenschaften eines Wärmepumpen-pools zu untersuchen und seine Flexibilität bei der Verwendung von SG-Ready zu bewerten. Zu diesem Zweck wird eine einjährige Simulation eines Pools bestehend aus 284 Wärmepumpen für Wohngebäude durchgeführt. Es wird ein Simulationszeitschritt von 1 Minute und Test-Referenzklimadaten (TRY 2010) für Potsdam verwendet.

Der Pool setzt sich zu 88% aus Einfamilienhäusern und zu 12% aus Reihenhäusern zusammen. 80 % der Gebäude weisen einen spezifischen jährlichen Raumwärmebedarf zwischen 50 und 80 kWh/(m²a) auf. Bei den übrigen Gebäuden liegt der Bedarf zwischen 100 und 240 kWh/(m²a). 75 % der Wärmepumpen werden aus der Luft und 25 % aus dem Erdreich bezogen.

Das Pool-Modell ist ein erweitertes Modell eines Einzelgebäudemodells. Jedes Gebäude besteht aus einer Wärmepumpe, eine Zusatzheizung und zwei Wärmespeichern für Warmwasser und Raumwärme. Der Wärmeenergiebedarf wird durch dieses System gedeckt. Durch einen vollständig stochastischen Bottom-up-Ansatz unterscheiden sich die Größe und der Energiebedarf jedes Gebäudes von den anderen, und die Vielfalt der Bedarfsprofile wird angemessen berücksichtigt. Das in jedem Gebäude verwendete Wärmeverteilungssystem wird auf der Grundlage des Gebäudeenergiestandards zugewiesen. Unterschiedliche Wärmeverteilungstechnologien spiegeln sich in unterschiedlichen umgebungstemperaturabhängigen Heizkurven wider.

Warmwasser- und Raumwärmebedarf

Eine Kombination aus einem physikalischen Modell und einem Verhaltensmodell wird zur Berechnung des Energiebedarfs für Raumheizung (SH) und Warmwasserbereitung (DHW) sowie des Strombedarfs verwendet. Das Modell wird in [Miara, 2014] validiert dargestellt. Die in [Klaassen, 2015] zur Verfügung gestellten Aktivitätsdaten werden zur Ableitung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Häufigkeit, den Beginn und die Dauer der Aktivität der Bewohner verwendet. Diese werden verwendet, um die Zeiten und Mengen des Warmwasserverbrauchs, der SH-Sollwerte und der internen Gewinne im Gebäude zu bestimmen. Der Wärmebedarf für SH wird mit einem 5R1C-Gebäudemodell berechnet, das auf der vereinfachten stündlichen Methode basiert. Dieses Modell wird mit dem Modell für das Nutzerverhalten kombiniert und mit Hilfe eines Satzes standardisierter Gebäude aus [Vrettos, 2013] kalibriert, von denen ausgewählte Parameter randomisiert werden, um eine Vielfalt an Wärmelastprofilen zu erzeugen.

Wärmeerzeugung

Boden-WPs (GSHP) und Luft-WPs (ASHP) werden hinsichtlich ihres Wirkungsgrades (COP) und ihrer Wärmekapazität bei einer gegebenen Temperatur der Wärmequelle und der Senke modelliert, wie in den Gleichungen (14) und (15) gezeigt. Die Koeffizienten in (14) und (15) werden für die unterschiedlichen WP-Typen verschieden und werden aus Datenblättern extrahiert. Die Wärmeerzeugung aus der elektrischen Zusatzheizung wird mit Gleichung (16) modelliert, wobei der Umwandlungswirkungsgrad auf 0,99 gesetzt wird und die elektrische Leistung der Zusatzheizung darstellt. Die elektrische Zusatzheizung wird zusammen mit der Wärmepumpe verwendet, wenn die Leistung der Wärmepumpe nicht ausreicht, um genügend Wärme zu liefern, oder wenn sie extern aktiviert wird.

$$COP = a_0 + a_1 * (T_{sink} - T_{source}) + a_2 * (T_{sink} - T_{source})^2 \quad [-] \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{HP} = a_0 + a_1 * T_{source} \quad [W] \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{BH} = \eta * P_{el} \quad [W] \quad (16)$$

Für den Betrieb der WPs sind minimale Lauf- und Pausenzeiten implementiert. Diese betragen mindestens 6 Minuten Einschaltzeit und 3 Minuten Ausschaltzeit. Diese kurzen Zeiten wurden gewählt, um die Analyse der Reaktion der WPs auf kurzfristige Signale zu ermöglichen.

Speicherung

Der thermische Speicher ist als Mischbehälter modelliert. Die Temperatur im Tank wird als homogen angenommen. Zur Berechnung der Temperaturänderungen in den Brauchwasser- und SH-Speichern wird eine Energiebilanz hinsichtlich der Wärmeerzeugung durch die WP und den elektrischen Nachheizer, des Wärmebedarfs für Brauchwasser und SH sowie der Speicherverluste erstellt. Ein Zweipunktregler wird verwendet, um die Speichertemperaturen innerhalb des zulässigen Temperaturbandes (Hysterese) um den Sollwert zu halten.

Systemauslegung und Randomisierung

Die Dimensionierung für WP, Speicher- und Zusatzheizung basiert auf Empfehlungen von Herstellern [Smart Grid], [Wüstenrot, 2015] und [SmartOperator]. Die Dimensionierungsverfahren wurden durch die Einführung von Randomisierungsparametern für die WP-Effizienz angepasst, die zu einer Unter-/Überdimensionierung der WPs und der Speicher führen. Die Messwerte eines Feldtests werden zur Kalibrierung des Modells verwendet, um eine Variation der jährlichen Betriebsstunden und der WP-Schaltzyklen pro Tag korrekt zu berücksichtigen. Abbildung 73 zeigt das Randomisierungsverfahren, das in [Fischer, 2016b] ausführlich erläutert wird.

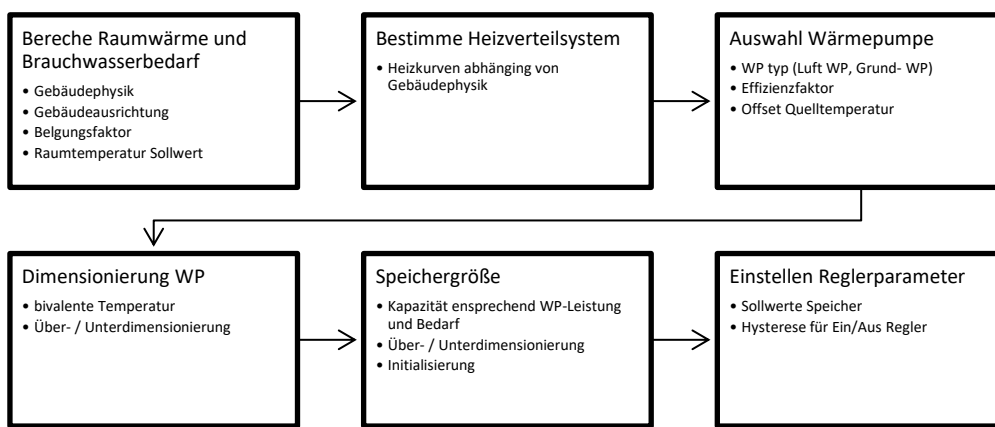


Abbildung 73 Schritte für die Systemauslegung und Randomisierung [Fischer, 2017].

Implementierung von direkten Lastkontrollen über SG-Ready

Um die Nutzung der WP-Flexibilität zu ermöglichen, wird das SG-Ready verwendet. Die vier vorgeschriebenen Betriebszustände "Ausschalten", "Normalbetrieb", "Empfohlener Betrieb" und "Zwangseinschaltung" sind im Dokument nicht vollständig festgelegt

und werden je nach WP-Hersteller unterschiedlich umgesetzt. Tabelle 7 fasst die SG-Ready-Regelungen und deren Umsetzung in der Simulationsstudie zusammen.

In einem ersten Experiment werden die in Tabelle 7 erläuterten SG-Ready-Signale für verschiedene Zeitintervalle (1 min, 15 min, 60 min, 360 min) an den Pool gesendet. Die Signale werden alle 19 Stunden gesendet, um verschiedene Stunden des Tages und des Jahres abzudecken und gleichzeitig eine Regeneration des Pools zwischen zwei Signalen zu ermöglichen.

In einem zweiten Experiment werden die Signale wiederholt über einen Zeitraum von 12 Stunden gesendet, um die Auswirkungen eines lang anhaltenden intermittierenden Betriebs zu untersuchen. Während der 12 Stunden folgt auf jedes Signal (1 min, 15 min, 60 min, 360 min) eine Pause von gleicher Dauer. Auf die 12 Stunden Prüfung folgen 7 Stunden ohne Signal. Nach diesen insgesamt 19 Stunden wird das Verfahren dann wiederholt.

Tabelle 7 Umsetzung von SG-Ready in der Simulation

	Zustand im Projekt	SG-Ready Empfehlung [20]	Implement. Simulation	SH Speicher Solltemperatur Simulation*	DHW Speicher Solltemperatur Simulation
Off (1)	Off	WP ausgeschaltet maximum 2 Stunde	WP ausgeschaltet	[HK, HK+5°C]	[45.0°C, 52.5°C]
Normal (2)	Normal	WP im normalen effizienten Betrieb.	WP mit normalen Sollwerten	[HK, HK+5°C]	[45.0°C, 52.5°C]
Recommended on (3)	On	WP in höherem Heizmodus. Empfehlung	WP ein mit erhöhter Hysterese	[HK+5°C, HK+10°C]	[50.0°C, 57.5°C]
Forced on (4a)	Superheat (WP)	WP muss einschalten	WP ein, Sollwerte maximal	[55°C, 60°C]	[52.5°C, 60.0°C]
Forced on with BH (4b)	Superheat (BH+WP)	WP und Zusatzheizer einschalten. Optional Solltemp. Erhöhen.	WP und Zusatzheizer ein. Sollwerte maximal	[55°C, 60°C]	[52.5°C, 60°C]

*HK = Solltemperatur anhand Außentemperatur abhängiger Heizkurve

6.3.2 Einfluss Größe des Pools:

Einzelhäuser unterliegen einer gewissen Streuung in Bezug auf Heizungs- und Brauchwassernutzung. Im ersten Schritt wurde daher untersucht wie viele Wärmepumpensysteme simuliert werden müssen um verlässliche Aussagen über das Verhalten des Pools zu treffen. Hierzu wurde die Anzahl der untersuchten Wärmepumpensysteme variiert. Abbildung 74 zeigt den zeitlichen Verlauf abgerufen Leistung der über SG-Ready für eine individuelle WP. Abbildung 75 für 10 WP, Abbildung 76 für 100 WP und Abbildung 77 für 250.

Mit zunehmender Anzahl an WPs zeigt sich eine deutliche Glättung der individuellen Haushaltseffekte. Es zeigt sich, dass zwischen 100 und 250 Systemen, keine signifikante Änderung der Kurvenform mehr geschieht. Daraus wird auf eine Mindestanzahl von etwa 250 WPs geschlossen, die notwendig ist, um zufällige Schwankungen auszugleichen.

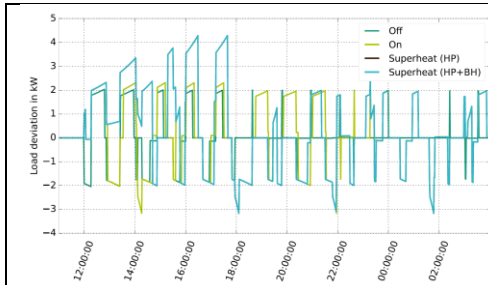


Abbildung 74: 1 WP

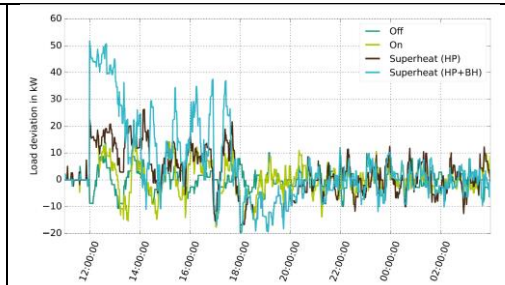


Abbildung 75: 10 WPs

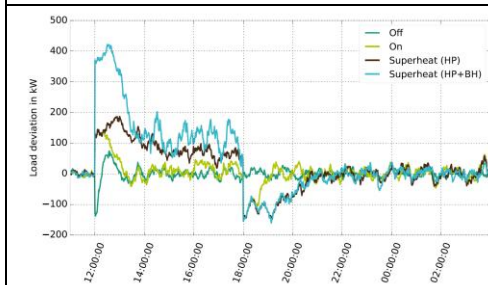


Abbildung 76: 100 WPs

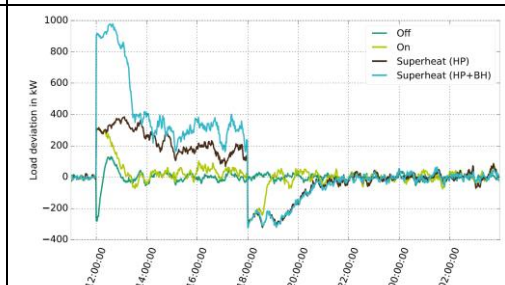


Abbildung 77: 250 WPs

Zeitlicher Verlauf der Leistung der über SG-Ready gesteuerten WP.

Folgend werden die Ergebnisse für die Simulation eines Pools aus 284 WP Einheiten mit einer Zeitauflösung von 1 Minute für die zuvor beschriebenen Szenarien vorgestellt.

6.3.3 Reaktion auf ein einzelnes Signal

Der Betrieb des WP-Pools mit SG-Ready-Signalen wird mit einem normalen Betrieb verglichen. In diesem Fall werden die Wärmepumpen betrieben, um die Speichertemperaturen innerhalb der definierten Grenzen zu halten. Von Interesse ist die Abweichung des Stromverbrauchs, wenn ein DLC-Signal an den normalen Betrieb angelegt wird. Abbildung 78 zeigt die Unterschiede im Stromverbrauch zwischen normalem und gesteuerten Betrieb für den gesamten Pool an einem beispielhaften Wintertag für ein 15 Minuten und ein 360-Minuten-Signal um 12:00 Uhr. Die Abbildung zeigt den Unterschied im Stromverbrauch der vier SG-Ready-Signale zum normalen Betrieb. Signale, die eine Aktivierung der WP verursachen („Ein“, „Überhitzung“ (WP) und „Überhitzung (WP + BH)“), führen zu einem Anstieg des Stromverbrauchs, gefolgt von einem Rückgang des Verbrauchs (Regeneration), wenn das Signal vorbei ist. Das „Aus“-Signal führt zu einer verringerten Nachfrage, gefolgt von einer erhöhten Nachfrage. Bei den in Abbildung 78 dargestellten 15-Minuten-Signalen ist kein Unterschied zwischen dem Signal „Ein“ und dem Signal „Überhitzung (WP)“ sichtbar. Dies zeigt an, dass die Zeitspanne zu kurz ist, um den Speicher auf das erhöhte Temperaturniveau zu beladen.

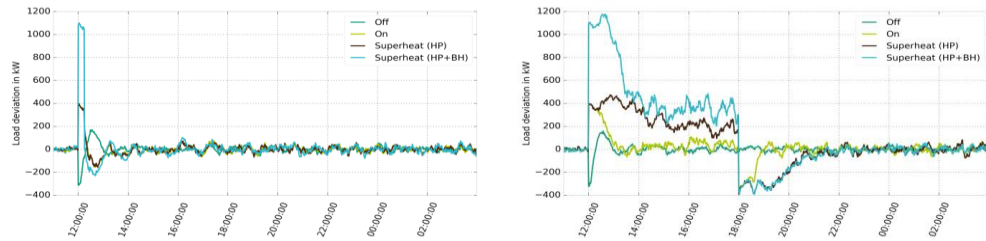


Abbildung 78: Beispielhafte Reaktion des Wärmepumpenpools auf ein 15-Minuten-Signal (links) und ein 360-Minuten-Signal (rechts).

Wenn das Signal 360 Minuten lang angelegt wird (vgl. Abbildung 78), werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen SG-Ready-Optionen sichtbar. Nach ca. 30 Minuten sinkt der Stromverbrauch des On-Signals. In dieser Phase haben immer mehr WP Systeme ihre Speicher aufgeladen und schalten ab. Die zur Überhitzung angewiesenen Systeme werden während dieser Zeit noch aufgeladen. Zwei Stunden nach der Aktivierung haben sich diese zur Überhitzung angewiesenen Systeme aufgeladen und treten in eine stationäre Phase ein. Die Regler werden weiterhin mit erhöhten Hysteresewerten betrieben, bis das Signal endet. Infolgedessen ist der Speicher wärmer als während des normalen Betriebs, was zu Wärmeverlusten und verringerten COP-Werten führt. Dies erklärt den gestiegenen Strombedarf in diesem Zeitraum.

Weiterhin ist zu erkennen, dass der Stromverbrauch bei Verwendung der Reserveheizung erheblich ansteigt. Für den Fall „Überhitzung (WP + BH)“ und „Ein“ und Signaldauer 360 Minuten ist die Zeit, in der die Speicher vollständig aufgeladen sind, durch einen Rückgang des Stromverbrauchs deutlich sichtbar. In den Fällen, in denen die WP ausgeschaltet ist, schwankt der Stromverbrauch des Pools, bis er sich auf kleinem Niveau stabilisiert hat. Abbildung 78 zeigt, dass die meisten WP nur für eine Dauer von 15 Minuten ausgeschaltet sind, obwohl die Signaldauer 360 Minuten beträgt. Dieses Verhalten wird durch die schnelle Entleerung des Speichers und die daraus resultierende Notwendigkeit verursacht, den Speicher zu erwärmen, um den thermischen Komfort nicht zu verletzen.

6.3.4 Reaktion auf wiederholte Signale

In einem zweiten Experiment werden die Signale wiederholt über einen Zeitraum von 12 Stunden gesendet, um die Fähigkeit des Pools zu testen, über einen längeren Zeitraum konstante Dienste bereitzustellen. Abbildung 79 zeigt ein beispielhaftes Ergebnis für die verschiedenen Signale, die alle 15 Minuten (linker Teil) und alle 60 Minuten (rechter Teil) wiederholt werden. Die Abbildung zeigt, dass der WP Pool auf jede gesendete Signalwiederholung reagiert. Nach 12 Stunden intermittierender Aktivierung kann eine kumulierte Regeneration beobachtet werden. Zwischen einzelnen Wiederholungen der Signale regeneriert sich der Pool bereits teilweise. Dennoch wird die Regenerationsperiode nach den Signalen durch die Wiederholung der Signale beeinflusst. Dieser Vergleich zeigt, dass die Regenerationszeit für ein wiederholtes Signal mit einer Dauer von 15 Minuten verlängert wird. Die Spitze der Leistungsabweichung aufgrund eines Triggersignals ändert sich während der Signalwiederholungen. Die Größe und der Trend dieses Peaks hängen von der thermischen Belastung ab. In Zeiten hoher thermischer Belastungen bleiben die Spitzen mit einer konstant langen Ladephase auf einem hohen Niveau, wie in Abbildung 79 dargestellt ist.

Bei sich ändernder thermischer Belastung ändern sich die Spitzen der Leistung entsprechend dem thermischen Bedarf der Häuser. Daher schwingen für die oszillierende thermische Last im Verlauf der Signalwiederholungen auch die Spitzen der Leistungsabweichung. Durch Aufsummieren der über die Zeit beobachteten Leistungsabweichung ergibt sich die Energieabweichung vom Normalbetrieb. Diese Energieausbeute durch Auslösen bei jeder Wiederholung hängt von der thermischen Belastung sowie

der Effizienz des WP-Pools ab. Der Wirkungsgrad wird durch steigende Speichertemperaturen negativ beeinflusst, da er in Zeiten geringerer thermischer Belastung besser sichtbar wird.

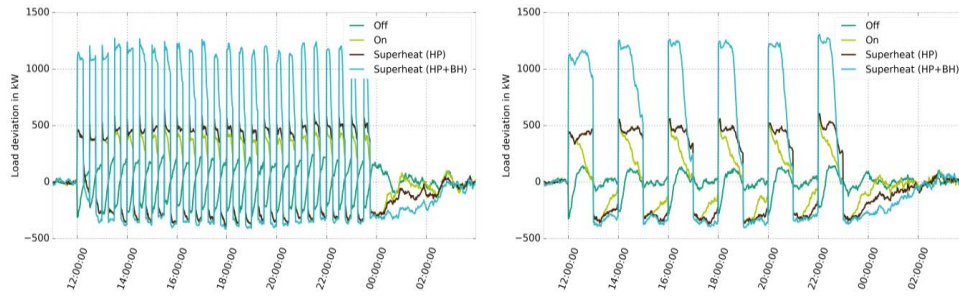


Abbildung 79: Beispielhafte Reaktion des Wärmepumpenpools auf ein wiederholtes 15-Minuten-Signal (links) und ein wiederholtes 60-Minuten-Signal (rechts).

6.3.5 Charakteristische Reaktion

Die beobachteten Reaktionen, wie in Abbildung 78 und Abbildung 79 dargestellt, haben im Verlauf eines Jahres eine ähnliche Form. Basierend auf diesen Beobachtungen wurde eine charakteristische Reaktion eines gesteuerten WP-Pools identifiziert und ist in Abbildung 80 dargestellt.

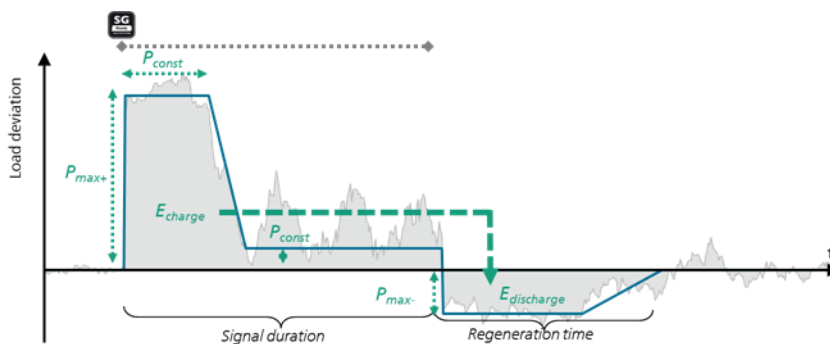


Abbildung 80: Typische charakteristische Reaktion des Pools und Schlüsselparameter für die Bestimmung der Flexibilität.

Es werden drei Hauptphasen beobachtet, die die chronologischen Eigenschaften definieren:

1. **Ladephase:** Während dieser Zeit laden die aktivierten Systeme den Speicher auf. Ein deutlicher Anstieg des Stromverbrauchs auf ein Maximum ist zu beobachten.
2. **Steady-State-Phase:** Nach einer Übergangszeit, in der immer mehr WP Systeme den Speicher vollständig aufgeladen haben, tritt der Pool in eine Steady-State-Phase ein. Während dieser Zeit werden die Systeme mit erhöhten Speichertemperaturen betrieben, was zu zusätzlichen Verlusten aufgrund einer verringerten WP-Effizienz und Wärmeverlusten des Speichers führt.
3. **Entlade- / Regenerationsphase:** Nach Beendigung des Aktivierungssignals werden die Speicher bis zum Erreichen ihrer normalen Solltemperaturen entladen. Während dieser Zeit ist der Stromverbrauch im Pool geringer als im normalen Betrieb, da dem Wärmespeicher Wärme entzogen wird. Nach einer Weile ist der Pool vollständig regeneriert und kehrt zum normalen Betrieb zurück.

Die verschiedenen Phasen beschreiben die typische Reaktion. Sie können sich in Länge und Größe für einzelne Antworten im Laufe des Jahres unterscheiden. Abbildung 80 zeigt die Reaktion für Aktivierungssignale. Das Signal „Aus“ folgt demselben Muster, jedoch mit inversen Vorzeichen, ausgenommen die stationäre Phase.

Die in Abbildung 80 beobachtete Reaktion wird verwendet, um vier Schlüsselparameter zu definieren, die die Flexibilität des WP-Pools beschreiben:

- **E_{Charge} (verschiebbare Energie):** Diese Energie wird verwendet, um die Speicher aufzuladen und auf Temperatur zu halten. Dies ist die Summe aller Abweichungen bei Vorhandensein eines Lastverschiebungssignals. Es wird auch als „nutzbare Energie“ bezeichnet.
- **$E_{\text{Discharge}}$:** Diese Energie repräsentiert die „eingesparte“ Energie beim Verschieben von Lasten. Dies ist die Summe aller Abweichungen zwischen dem Ende eines Signals und dem Beginn des nächsten Auslösezyklus.
- **E_{Loss} :** Differenz zwischen gespeicherter Energie (E_{Charge}) und eingesparter Energie ($E_{\text{Discharge}}$).
- **Lastverschiebungseffizienz:** Das Absolute des Verhältnisses von $E_{\text{Discharge}}$ zu E_{Charge} .

6.3.6 Verschobene Energie und Effizienz im Laufe des Jahres einzelne Signale

Eine zentrale Frage ist die Verfügbarkeit von WP für die Lastverschiebung im Laufe des Jahres. Um die Flexibilität des WP-Pools zu beurteilen, werden die jährliche Lastverlagerungseffizienz und die verschiebbare Energie analysiert. Abbildung 81 zeigt den monatlichen Durchschnitt der verschiebbaren Energie pro Zyklus für die verschiedenen Signaldauern. Es ist ersichtlich, dass die durchschnittliche verschiebbare Energie im Laufe des Jahres stark variiert. Im Sommer ist das Potenzial für Lastverschiebungen im Vergleich zum Winter nahezu vernachlässigbar, da im Sommer nur Warmwasser benötigt wird und der Heizpuffertank nicht verwendet wird. In den Fällen mit den höchsten Speicherhysteresen („Überhitzung (WP)“ und „Überhitzung (WP + BH)“) ist die jährliche Variation am stärksten ausgeprägt. Der Effekt der Überhitzung des Speichers nur mit WP wird bei Aktivierungen sichtbar, die länger als 15 Minuten dauern. Im Allgemeinen ermöglichen längere Signaldauern das Schalten höherer Lasten, sind jedoch stärker vom Monat abhängig (z. B. erhöht das Erhöhen der Signaldauer von 15 Minuten auf 60 Minuten die verschiebbare Energie für das Signal „Ein“ im November um den Faktor 2). Bei einer Dauer von weniger als 360 Minuten bleibt das Schaltpotential im Winter nahezu konstant und steigt während wechselnder Jahreszeiten leicht an und fällt im Sommer ab (im Vergleich zum Januar für eine Dauer von 60 Minuten ergibt das Signal „Überhitzung (WP)“ das 1,33-fache der Schaltmenge Energie im März, aber nur das 0,46-fache der Menge im Juni). Durch den Einsatz der Zusatzheizung wird die verschiebbare Energie in den kalten Monaten nahezu verdoppelt. In den Übergangszeiten führt die Überhitzung der Speicher über einen längeren Zeitraum zu geringeren Mengen an verschiebbarer Energie, da die Nachfrage nach Raumheizung abnimmt.

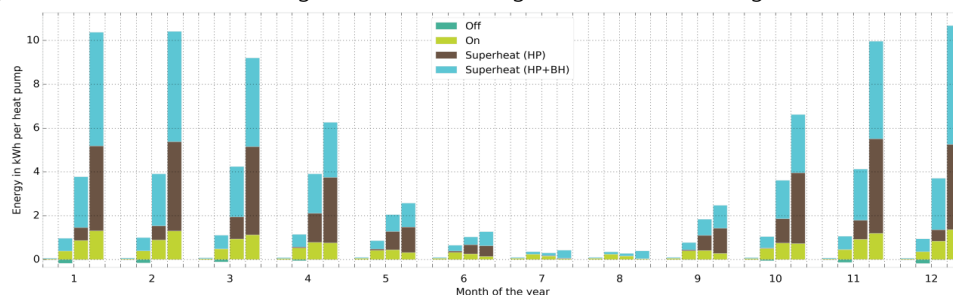


Abbildung 81: Verschiebbare Energie für einzelne Signale (Monatsdurchschnitt). Die Werte beziehen sich auf die Wärmepumpeneinheit und den Testzyklus von 19 Stunden. Die Gruppen pro Monat repräsentieren die Signaldauer in aufsteigender Reihenfolge (1 min, 15 min, 60 min, 360 min).

Für die Beurteilung der Flexibilität eines WP-Pools ist die jährliche Verschiebung maßgeblich, um Kosten und CO₂ durch Einsatz erneuerbarer Quellen zu sparen. Der linke Teil von Abbildung 83 zeigt die jährlichen Wirkungsgrade der verschiedenen Signale. Hier wird die jährliche Lastverschiebungseffizienz berechnet, indem die gesamte negative Energie im Laufe des Jahres durch die gesamte positive Energie dividiert und der Betrag des Ergebnisses genommen wird. Für eine Dauer von 1 Minute liegt der Wirkungsgrad aller Signale über 0,96, und für 15 Minuten beträgt der Wirkungsgrad des Signals „Ein“ und „Überhitzung (WP)“ ungefähr 0,97. Wenn die Signale 60 Minuten lang anhalten, wird der Wirkungsgrad durch den Effekt der Speicherüberhitzung beeinflusst, was zu einem verringerten Wirkungsgrad des Signals „Überhitzung (WP)“ auf 0,84 führt. Wenn das Signal 360 Minuten lang anliegt, fallen die Effizienzwerte für alle Signale erheblich ab. Der Grund dafür ist, dass der Speicher während des größten Teils der Aktivierungsphase auf einer hohen Temperatur gehalten wird, was zu zusätzlichen Speicherverlusten und Verlusten aufgrund des Betriebs der WP bei niedrigen COP-Werten führt, die als „stationäre Phase“ bezeichnet werden (vgl. Kapitel 6.3.5). Die Verwendung der Zusatzheizung führt in allen Fällen zu Verlusten, die bis zu 70% der aktivierten Energie erreichen. Mit zunehmender Signaldauer verringert die Verwendung der Zusatzheizung anschließend die jährliche Lastverschiebungseffizienz (von 0,96 für 1 Minute auf 0,3 für 360 Minuten). Abbildung 83 zeigt, dass die Wirkungsgrade für Fälle ohne Verwendung der Zusatzheizung ihre niedrigsten Werte aufweisen, wenn die Signaldauer von 15 Minuten auf 60 Minuten verlängert wird. Folglich ist für einmal gesendete Signale eine Signaldauer von 15 min bis 60 min vorzuziehen, um so viel Energie mit einem hohen Wirkungsgrad zu verschieben.

6.3.7 Verschobene Energie, Effizienz im Laufe des Jahres wiederholte Signale

In Bezug auf die Flexibilität des Pools, wenn Signale wiederholt gesendet werden, wird eine starke Abhängigkeit der verschiebbaren Energie von der thermischen Last beobachtet. Abbildung 82 zeigt die Variation über das Jahr für jede Signaldauer, wenn die Signale über einen Zeitraum von 12 Stunden wiederholt werden. Die in Abbildung 82 angegebenen Werte stellen die durchschnittliche verschiebbare Energie pro Zyklus während eines bestimmten Monats dar, die für jede Signaldauer angezeigt wird. Beim Auslösen des Pools besteht kein Unterschied zwischen der Wiederholung des Signals mit einer Dauer von 360 Minuten und dem nicht wiederholten Signal mit derselben Dauer. Trotz der Tatsache, dass die Gesamtdauer der Pool-Triggerung für alle Signaldauern gleich ist. Darüber hinaus beeinflusst die Dauer jeder Triggerwiederholung die verschiebbare Energie, obwohl alle Signaldauern das gleiche Verhältnis der Triggerzeiten zu den nicht ausgelösten Zeiten aufweisen. Das Wiederholen eines 15-Minuten-Signals über einen Zeitraum von 12 Stunden ergibt die höchste Menge an verschiebbarer Energie.

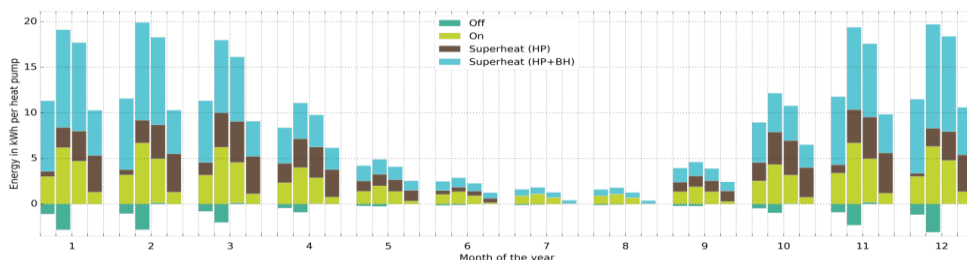


Abbildung 82: Verschiebbare Energie für wiederholte Signale (Monatsdurchschnitt). Die Werte beziehen sich auf die Wärmepumpeneinheit und den Testzyklus von 19 Stunden. Die Gruppen pro Monat repräsentieren die Signaldauer in aufsteigender Reihenfolge (1 min, 15 min, 60 min, 360 min).

Ein Vergleich zwischen Abbildung 81 und Abbildung 82 zeigt, dass die Wiederholung von Signalen signifikant höhere Mengen an verschiebbarer Energie ergibt (für eine

Wiederholung eines 15-minütigen „Überhitzungssignals (WP + BH)“ im Februar ergibt sich ein Anstieg um den Faktor 20). Darüber hinaus reduziert das Wiederholen der Signale die Einflüsse der Signaldauer und der thermischen Belastung auf die verschiebbare Energie. Beim Vergleich zwischen wiederholten und nicht wiederholten Signalen ist bemerkenswert, dass das wiederholte „Aus“-Signal im Winter erheblich mehr Energie verschiebt. Bei „Aus“-Signalen ist der Effekt der Erhöhung der Menge an verschiebbarer Energie aufgrund der Wiederholung von Signalen am stärksten.

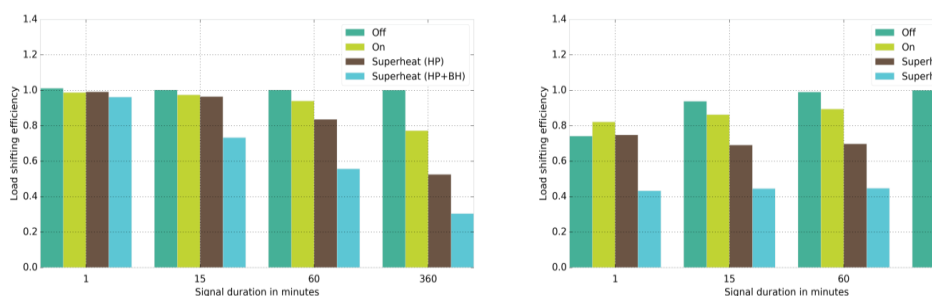


Abbildung 83: Jährliche Lastverschiebungseffizienz für nicht wiederholte Signale (links) und wiederholte Signale (rechts).

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Beurteilung der WP-Flexibilität gegenüber wiederholten Auslösungen ist die Effizienz. Der rechte Teil von Abbildung 83 zeigt die jährliche Lastverlagerungseffizienz. Im Vergleich zum nicht wiederholten Auslösen des WP-Pools sind die Wirkungsgrade geringer und sinken in einigen Fällen auf 30%. Somit beträgt der Wirkungsgrad für wiederholtes Überhitzen ohne Zusatzheizung nur etwa 70% des Wirkungsgrads für einzelne Signale bei einer Signaldauer von 15 min. Der Wirkungsgradabfall ist bei Signalen mit einer Dauer von nur 1 Minute am höchsten, da durch kontinuierliches Ein- und Ausschalten die Speichertemperaturen anschließend auf ein höheres Niveau verschoben werden. Darüber hinaus werden die relativ geringen Wirkungsgrade von Signalen mit einer Dauer von 1 min bzw. 15 min durch die minimalen Lauf- und Pausenzeiten der Wärmepumpen verursacht. Dies führt dazu, dass einige WP nicht bei jeder Wiederholung dem Signal folgen können. Infolgedessen wird der Betrieb des WP-Pools für kurze wiederholte Signale „getaktet“, die an den Grenzen minimaler Lauf- und Pausenzeiten arbeiten. Bei wiederholten Signalen ergeben Signaldauern von 60 Minuten die höchsten Lastverschiebungseffizienzen. Daher liegt die optimale Signaldauer für wiederholtes Auslösen zwischen 15 Minuten und 60 Minuten, wenn die Menge der verschiebbaren Energie (vgl. Abbildung 82) und ihre Effizienz (vgl. Abbildung 83 rechts) berücksichtigt werden. Die Verwendung der Zusatzheizung geht mit Verlusten bei der jährlichen Lastverschiebungseffizienz zwischen 30% und 45% einher, unabhängig von der Signaldauer.

6.3.8 Fazit Simulation

Die Simulationen haben gezeigt, dass WPs, die nach den heutigen üblichen Verfahren dimensioniert sind, ein elektrisches Verschiebungspotential bieten zwischen -0,18 (Unterbrechung) und 10,68 kWh (Aktivierung) pro Wärmepumpe und Lastverlagerungszyklus. D.h. die Wärmepumpe kann pro Betriebszyklus eine um diese Zahl veränderte Strommenge zu einem früheren bzw. späteren Zeitpunkt verbrauchen. Die Verfügbarkeit von WP für die Lastverschiebung ist stark saisonabhängig und zeigt im Sommer ein vernachlässigbares Verschiebungspotenzial im Vergleich zum Winter und zur Übergangszeit. Eine Analyse der Signallänge führt zu der Schlussfolgerung, dass Verschiebungsintervalle zwischen 15 min und 60 Minuten für die WPs in Bezug auf die verschiebbare Energie am besten geeignet sind. Bei diesen Signaldauern bleiben die Verluste unter 17%, wenn die Zusatzheizung nicht verwendet wird. Eine Analyse des charakteristischen Verhaltens zeigte ferner, dass die Verschiebung der Energie über einen

langen Zeitraum zu Effizienzverlusten gegenüber dem Normalbetrieb von bis zu 70% führt, je nach verwendetem SG-Ready-Signal.

Die wiederholte Anwendung von Triggersignalen über einen Zeitraum von 12 Stunden führt zu einer Erhöhung der verschiebbaren Energiemenge bezogen auf einen einzelnen Zyklus. Allerdings verringert sich gleichzeitig die jährliche Lastverschiebungseffizienz um durchschnittlich 15,6%, da sich die Speicher zunehmend aufheizen.

Auf den ersten Blick erscheint die Verwendung der Zusatzheizung zur Lastverschiebung aus Sicht des Stromversorgungssystems attraktiv, da sie insbesondere bei langen Aktivierungszeiten hohe Leistungen und hohe verschiebbare Energien liefert. Allerdings entstehen bei der Verwendung der Zusatzheizung Verluste von bis zu 70% der investierten Energie, was zusätzliche Kosten verursacht.

Eine Untersuchung des charakteristischen Ansprechverhaltens führt zu der Schlussfolgerung, dass die Erzielung eines konstanten Anstiegs des Energieverbrauchs über einen Zeitraum von mehr als 1 bis 2 Stunden maßgeschneiderte Regelungsstrategien erfordert, da die Reaktion auf ein Aktivierungssignal zu einer Lastspitze führt, gefolgt von einem stetigen Rückgang und einer anschließenden stationären Phase. Darüber hinaus muss die Regenerationsdauer nach einem Aktivierungssignal berücksichtigt werden, insbesondere bei wiederholter Auslösung.

6.4 Hochrechnung auf Ebene Deutschland

Die vorhergehende Methodik wurde verwendet, um die Flexibilität von Wärmepumpen und deren thermischen Speicher für Deutschland abzuschätzen. Hierzu wurden für jede der 12 TRY Klimazonen 100 Wärmepumpensysteme simuliert.

Der Gebäudepool setzt sich wie in [Müller, 2012, S. 30] dargestellt zusammen. Diese Poolzusammensetzung stellt die erwartete Gebäudetypenverteilung für Gebäude mit einer Wärmepumpe im Jahr 2030 dar. Die detaillierte Zusammensetzung pro Klimazone ist in Abbildung 84 dargestellt. Die Daten sind nach Gebäudetyp (SFH und MFH) und Gebäudealter / Sanierungszustand gruppiert. In Tabelle 8 sind die jeweiligen spezifischen Heizwärmebedarfe aufgezeigt.

Die Wärmebedarfsprofile wurden für das jeweilige Gebäude in seiner Klimazone erstellt. Basierend auf dem Wärmebedarf der einzelnen Gebäude wird dann der Wärmepumpenbetrieb simuliert. Die Aufteilung der WP sind Luft-Wasser (75%) oder Erdreich (25%). die Zuteilung erfolgt randomisiert.

Für jede Klimazone wird ein Pool von 100 WPs simuliert. In den Klimazonen 8, 11 und 15 werden voraussichtlich keine Wärmepumpen eingesetzt. Da 12 Klimazonen berücksichtigt werden müssen, wurden 1200 verschiedene HPs simuliert. Die Ergebnisse dieser Simulationen pro Klimazone und System werden gewichtet und Addiert. Die Gewichtung der jeweiligen Klimazone am Anteil der Gesamtsysteme kann Abbildung 84 entnommen werden.

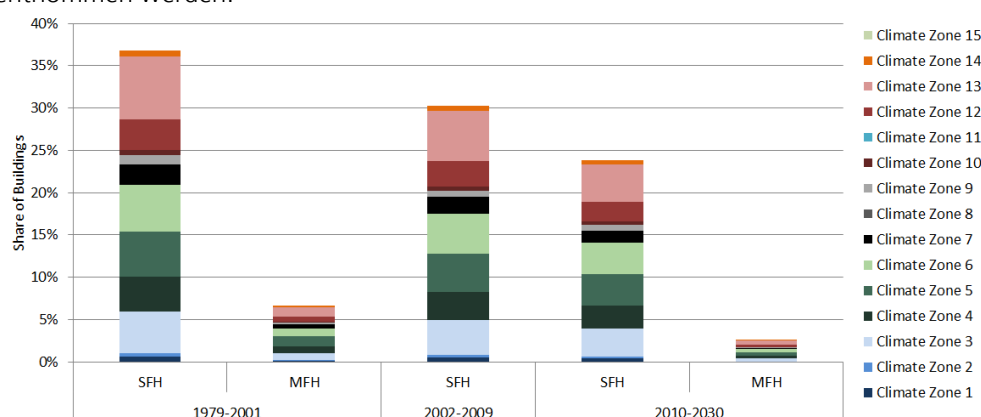


Abbildung 84: Verteilung der einzelnen Gebäudeklassen über die jeweiligen TRY Klimazonen.

Tabelle 8: Spezifischer Heizwärmebedarf der einzelnen Gebäudeklassen.

1200 WP => 1 Mio. WP ASHP = 75%, GSHP = 25%			1979-2001		2002-2009	2010-2030	
			SFH	MFH	SFH	SFH	MFH
Jährl.	Spez.	Heizbedarf	91- 214	79- 162	58-125	35- 92	24- 74
[kWh/m²a]							

6.4.1 Simulierte Fälle

Im Workshop Geschäftsmodelle wurden vier Arten von wichtigen Zyklen identifiziert: sub-stündliche Zyklen, stündliche Zyklen, zwei Zyklen pro Tag und eine ein Zyklus pro Tag. Die maximale Anzahl von Sperrstunden für Wärmepumpensysteme in Deutschland beträgt sechs Stunden pro Tag, wobei zwei Stunden hintereinander mit einem Minimum von zwei Stunden Pause zwischen zwei Abrufen zulässig sind. Diese Systematik

ist Grundlage für die untersuchten Szenarien der Lastverschiebung mit Wärmepumpen. Die generische Bewertung der Wärmepumpenflexibilität aus vorhergegangenen Untersuchungen ergibt typische Flexibilitätsdauern zwischen 220 Minuten bei -6° C und 30 Minuten bei +20° C Umgebungstemperatur. Basierend hierauf werden folgende Testsequenzen untersucht:

- Sub-stündliche Zyklen: Jeden ungeraden Tag: 15 Minuten Signal, 75 Minuten Regeneration; im Laufe des Tages wiederholt, beginnend um 00:00:00.
- Stündliche Zyklen: Jeden ungeraden Tag: 60 Minuten Signal, 300 Minuten Regeneration; im Laufe des Tages wiederholt, beginnend um 00:00:00.
- Zwei Zyklen pro Tag: Das Triggersignal wird 2 Stunden lang angelegt, beginnend um 02:00 und 13:00 Uhr. Der Rest des Tages ist Regeneration.
- Ein Zyklus pro Tag: Das Triggersignal wird 4 Stunden lang angelegt, beginnend um 11:00 Uhr. Der Rest des Tages dient der Regeneration.

Insgesamt beträgt die Zeit, in der ein Signal angelegt wird, in jedem Szenario 4 Stunden pro Tag (bei sub-stündlichen und stündlichen Zyklen ist jedoch jeder zweite Tag ausgenommen). Die Signalsequenzen für die sub-stündlichen und stündlichen Zyklen sind gleichmäßig über die Tage verteilt und werden für die Einzelschicht und zwei Schichten pro Tag aus dem PV-Erzeugungsprofil (Peak 11-13 Uhr) bzw. dem Restlastprofil oder der EPEX-Preiskurve abgeleitet (Preistief 2 Uhr und 13 Uhr).

In Abbildung 85 sind die untersuchten Lastverschiebestrategien zu sehen.

	Signal	Beschreibung	Restriktion
1	Off	WP wird ausgeschaltet	Mindest-Laufzeit (6 Minuten)
2	Standard	Konventioneller WP-Betrieb	-
3	On (normal Hyst.)	WP wird angeschaltet	Mindest-Stillstandszeit (3 Minuten)
3	On (increased Hyst.)	WP wird angeschaltet. Speicher-Hysteresen werden um 5 °C erhöht	Mindest-Stillstandszeit (3 Minuten)
4a	Superheat (HP)	WP wird angeschaltet. Speicher werden bis zur Maximaltemperatur von 60 °C geheizt	Mindest-Stillstandszeit (3 Minuten)
4b	Superheat (HP+BH)	WP und Zusatzheizung werden angeschaltet. Speicher werden bis zur Maximaltemperatur von 60 °C geheizt	Mindest-Stillstandszeit (3 Minuten)

■ Das Signal wird ignoriert, wenn die Speichertemperaturen ansonsten nicht innerhalb der Grenzen gehalten werden können

Abbildung 85: Untersuchte Lastverschiebestrategien.

6.4.2 Ergebnis

In Abbildung 86 ist die Reaktion des Pools im Szenario „Ein Zyklus pro Tag“ zu sehen. Es zeigt sich die nun schon bekannte Antwort des Pools mit einem sprunghaften Anstieg der Leistungsaufnahme, einem Abfall sowie einer Phase eines konstant (höheren) Stromverbrauchs und der anschließenden Erholung. Die Flexibilität im Betrieb ist deutlich erkennbar.

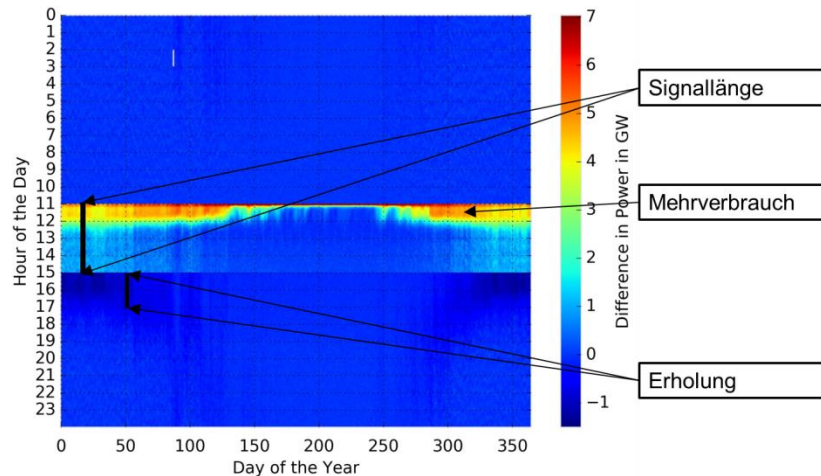


Abbildung 86: Beispielhafte Reaktion des Pools im Szenario "Ein Zyklus pro Tag" SG-Ready 3 WP+Heizstab.

Wie in Abbildung 87 zu sehen ist, führt der veränderte Betrieb durch den Abruf der Flexibilität zu einem veränderten Lastverhalten. Im Fall des simultanen Abrufs der Flexibilität aller Wärmepumpen kann die jährliche Lastspitze von 3,2 GW auf bis zu 7,2 GW ansteigen. Der jährliche Strombedarf dieses Pools entspricht hier 7,31 TWh für das simulierte Szenario.

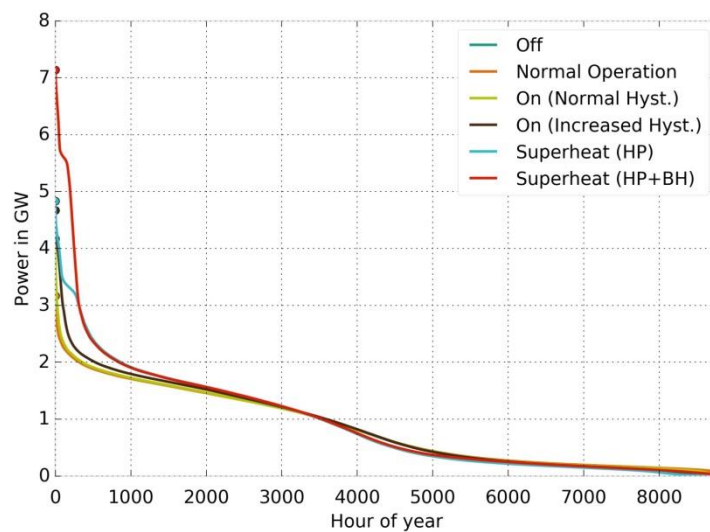


Abbildung 87: Jahresdauerlinien für die Elektrische Last resultierend aus dem Betrieb des Pools für die unterschiedlichen Betriebsweisen.

Abbildung 88 zeigt den Verlauf des täglichen Lastverschiebepotentials, aggregiert auf 1 Mio. Wärmepumpen. Es zeigt sich ein klarer saisonaler Verlauf mit einem Maximum der verschiebbaren Energie in der Übergangszeit. Obwohl in jedem Szenario die gesamte Dauer des Signals gleich ist (4 Stunden), ist das Lastverschiebepotential am größten für kurze Signaldauern. Da zwischen den Signalen ausreichend Zeit für eine Regeneration herrscht und bei längeren Signalen sich einige Systeme schon regenerieren während das Signal aktiv ist.

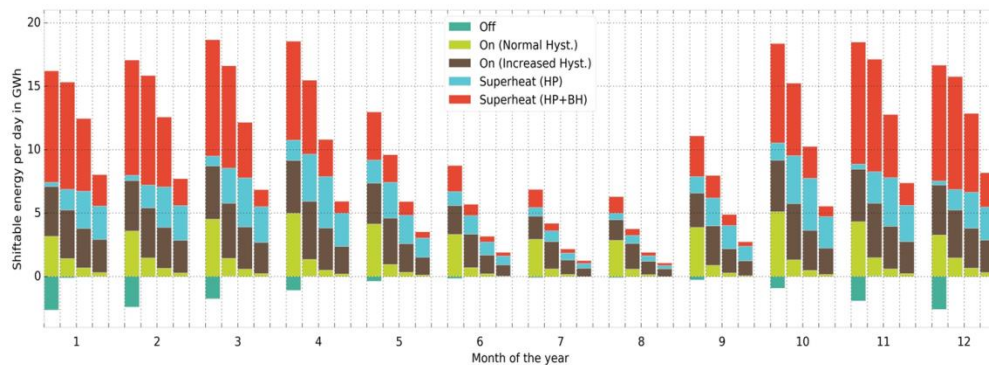


Abbildung 88: Tägliches Lastverschiebepotential von 1 Mio. WPs in Deutschland. Die Balken von links nach rechts bedeuten: Unterstündlich, Stündlich, 2 Zyklen pro Tag, 1 Zyklus pro Tag.

6.5 Feldtest

Ein wesentliches Ziel des erweiterten Feldtestes war, die in Abbildung 89 dargestellten Funktionalitäten der SG-Ready Schnittstelle aus Sicht von Aggregatoren zu demonstrieren und zu bewerten. Die Forschungsfrage lautet: "Wie flexibel sind die heute in der Praxis installierten Wärmepumpensysteme und was muss getan werden, um sie erfolgreich einzusetzen?" Neben dieser zentralen Frage ergeben sich zahlreiche Unterfragen, welche bei Planung, Durchführung und Auswertung des Feldtests aufgeworfen wurden:

- Wie kann die Flexibilität einzelner Wärmepumpensysteme in einem Feldtest ermittelt werden?
- Was sind die beobachteten Reaktionen der Wärmepumpen auf ein Signal und die Auswirkungen auf Wärmepumpeneffizienz und Nutzerkomfort?
- Was sind die wichtigsten Einflussparameter, welche die Reaktion beeinflussen?
- Wie zuverlässig sind die Reaktionen der WPs?
- Was sind die Hindernisse (bspw. Nutzung des Gebäudes,) und die daraus gezogenen Lehren?

Um möglichst viele dieser Fragen beantworten zu können, wurde die bereits in der Simulation genutzte Methode erweitert.

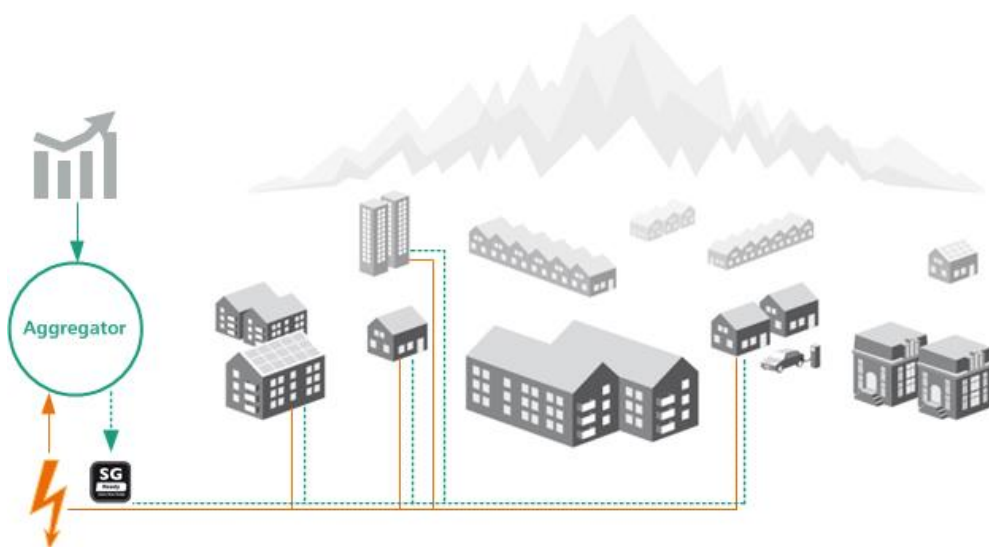


Abbildung 89: Aggregator kann über SG-Ready direkt Wärmepumpen ansteuern.

6.5.1 Vorgehen und Testsequenzen

Der zeitliche Ablauf des Feldtests unterteilt sich in zwei Hauptabschnitte. Im ersten Schritt werden die grundlegenden Funktionalitäten überprüft, um einen reibungsfreien Dauertest zu ermöglichen. Im zweiten werden kontinuierliche Testsequenzen zu unterschiedlichen Tageszeiten auf die Wärmepumpe gespielt. Pro Tag werden maximal 7 Stunden abweichender Betrieb vom Normalbetrieb realisiert, um den Systemen genug Zeit zu geben wieder in einen eingeschwungenen, vom Signal unbeeinflussten Zustand zurückzukehren.

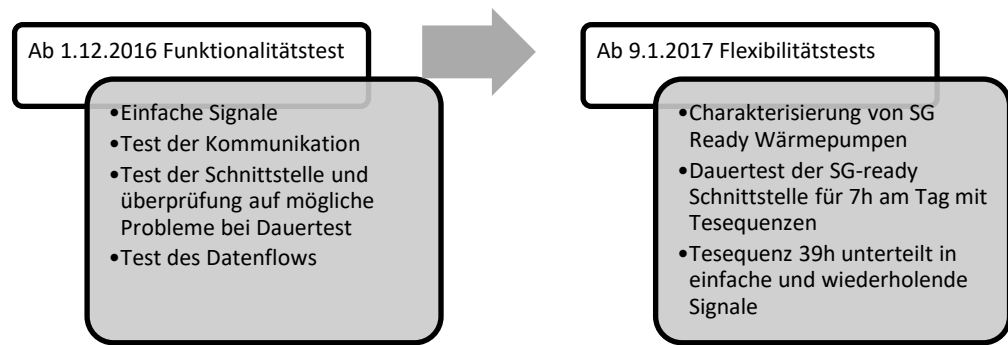


Abbildung 90: Ablauf des Feldtests Testablauf

Für den Dauertest ab 09.01.2017 werden die Wärmepumpen zu unterschiedlichen Tageszeiten mit den 4 SG-Ready Signalen beaufschlagt. Die gesamte Testsequenz im Dauertest erstreckt sich über einen Zeitraum von 39 Stunden. Somit verschiebt sich der Startpunkt (mit Bezug auf die Tageszeit) der Testsequenz um jeweils neun Stunden. Der kontinuierlich durchgeführte Test wiederholt zyklisch. Dies ermöglicht die Abdeckung unterschiedlicher Tageszeiten mit den jeweiligen Testsequenzen. Die gesamte Sequenz, welche in Tabelle 9 zu sehen ist unterteilt sich in:

1. Einzelne Signale,
2. Wiederholte Signale.

Tabelle 9: Genutzte Testsequenz (39 h), welche sich aus einzelnen Testsignalen (obere Hälfte) und wiederholten Signalen (untere Hälfte) zusammensetzt.

Test Signal	SG-Ready Betriebszu- stand	Dauer [Min]	Signal/Pause Verhält- nis [Min]
3	Einschaltbefehl	120	-
1	Normalbetrieb	300	-
0	Aus	60	-
1	Normalbetrieb	120	-
2	Einschaltempfehlung	120	-
1	Normalbetrieb	480	-
3	Einschaltbefehl	150	1x1/29, dann 15/15 wie- derholt
1	Normalbetrieb	330	-
0	Aus	90	1x1/29, dann 15/15 wie- derholt
1	Normalbetrieb	90	-
2	Einschaltempfehlung	150	1x1/29, dann 15/15 wie- derholt
1	Normalbetrieb	330	-

Bei den einzelnen Signalen liegt der Fokus auf der Evaluation der maximal (einmalig) verfügbaren Flexibilität. Daher sind die Signallängen basierend auf den ersten Funktionalitätstests und den Ergebnissen der Simulation so gewählt, dass die Speicher gefüllt werden können und auch eine Steady-State Phase eintritt, welche in der Simulation identifiziert wurde. Die Dauer des Ausschaltsignals wurde mit Bezug auf die Simulationsergebnisse und nach Rücksprache im Konsortium sowie unter Berücksichtigung der Meinung der Testpersonen mit Hinblick auf Komfort auf 60 Minuten festgelegt. Zwischen den Signalen wurden ausreichende Zeiträume im Normalbetrieb festgelegt, um eine Regeneration der Systeme zu ermöglichen und ein langfristiges Aufschwingen der Speichertemperaturen zu verhindern.

Bei dem zweiten Teil der Testsequenz handelt es sich um wiederholte Signale von 15 Minuten Länge gefolgt von 15 Minuten Pause. Hier soll der Einsatz des Systems in einer dynamischen Umgebung (wie bspw. der Erbringung von Sekundärregelleistung) untersucht werden. Zudem beginnt jede Sequenz mit einem einzelnen 1 Minuten Testsignal, um auch die Reaktionsfähigkeit der Wärmepumpen auf einzelne kurze Trigger-Signale zu evaluieren. Abbildung 91 zeigt die resultierende Testsequenz für eine Anlage.

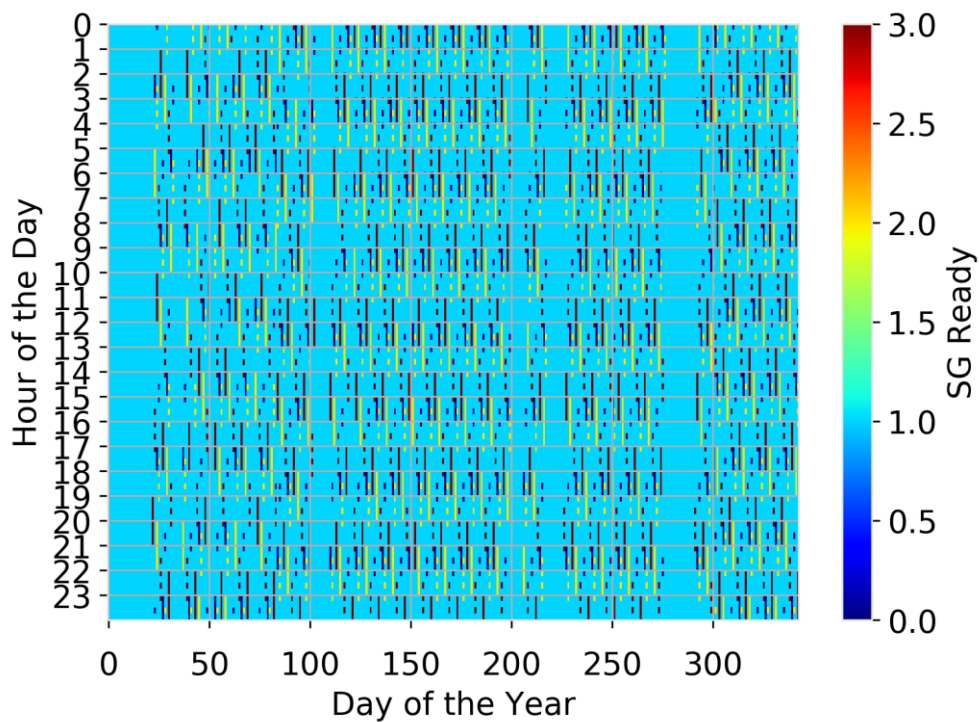


Abbildung 91: Resultierende Testsequenz für beispielhafte Anlage.

Im Rahmen des Feldtestes wurden 9 ausgewählte Wärmepumpen mit der Testsequenz über die erweiterte Infrastruktur betrieben. Im Folgenden wird die erreichte Flexibilität bewertet.

6.5.2 Implementierte SG-Ready Strategie

Je nach Anlagenschema und Typ sind unterschiedliche SG-Ready Strategien implementiert worden. Die Wärmepumpensysteme, welche im vorherigen Kapiteln näher beschrieben sind, unterscheiden sich in Wärmequelle, Art der Zusatzheizung (keine/Gas/Elektroheizstab), Größe und Einbindung der Speicher (Reihe oder Parallel) sowie in der Auslegung der Wärmepumpe relativ zur nominalen Heizlast. Es sei vorausgestellt, dass auf Grund der kleinen Stichprobe keine Aussagen über den Einfluss dieser Parameter auf die Lastverschiebung untersucht werden konnte. Die implementierten Lastverschiebestrategien bei Wärmepumpen unterscheiden sich je nach Hersteller. Im Folgenden werden diese kurz erläutert.

SG-Ready 1: Ausschaltbefehl – Hier gibt es 2 Implementierungen. Bei der Mehrzahl der Anlagen wird die Wärmepumpe durch den internen Regler heruntergefahren. Bei einer Anlage erfolgte eine „harte“ Abschaltung über EVU-Klemme.

SG-Ready 3: Einschalttempfehlung – Bei einigen Anlagen erfolgte hier eine Aktivierung der WP ohne Anhebung der Sollwerte. Dies führt zu einer guten Lastverschiebeeffizienz bei jedoch geringeren Lastverschiebepotential. Andere Hersteller erhöhten hier den Sollwert im Warmwasser- und Puffer Speicher. Keine Anlage erhöht die Raumtemperatur.

SG-Ready 4: Einschaltbefehl – Alle Anlagen erhöhen die Sollwerte in den Speichern. Keine Anlage erhöht die Raumtemperatur.

Bei der Erhöhung der Sollwerte im Speicher lassen sich zwei Ansätze unterscheiden. Eine relative Erhöhung der Solltemperatur um 2 K (SG 3) und 5 K (SG 4) Grad, sowie eine Absolute Erhöhung auf 60°C bzw. 65°C.

WP ID	SG-Ready 3		SG-Ready 4	
	Modus Raumheizung	Modus Trinkwassererwärmung	Modus Raumheizung	Modus Trinkwassererwärmung
358	+5		60	
375	+1	+2	60	65
324	+2	+5	+2	+5
307	+1	+2	60	65
344			k.A.	
374	+2	+5	+2	+5
349	+2	+10	-/-	
364	+10	start	60	start
330	+10	start	60	start

6.5.3 Beobachtete Reaktion der Wärmepumpen auf SG-Ready

Die Reaktion der Wärmepumpe auf ein SG-Ready Signal hängt vom aktuellen Betriebspunkt, der Temperatur im Speicher sowie gewisser Reglereinstellung, wie beispielsweise Mindestlauf- und Pausenzeiten, ab. In Abbildung 92 sind die möglichen Reaktionen eines Wärmepumpensystems auf ein Aktivierungssignal oder ein Deaktivierungssignal in Abhängigkeit des Systemzustandes aufgezeigt.

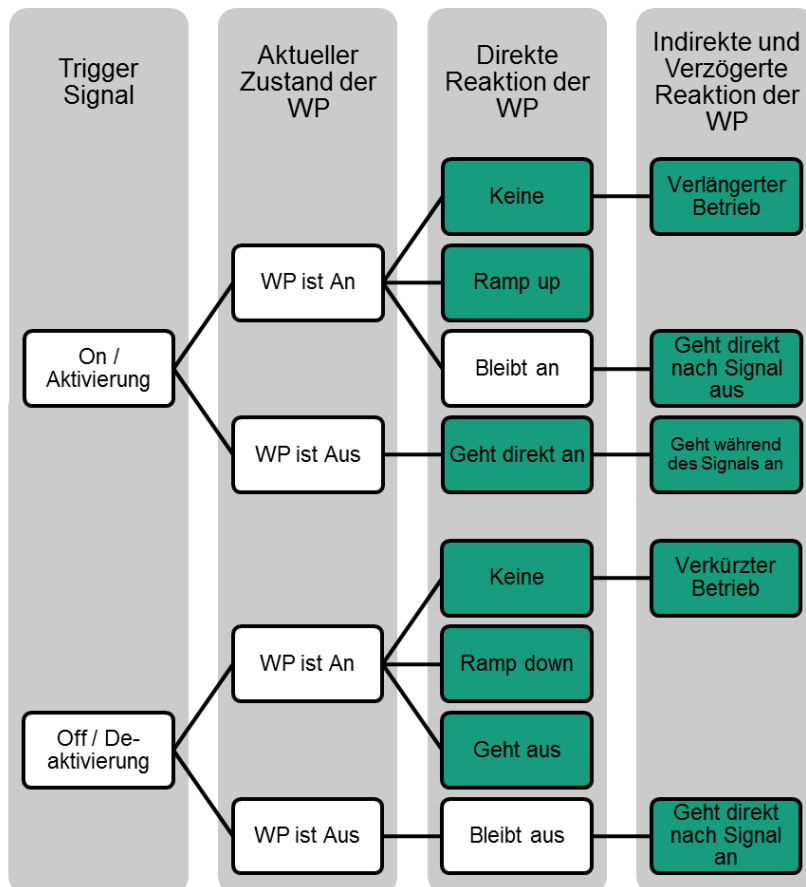


Abbildung 92: Schematische Reaktion einzelner Wärmepumpen auf ein SG-Ready Signal

Die Antworten, welche später auch im Strombezug der Wärmepumpe sichtbar sind und über einen Algorithmus detektiert werden, sind im Folgenden aufgelistet. Zudem ist kurz erläutert, wie diese Antwort algorithmisch erkannt wird.

Direkte Antwort:

- Übereinstimmung von Einschaltvorgängen und positiven Rampen mit Aktivierungssignalen. Ereignisse, die innerhalb von 3,5 Minuten liegen, werden akzeptiert.
- Übereinstimmung von Abschaltereignissen und negativen Rampen mit Ausschaltssignalen. Ereignisse, die innerhalb von 3,5 Minuten liegen, werden akzeptiert.

Indirekte Antwort:

- Übereinstimmung von Einschaltvorgängen und positiven Rampen, nachdem ein Ausschaltssignal ausgelöst wurde. Ereignisse, die innerhalb von 3,5 Minuten liegen, werden akzeptiert.
- Übereinstimmung mit Abschaltereignissen und negativen Rampen, nachdem ein Aktivierungssignal ausgelöst wurde. Ereignisse, die innerhalb von 3,5 Minuten auftreten, werden akzeptiert.

Verspätete Antwort:

- Übereinstimmung von Einschaltereignissen, die innerhalb der Dauer der Aktivierungssignale auftreten. Die Frage ist hier, ob ein Start zufällig/zufällig oder eine Folge eines SG-Ready-Triggers ist. Zur Unterscheidung zwischen zufälliger und beabsichtigter Reaktion wird die Regenerationszeit vor dem Start analysiert. Ist sie kleiner als die mittlere Regenerationszeit, die für die Gruppe von Tagen mit der gleichen durchschnittlichen Umgebungstemperatur beobachtet wurde, wird sie akzeptiert. Diese Methode wurde durch eine visuelle Kontrolle anhand der Speichertemperaturen validiert und funktioniert sehr gut.

Verzögerte Reaktion:

Falls ein Signal gesendet wird, das dem aktuellen Betriebszustand der Wärmepumpe entspricht und daher die Reaktion der Wärmepumpe nicht direkt beobachtet werden kann, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Die Wärmepumpe bleibt länger als normal an/aus, was zu einer indirekten Reaktion führt, nachdem das Signal beendet ist und beobachtet werden kann. In diesem Fall ist die Reihenfolge gültig.
- Das Signal hat keinen Einfluss auf den Betrieb der Wärmepumpe, da es a) zu kurz ist b) die Wärmepumpe bereits im gewünschten Modus arbeitet. In diesem Fall wird die Reaktion der Wärmepumpe nicht gezählt, um die saisonalen Flexibilitätswerte korrekt zu erhalten.

Abbildung 93 und Abbildung 94 zeigen diese Reaktionen beispielhaft anhand der gemessenen Daten. Zu sehen sind im oberen Bild der Strombezug sowie die Messwerte der unterschiedlichen Temperatursensoren in Speicher, Raum- und Heizkreisen. Die unterschiedlichen SG-Ready-Testsequenzen sind durch die Hintergrundfarbe gekennzeichnet. Das Ergebnis des Klassifizierungsalgorithmus ist dargestellt durch Punkte. Diese markieren die Sequenzen zum einen nach der Art der identifizierten Reaktion (direkt und indirekt) sowie nach der Gültigkeit der Reaktion. Mit diesen Klassifizierungen können statistische Auswertungen erfolgen, in denen bspw. alle gültigen Reaktionen auf einen gewissen Signaltyp ausgewertet werden.

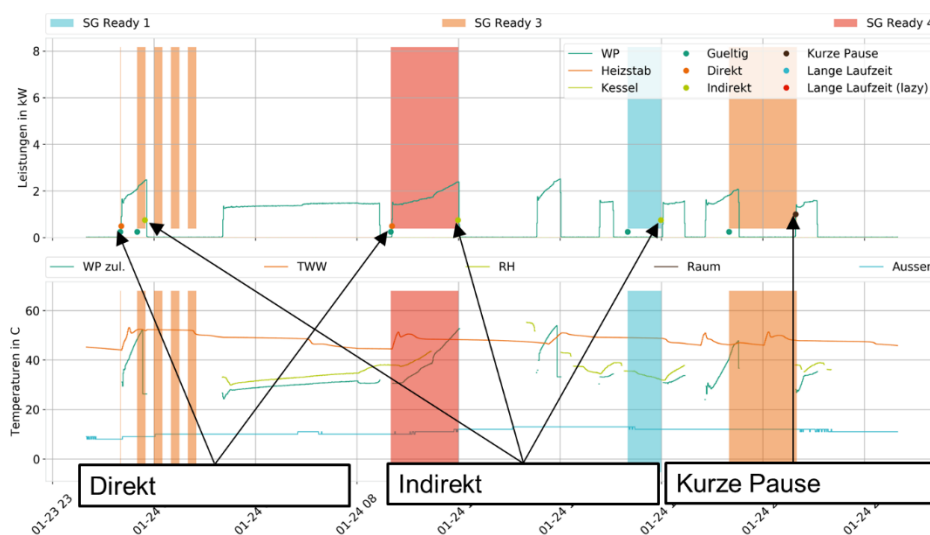


Abbildung 93: Beispielhafte Reaktion der Wärmepumpen auf SG-Ready Signal.

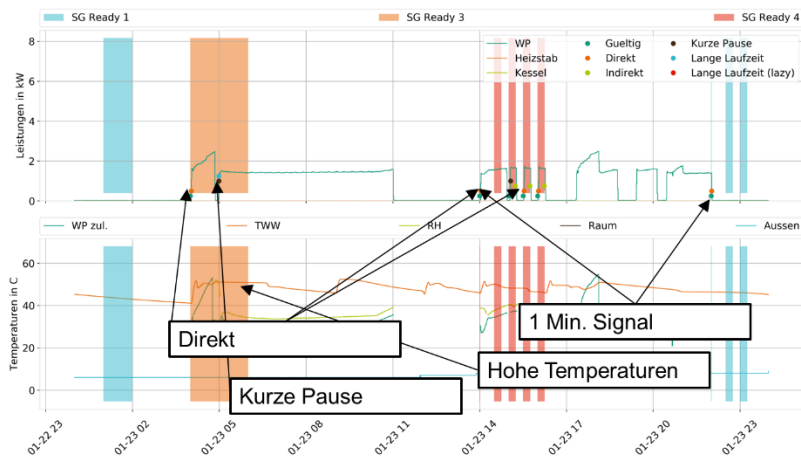


Abbildung 94: Beispielhafte Reaktion der Wärmepumpen auf SG-Ready Signal.

6.5.4 Mittlere Leistungsaufnahme

Um die Reaktion der Wärmepumpen auf SG-Ready zu analysieren, wird zunächst die mittlere Leistungsaufnahme von Wärmepumpe, Heizstäben sowie Gaskesseln in den jeweiligen Signalzeiträumen betrachtet. Diese sind in Abbildung 95 dargestellt. Bei der Betrachtung ist ersichtlich, dass SG-Ready einen Einfluss zu haben scheint. Im Folgenden sollen die einzelnen Anlagen etwas genauer untersucht werden.

- 358: Hier ist auf den ersten Blick keine signifikante Beeinflussung durch SG-Ready zu beobachten. Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei der Anlage um ein Gas-Hybrid System handelt, bei dem der Gaskessel (in den aktuellen Einstellungen) den größten Teil der Wärmebereitstellung übernimmt. Daher ist zum einen die Wärmepumpe oft nicht in Betrieb und zum anderen sind die Speichertemperaturen zumeist oberhalb der Einschaltgrenze für die Wärmepumpe. Bei weiterem hinsehen sieht man, dass bei Signal 3 der Bezug des Gaskessels reduziert wird. Hier wird durch SG-Ready der Betrieb der Wärmepumpe forciert (jedoch bei gleichen Temperatureinstellungen im System) und ersetzt den Betrieb des Gaskessels.
- 375: Man sieht, dass im Vergleich zum Normalbetrieb (SG-Ready 2) bei SG-Ready der Stromverbrauch erheblich reduziert wird und bei SG-Ready 3 um bis zu Faktor 3 vergrößert. Signal 4 führt zu gleichem Verhalten wie Signal 1. Hier wurde die Regelung nicht korrekt eingestellt.
- 324: Das beobachtete Verhalten ist wie von SG-Ready gewünscht. Es ist zu sehen, dass die Sperre (SG-Ready 0) nicht vollständig eingehalten wird. Dies kann zum einen durch Mindestlaufzeiten oder einer möglichen Unterschreitung der Temperaturgrenzen bedingt sein. Da die Temperaturgrenzen bei Signal 3 und 4 gleich eingestellt wurden sind hier keine signifikanten Unterschiede im Strombezug zu erkennen.
- 307: Diese Anlage ist eine Gas-Hybrid Anlage. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass der Betrieb durch den Gaskessel dominiert wird und dieser primär auf das SG-Ready Signal reagiert. Dies hat bei Signal 0 zur Folge, dass die WP mehr arbeitet als im Normalbetrieb und bei Signal 3 kann man einen forcierten Betrieb des Gaskessels beobachten.
- 344: Diese Anlage reagiert auf SG-Ready sowohl mit der Wärmepumpe als auch mit dem Heizstab. Da die Regelung der Anlage im Verlauf des Feldtests erst zur Jahresmitte für den Einsatz mit SG-Ready freigegeben wurde, beinhaltet

tet die Phase des Normalbetriebs deutlich kältere Tage als die Phase des Dauertests.

- 374: vgl. 324
- 349: vgl. 375
- 364: Diese Anlage reagiert auf SG-Ready wie gewünscht. Der Unterschied von 2 zu 3 fällt hierbei weniger signifikant aus als die Steigerung der Leistungsaufnahme von 3 zu 4. Dies ist durch die Temperatureinstellungen im System zu erklären und kann eine durchaus Sinnvolle Einstellung mit Hinblick auf die Effizienz der Wärmepumpen sein.
- 330: vgl. 364

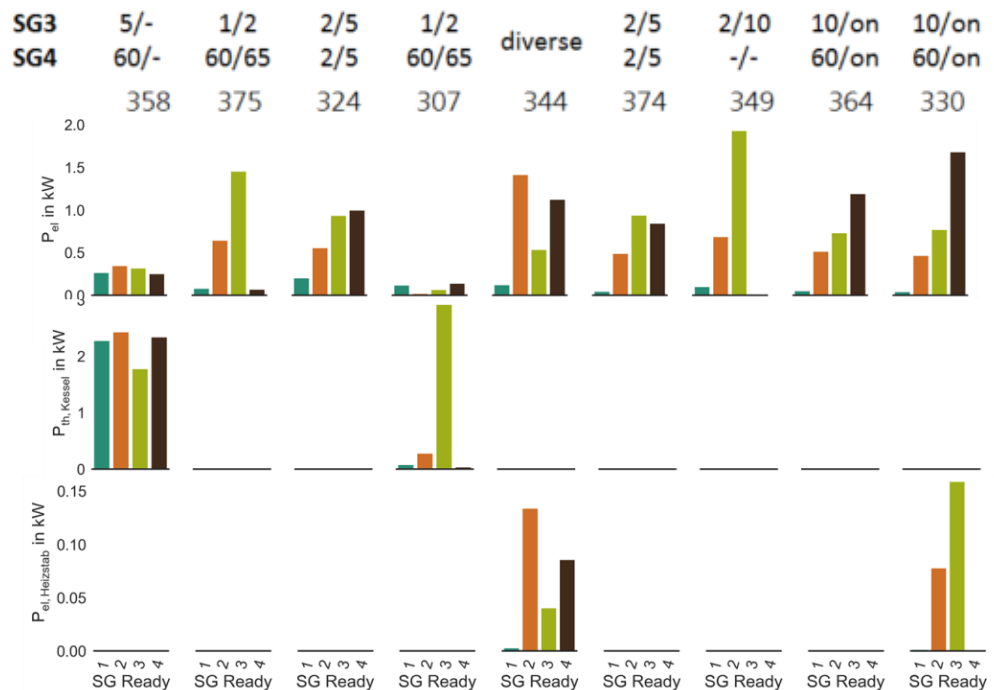


Abbildung 95: Mittlere Leistungsaufnahme bei unterschiedlichen SG-Ready Signalen.

Für die Bewertung der die SG-Regelung innerhalb der Wärmepumpe entscheidend. Abbildung 95 zeigt in den obersten beiden Zeilen die SG-Signale SG3 und SG4. Bei SG3 ist die relative Verschiebung des Sollwertes und x/y dargestellt. D.h. im Heizbetrieb wird um x K verschoben und der Bauchwassersollwert um y K. Im Falle von SG4 sind absolute Sollwerte für Heiz- bzw. Brauchwasser dargestellt. „on“ ist zu übersetzen mit: „Die Wärmepumpe wird eingeschaltet.“.

6.5.5 Zuverlässigkeit der Ansteuerung

In einer weiteren Auswertung wurde untersucht, wie zuverlässig die Wärmepumpen auf die jeweiligen Signale reagieren. Hierbei wurden für die jeweiligen Signaltypen die Anzahl der „gültigen Reaktionen“ (s.o.) zur Anzahl der gesendeten Trigger Signale in Verhältnis gesetzt. Abbildung 96 zeigt die Ergebnisse sortiert über alle Signale (oben) und für unterschiedliche Außentemperaturbereiche im jeweiligen Zeitraum (unten). Hier zeigen sich große Unterschiede in der Zuverlässigkeit zwischen den einzelnen Feldtestsystemen sowie den Signaltypen. Für alle Systeme zeigen höhere Werte der Zuverlässigkeit für ein Aktivierungssignal als für ein Deaktivierungssignal. Bei den Systemen 364 und 330 – welche auch in der Leistungsaufnahme korrekt auf SG-Ready reagieren – zeigt sich, dass die Zuverlässigkeit von Signal 3 zu 4 signifikant ansteigt. Was die Nützlichkeit einer zusätzlichen Temperaturerhöhung im Speicher für die Nutzung der

WP-Flexibilität klar verdeutlicht. Zudem zeigt sich klar, dass die Verlässlichkeit mit sinkender Außentemperatur und somit höherer Wärmenachfrage steigt. Bei einigen Systemen fällt diese dann im Bereich sehr kalter Außentemperaturen ($< -5^{\circ}\text{C}$) deutlich ab, da diese an ihre Kapazitätsgrenze operieren oder im Fall der Hybridsysteme der Kessel für einen Großteil der Wärmebereitstellung verwendet wird.

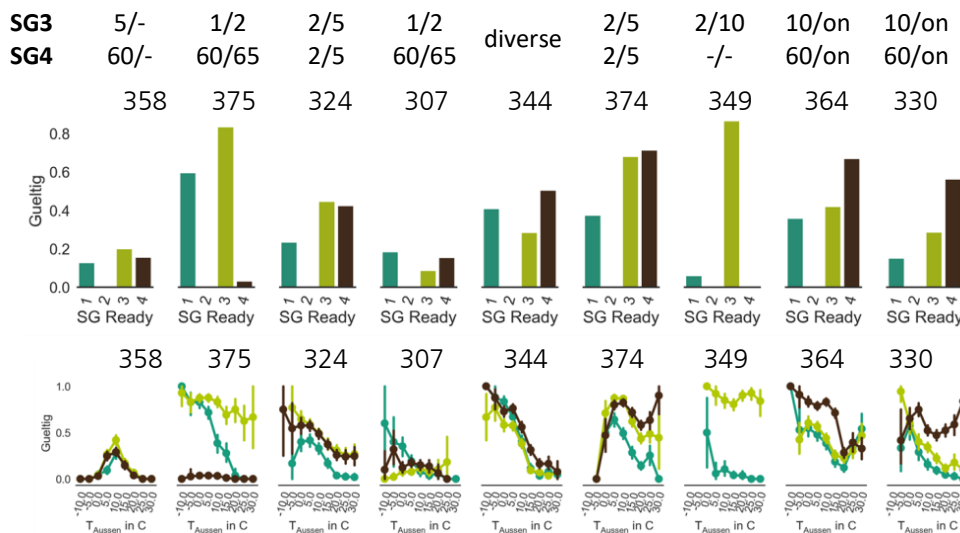


Abbildung 96: Anteil gültiger Sequenzen

6.5.6 Fazit des Feldtests

Zusammenfassend lassen sich aus dem durchgeführten Feldtest einige Rückschlüsse ziehen, welche teilweise schon Einfluss in die aktuellen Entwicklungen bei Wärmepumpenherstellern gefunden haben. Ein positiver Punkt der SG-Ready Schnittstelle ist, dass diese standardisiert und wenig Komplex ist.

Dennoch ist festzustellen, dass von 9 WPs nur 2 die Reaktion zeigten wie SG-Ready erwarten lässt. Da es sich hier um die erste Generation von SG-Ready Wärmepumpen handelt, diente dieses Projekt auch dazu, erste funktionale Tests im Feld durchzuführen. Obwohl SG-Ready im Grundsatz eine einfache Schnittstelle ist, kam es bei der Installation durch Handwerker zu einem Vertauschen der Kabel.

Es zeigt sich, dass die Art des SG-Ready Signals klar die Verlässlichkeit, Laufzeiten und die Leistungsaufnahme bestimmt. Die Grundsätzliche Idee mehrerer Stufen ist somit positiv zu beurteilen und ermöglicht die Möglichkeit, WP flexibel in ein Energiemanagementsystem zu integrieren und hierfür gezielt Algorithmen zu entwickeln. Wie gezeigt wurde, beeinflussen die in der Wärmepumpe implementierte Reaktion auf SG-Ready sowie die extern aufgeprägten Signale, welche aus einer „smarten“ Regelstrategie resultieren, die Verlässlichkeit, Laufzeiten und Energiemengen der Wärmepumpen.

Zudem hat sich gezeigt, dass Lastverschiebung häufig effektiv zwischen 30-60 Minuten durchgeführt wird und längere Signale wenig Wirkung entfalten, außer den Betrieb der Wärmepumpen hin zu höheren mittleren Speichertemperaturen zu verschieben. Es hat sich auch gezeigt, dass die Systeme zu großen Teilen nicht auf die kurzen (1 Minuten) Triggersignale reagierten oder im Anschluss kontinuierlich betrieben wurden, bedingt durch die implementierten Mindestlaufzeiten. Minimale Lauf- und Pausenzeiten stehen somit im Widerspruch zu kurzen Triggersignalen. Es hat sich zudem gezeigt, dass Sys-

teme mit einem hohen Trinkwasseranteil eine relativ gute, gleichmäßige Verfügbarkeit über das Jahr zeigen, wohingegen Heizlastdominierte Systeme starke saisonale Schwankungen aufweisen.

Als Hemmnisse hat sich in diesem Feldtest gezeigt, dass bei einigen Systemen die SG-Ready Einstellungen der Wärmepumpen gerade in Bezug auf die Nutzung des Heizstabs oder des Kessels noch verbessert werden können. Hybridsysteme sind nicht oder unzureichend eingebunden.

Da die Systemkonfigurationen der getesteten Feldsysteme sich stark unterscheiden und Einfluss auf die Flexibilität haben, ist für jedes System und Anwendung eine differenzierte Parametrierung der SG-Ready Werte zu empfehlen.

7

Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Projektes

Über die komplette Projektlaufzeit von „WPsmart im Bestand“ und darüber hinaus wurden und werden die Ergebnisse durch zahlreiche Beiträge in Fachzeitschriften, im Rahmen von Vorträgen auf Konferenzen, durch die Projekt-Homepage sowie durch Pressemitteilungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Hierbei wurde darauf geachtet, dass durch die Veröffentlichungen einerseits das Fachpublikum und andererseits auch Interessenten ohne entsprechenden Hintergrund angesprochen wurden. Nachfolgend werden die bisherigen Veröffentlichungen, sortiert nach den verschiedenen Kanälen, vorgestellt.

7.1 Projekt-Homepage

Zentrales Kommunikationsinstrument im Rahmen aller Fraunhofer ISE Feldtests ist die Homepage www.wp-monitoring.de, die jeweils zu dem aktuell laufenden Monitoring-Projekt führt. Die Informationen über bereits abgeschlossene Feldtestet (unter anderem „WPsmart im Bestand“) sind unter dem Button „Bisherige Feldtests“ zu finden.

Das Informieren projektexterner Interessengruppen erfolgte auf zwei Wegen. Einerseits wurden die Hauptergebnisse in Form von Zwischenergebnissen zusammengefasst und zum anderen wurden täglich aktualisierte Ergebnisse von 8 Wärmepumpenheizungsanlagen veröffentlicht. Ein Beispiel der anonymisierten Online-Visualisierung der Messergebnisse für die Öffentlichkeit wurde in Abbildung 97 dargestellt.

7.2 Vorträge, Veröffentlichungen, Medienbeiträge

Im gesamten Projektzeitraum und darüber hinaus wurden Vorträge zu den Ergebnissen und Erkenntnissen aus dem Projekt gehalten. In den Jahren 2015-2020 wurden rund 70 Vorträge bei unterschiedlichen nationalen und internationalen Veranstaltungen gehalten. Im Projektzeitraum wurden außerdem knapp 20 gedruckte Veröffentlichungen verfasst. Hierbei waren und sind die Kanäle sowie die Zielgruppen äußerst verschieden. Überdies wurden die Ergebnisse bei zahlreichen Veröffentlichungen von Dritten verwendet und es wurden diverse Interviews gegeben. Besonders hervorzuheben ist der Fernsehbeitrag bei „SWR“, der in einer sehr prominenten Sendezeit ausgestrahlt wurde.

7.3 Mitarbeit bei den VDI-Richtlinien

Die Erfahrungen und Messdaten aus dem Projekt haben ebenfalls die Mitarbeit bei den VDI-Richtliniengremien ermöglicht. Konkret wurden die Messdaten für die Erstellung und spätere Validierung der Berechnungen in der Richtlinie VDI 4650 Blatt 1 (Berechnung der Jahresarbeitszahlen der elektrischen Wärmepumpen) benutzt.

Die gesammelten Erfahrungen aus dem Projektierungs- und Installationsprozess haben wiederum die wirksame Mitarbeit bei der VDI 4645 (Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern) gestattet. Auf der Basis der Richtlinie ist nachfolgend ein Schulungs- und Zertifizierungsprogram entstanden.

Ohne die Erfahrungen aus dem Projekt „WPsmart im Bestand“ sowie früheren Monitorings-Projekten wäre ein erfolgreiches Mitwirken bei den erwähnten Vorhaben nicht möglich.



Das Gebäude

Baujahr:	1981
Zustand:	s. Erläuterung
Typ:	freistehendes Haus
Beheizte Wohnfläche:	250 m ²
Heizwärmeverbrauch:	129 kWh/m ² a
Anzahl der Bewohner:	3

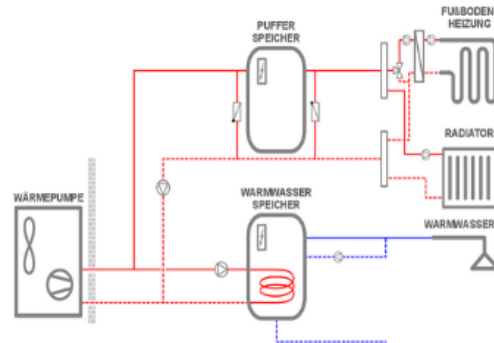
Die Heizungsanlage

Wärmeerzeuger:	Wärmepumpe, Elektroheizstäbe
Wärmequelle:	Außenluft
Heizleistung der Wärmepumpe:	7 kW (A2/W35)
Wärmeübergabesystem:	Fußbodenheizung und Radiatoren

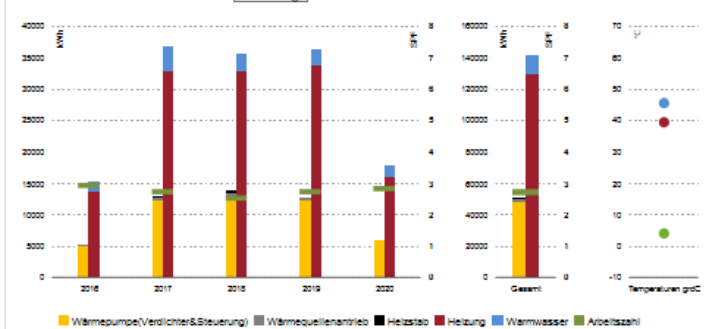
Erläuterungen

In dem 1981 errichteten Gebäude wurden bislang keine Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle zur Verringerung der Heizlast durchgeführt. Bereits beim Bau wurden das Dach mit 15 cm Glaswolle, die Außenwand mit 6 cm Styropor und die Bodenplatte gedämmt. Die Fenster sind zweifach verglast. Im gesamten Gebäude ist eine Fußbodenheizung verlegt und rund die Hälfte der Wohnfläche wird zusätzlich mit Radiatoren beheizt. Die von der Wärmepumpe erbrachten Heizkreistemperaturen liegen im Mittel von 41 °C und maximal bei 48 °C. Die Fußbodenheizung ist über eine Beimischschaltung am Pufferspeicher angeschlossen, womit der Heizungsanlauf mit geringeren Temperaturen betrieben werden kann. Zur Beladung des Trinkwasserspeichers lagen die Betriebstemperaturen der Wärmepumpe im Mittel bei 46 °C. Ein Heizstabbetrieb ist ausschließlich bei sehr geringen Außenlufttemperaturen zu verzeichnen.

Aktive Anlagenschema mit Tageswerten



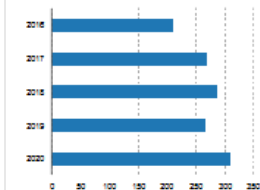
Die Effizienz für den Zeitraum: Gesamt



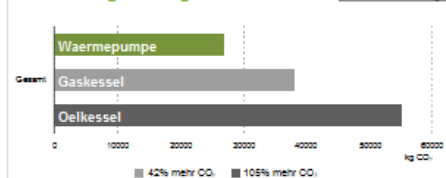
Die Betriebskosten



Durchschnittliche Betriebskosten im Monat



Die Technologie im Vergleich



Annahmen und Quellen

Nachfolgende Kennwerte beziehen sich auf den Endenergieeinsatz. Die Umrechnung auf die Nutzenergie erfolgt für die Wärmepumpe über die ermittelte Arbeitszahl. Für die fossilen Erzeuger werden Jahresnutzungsgrade von 90% (Gaskessel) bzw. 80% (Ölkessel) angenommen.

CO_{2,3q} (CO₂-Äquivalente)*: Strom 531 g/kWh; Erdgas 243 g/kWh; Heizöl 311g/kWh

PE (Primärenergie)**: Strom 1,8; Erdgas 1,1; Heizöl 1,1

*GEMIS 4.94

**EnEV 2016

Abbildung 97: Beispiel einer öffentlichen zugänglichen Visualisierung der Ergebnisse einer Anlage auf der Projekt-Homepage

Literatur- und Quellenverzeichnis zu Kapitel 1 bis 5

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Ed.) (2019): Wärmepumpen mit Prüfnachweis. Eschborn.

Bundesnetzagentur (Ed.) (2020): Monitoringbericht 2019. Available online at https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5, checked on 5/20/2020.

Diefenbach, Nikolaus; Clausnitzer, Klaus-Dieter (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt, Bremen: Institut Wohnen und Umwelt; Bremer Energie-Institut, checked on 5/14/2020.

DIN 4701-10, 2003-08: Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.

Grasser, L.; Wyssen, I.; Albert, M. (2011): Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung. Edited by Bundesamt für Energie, Bern (BFE), checked on 5/29/2020.

Günther, Danny; Miara, Marek; Langner, Robert; Helmling, Sebastian; Wapler, Jeannette (2014): „WP Monitor“ Feldmessung von Wärmepumpenanlagen. Freiburg, checked on 10/10/2019.

INAS (2019): Gemis 5.0. Globales Emissions-Modell integrierter Systeme. Edited by INAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien.

Jagnow, Kati; Wolff, Dieter (2004): Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln, checked on 5/29/2020.

Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): TABULA - Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. IWU - Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt. Available online at https://episcopes.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf, checked on 10/28/2016.

Miara, M.; Günther, D.; Wapler, J. (2011): Wärmepumpen Effizienz. Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Freiburg.

Miara, Marek; Bongs, Constanze; Günther, Danny; Helmling, Sebastian; Kramer, Thomas; Oltersdorf, Thore (2013): Wärmepumpen. Heizen - Kühlen - Umweltenergie nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (BINE-Fachbuch).

Statistische Bundesamt: Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihe von Januar 2005 bis März 2020, checked on 5/29/2020.

1. WSchV 1977 (8/11/1977): Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV), checked on 4/8/2020.

Zottl, Andreas; Nordman, Roger; Coevoet, Michel; Riviere, Philippe; Miara, Marek; Benou, Anastasia et al. (2011): SEPEMO. D4.1. / D2.3. Guideline for heat pump field measurements for hydronic heating systems.

Zottl, Andreas; Nordmann, Roger (2012): SEPEMO. D4.2. /D 2.4. Concept for evaluation of SPF Version 2.2.

Literatur- und Quellenverzeichnis zu Kapitel 6

- [Fischer, 2016] Fischer, D., Wolf, T., Wapler, J., Hollinger, R., & Madani, H. (2017). Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool. *Energy*, 118, 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.111>
- [Fischer, 2016a] Fischer, D., & Madani, H. (2017). On heat pumps in smart grids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 342–357. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.182>
- [Fischer, 2016b] Fischer, D., Wolf, T., Scherer, J., & Wille-Haussmann, B. (2016). A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households. *Energy and Buildings*, 124, 120–128.
- [Fischer, 2017] Integrating Heat Pumps into Smart Grids. KTH Royal Institute of Technology. <https://doi.org/diva2:1141142>
- [Fischer, 2017a] Fischer, D., Triebel, M.-A., Erge, T., & Hollinger, R. (2017). Business Models Using the Flexibility of Heat Pumps - A Discourse. In 12th IEA Heat Pump Conference. Rotterdam: IEA Energy Technology Network.
- [Fischer, 2017b] Fischer, D., Wolf, T., & Triebel, M.-A. (2017). Flexibility of heat pump pools: The use of SG-Ready from an aggregator's perspective. In 12th IEA Heat Pump Conference (pp. 1–12). Rotterdam: IEA Energy Technology Network.
- [Fischer 2018] Fischer, D., & Triebel, M.-A. (2018). A concept for controlling heat pump pools using the smart grid ready interface. In IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe Conference, Sarajevo.
- [Miara, 2014] M. Miara, D. Günther, Z. L. Leitner, and J. Wapler, "Simulation of an Air-to-Water Heat Pump System to Evaluate the Impact of Demand-Side-Management Measures on Efficiency and Load-Shifting Potential," 2014
- [Müller, 2012] Müller, S. (2012). Potential of CHP and Heat Pump Systems to Compensate Fluctuating Renewable Energy Generation in Germany. University of Freiburg.
- [Klaassen, 2015] E. A. M. Klaassen, C. P. De Koning, J. Frunt, and J. G. Slootweg, "Assessment of an Algorithm to Utilize Heat Pump Flexibility- Theory and Practice," in IEEE PowerTech Conference, 2015, pp. 1–6.
- [Vrettos, 2013] E. Vrettos, K. Lai, F. Oldewurtel, and G. Andersson, "Predictive Control of buildings for Demand Response with dynamic Day-ahead and real-time prices," 2013.
- [Smart Grid] "Smart Grid connecting Users and Suppliers of Renewable Energies."
- [Wüstenrot, 2015] "EnVisaGe Wüstenrot." [Online]. Available: <http://www.envisage-wuestenrot.de>. [Accessed: 25-Nov-2015].
- [SmartOperator] "Smart Operator."

Abkürzungsverzeichnis

AW	Außenwand
BAFA-Liste	Liste der Wärmepumpen mit Prüf- / Effizienznachweis, Hrsg.: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
Bims	Bimsstein
DG	Dachgeschoss
EG	Erdgeschoss
EPS	Expandiertes Polystyrol
FBH	Fußbodenheizung
GW	Glaswolle
HK	Heizkörper
HS	Heizstab
HWL	Holzwohle-Leichtbau
JAZ	Jahresarbeitszahl (für Einzahl als auch für Mehrzahl verwendet)
k.A.	keine Angabe
KG	Kellergeschoss
MW	Mineralwolle
OG	Obergeschoss
OGD	Obere Geschossdecke
PIR	Polyisocyanurat
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
RH	Raumheizung
SW	Steinwolle
T	Temperatur
TWE	Trinkwassererwärmung
TWS	Trinkwasserspeicher
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WE	Wohneinheit
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe
WP	Wärmepumpe
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WÜS	Wärmeübergabesystem
ZWE	Zusätzlicher Wärmeerzeuger

Vorstellung der einzelnen Anlagen

Im Folgenden werden die einzelnen Anlagen in Form von Steckbriefen vorgestellt und die Außenlufttemperaturabhängigkeit der Betriebstemperaturen der Wärmepumpe im Modus Raumheizung jeweils in einer Grafik dargestellt.

A: Erläuterung zu den Steckbriefen

Zur Veranschaulichung der im Projekt „WPsmart im Bestand“ untersuchten Objekte werden diese in Form von „Steckbriefen“ nachfolgend kurz vorgestellt. Eine Zuordnung der Objekte zu den Ergebnissen im Hauptteil des Berichtes erfolgt über die Identifikationsnummern, nach denen die Steckbriefe aufsteigend sortiert sind. Die Steckbriefe gliedern sich in fünf Abschnitte.

Basisinformationen

Dieser Abschnitt enthält eine Kurzbeschreibung des Gebäudes und berücksichtigt u.a. folgende Informationen:

- *beheizte Fläche*
Die Definition der beheizten Fläche sowie Unsicherheiten bei den Angaben sind in Kapitel 4.2.1 erläutert.
- *energetische Gebäudecharakterisierung im Bau- und im heutigen Zustand:*
Anhand einer farblichen Skalierung wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile Außenwand, Fenster und Dach anhand der jeweiligen Grenzwerte der 1. und 3. WSchV klassifiziert. Ergänzend gibt der *Gebäudekennwert* einen – anhand eines Referenzgebäudes flächengewichteten – mittleren U-Wert von Außenwand, Fenster und Dach wieder. Die Datenerhebung, die Methodik der Klassifikation sowie dessen Aussagekraft wird in Kapitel 3.2 und 3.3 vorgestellt.



Versorgungssystem

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die eingesetzten Wärmeerzeuger und deren Einsatzbereich (Raumheizung und/oder Trinkwassererwärmung). Bei den Heizstäben ist ergänzend dessen Positionierung notiert. Ergänzend wird das heute installierte Wärmeübergabesystem genannt. Bei Anlagen, die unterschiedliche Typen von Wärmeübergabesystemen einsetzen, wird die jeweils beheizte Fläche angegeben.

Messdaten

Dieser Abschnitt führt einen Ausschnitt der zentralen Messdaten für die Effizienzbewertung der Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019 auf (bzw. Juli 2017 bis Juni 2018 für ID 305, 309, 374; vgl. Kapitel 4.1).

- *Spez. Heizwärmeverbrauch*
Der Wert gibt die von den Wärmeerzeugern (Wärmepumpe, ggf. Heizstab, ggf. Solaranlage, ggf. Kessel) bereitgestellte thermische Energie bezogen auf die o.g. beheizte Fläche wieder.
- *T_{WP_Heizkreis} (mittel) und T_{WP_TWS}-Beladung (mittel)*
Energetisch gewichteter Mittelwert der Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung bzw. Trinkwassererwärmung.

- *JAZ 3 (WP & HS)*

Verhältnis aus der von der Wärmepumpe und dem Heizstab bereitgestellten Wärme (vor etwaigen Speichern) und der elektrischen Energien von Verdichter, Regelung Wärmequellenantrieb und Heizstab. Bei Außenluft-Wärmepumpen erfolgt ein Abzug der thermischen Energie zur Abtauung (vgl. Kapitel 5.1). Wenn möglich werden die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung separat ausgewiesen.

- *Verhältnis HS zu Verd. RH/TWE*

Verhältnis aus elektrischer Energie des Heizstabes und elektrischer Energie des Verdichters der Wärmepumpe unterteilt für die Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung.

- *Wärmeanteil der WPA für TWE*

Anteil der von der Wärmepumpenanlage (Wärmepumpe, Heizstab) bereitgestellten Wärme im Betriebsmodus Trinkwassererwärmung zur gesamten von der Wärmepumpenanlage bereitgestellten Wärme.

- *Kesselnutzungsgrad*

Verhältnis aus der vom Kessel bereitgestellten Wärme (vor Speicher) und dem heizwertbezogenen Brennstoffeinsatz

- *Deckungsbeitrag des Kessel*

Verhältnis aus der von dem Kessel bereitgestellten Wärme und der gesamten bereitgestellten Wärme (Wärmepumpen, Heizstab, Solaranlage, Kessel); vor etwaigen Speichern.

- *Energieanteil des Kessels zur TWE*

Anteil der von dem Kessel im Betriebsmodus Trinkwassererwärmung bereitgestellten Wärme zur gesamten von dem Kessel bereitgestellten Wärme.

- *Deckungsbeitrag der Solaranlage*

Verhältnis aus der von der Solaranlage bereitgestellten Wärme und der gesamten bereitgestellten Wärme (Wärmepumpen, Heizstab, Solaranlage, Kessel); vor etwaigen Speichern.

Sanierungsmaßnahmen

Dieser Abschnitt gibt – soweit bekannt – eine kurze Übersicht der energetisch relevanten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle sowie der Änderungen am Wärmeversorgungssystem (vgl. Kapitel 3.2).

Kommentar

In dem Abschnitt werden ggf. weitere Informationen/Besonderheiten aufgeführt.

B: Erläuterung zu den Abbildungen

Im Anschluss an den Steckbrief ist für jede Anlage eine Abbildung zur Veranschaulichung der Betriebstemperaturen der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung eingefügt. Die Abbildung zeigt die Vorlauf- und die Rücklauf-temperatur der Wärmepumpe (energetisch gewichtete Tagesmittelwerte) über der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwert während der Wärmepumpenbetriebszeit im Raumheizmodus)¹. Die Messwerte der Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019 (bzw. Juli 2017 bis Juni 2018 für ID 305, 374) und während des übrigen Messzeitraumes werden gesondert gekennzeichnet (gefülltes Symbol bzw. umrandetes Symbol). Eine Trendlinie verdeutlicht – wenn möglich – den jeweiligen Zusammenhang zwischen der Rücklauf-temperatur und der Außenlufttemperatur. In Kapitel 4.9.1 wird die Methode der Erstellung der Trendlinien erläutert.

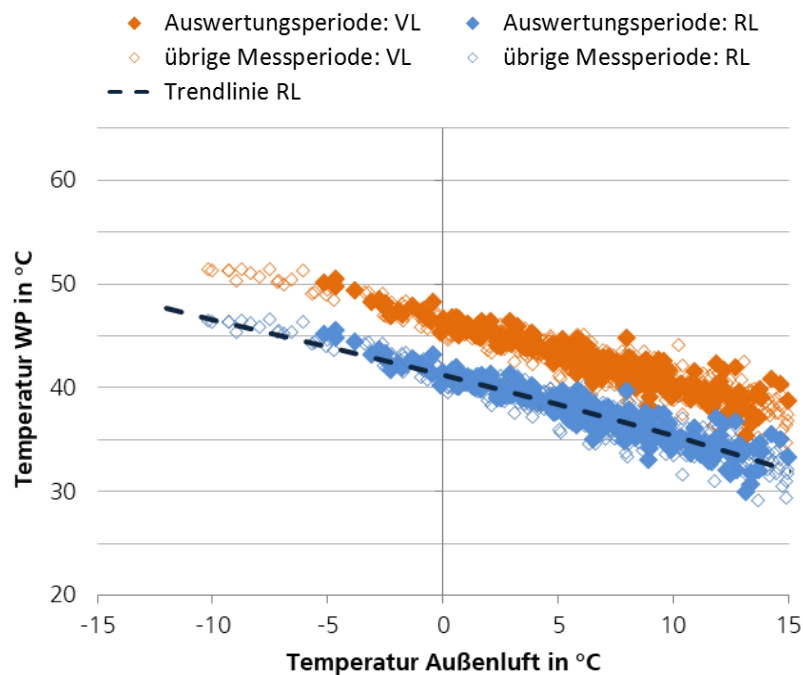


Abbildung 98: Beispiel: Vorlauf- und Rücklauf-temperatur einer Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur (Tageswerte)

¹ Bei 43 Messobjekten wird der installierte Außenlufttemperatursensor verwendet. Bei 13 Messobjekten werden aufgrund ungünstiger Sensorpositionierung oder fehlerhafter Messwerte stattdessen die Daten der nächstgelegenen DWD-Station verwendet. (vgl. Kapitel 3.4.4)

Basisinfos

Baujahr: 1994

Beschreibung: Freistehendes Zweifamilienhaus mit einem Vollgeschoss, beheiztem Dachgeschoss sowie teilbeheiztem Keller (Einliegerwohnung); beide Wohnungen mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 350 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2006
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 28 % Plattenheizkörper (KG), 36 % FBH (EG), 36 % Plattenheizkörper und FBH (DG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	79 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,9
T_WP_Heizkreis: mittel	37,0 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	45,3 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	10 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2006: Austausch der Heizkörper im KG durch größere Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2006: Austausch Ölkessel (Bj. 1993) durch Wärmepumpe

Kommentar

ID 303

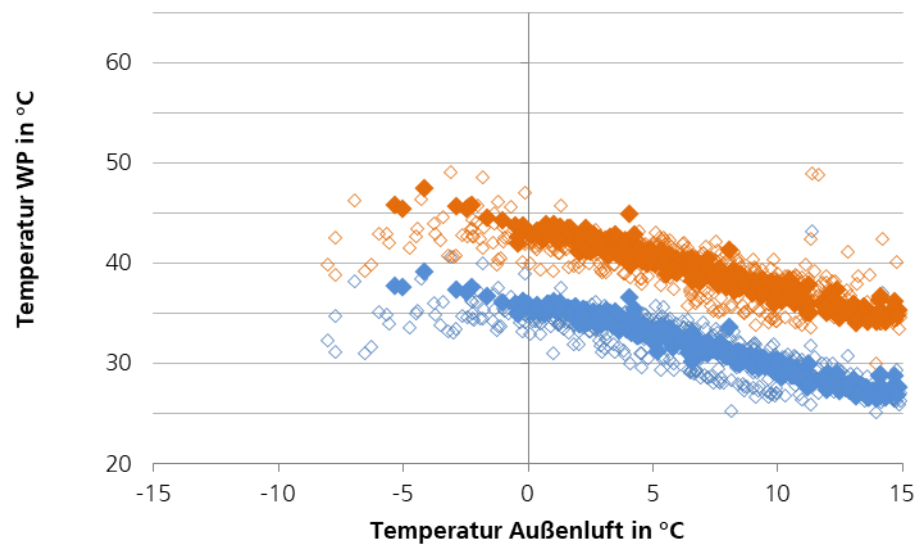


Abbildung 1: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 303 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1981
 Beschreibung: Freistehendes Zweifamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Keller (Einliegerwohnung)

beheizte Fläche: 250 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 44 % FBH (KG, EG), 56 % Plattenheizkörper und FBH (KG, EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	140 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,7
T_WP_Heizkreis: mittel	41,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 1 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	46,8 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	7 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Ölkessel (Bj. 1981) durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Kaminofen wird nach Auskunft der Bewohner während der Projektlaufzeit „nur sporadisch“ genutzt.

ID 304

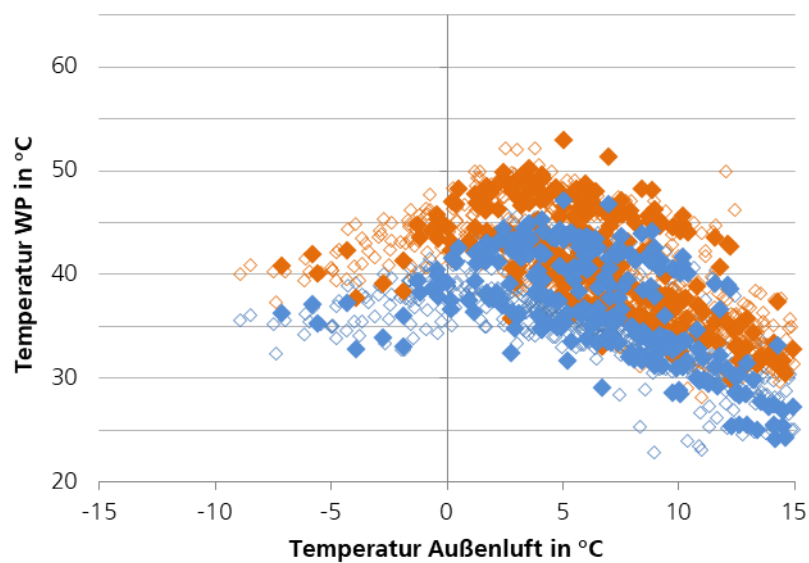


Abbildung 2: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 304 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH). Kommentar: Die Wärmepumpe ist bei Außenlufttemperaturen unter rund 2°C bereits häufig 24h in Betrieb. Möglicherweise ist die Leistung bei niedrigen Außenlufttemperaturen nicht ausreichend, um die eingestellte Heizkreistemperatur zu erreichen.

Basisinfos

Baujahr:	1968	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 168 m²		Gebäude Dach Wand Fenster	Gebäude Dach Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE Solarthermie: RH, TWE Kaminofen: RH (im EG; mit Zügen ins DG)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2017 bis Juni 2018

Spez. Heizwärmeverbrauch*	105 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP+HS)	2,9
T_WP_Heizkreis: mittel	33,7 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,1 % / 0 %
T_WP_TWS: mittel	46,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	8 %
Deckungsbeitrag Solar	7 %		

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Nord- und Ostseite: 50 mm Dämmung (PS) und Vormauerschale (Klinker) Süd- und Westseite: Originalzustand
Fenster	2015: Austausch einiger Fenster (3-fach-Verglasung)
Dach	2015: 160 mm Dämmung (MW)
Wärmeübergabesystem	2015: Austausch Heizkörper
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Öl-Einzelöfen durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Kaminofen wird nach Auskunft der Bewohner regelmäßig genutzt (im Winter an Werktagen abends und am Wochenende ganztags) bei einem jährlichen Holzverbrauch von 5 bis 7 Ster.

ID 305

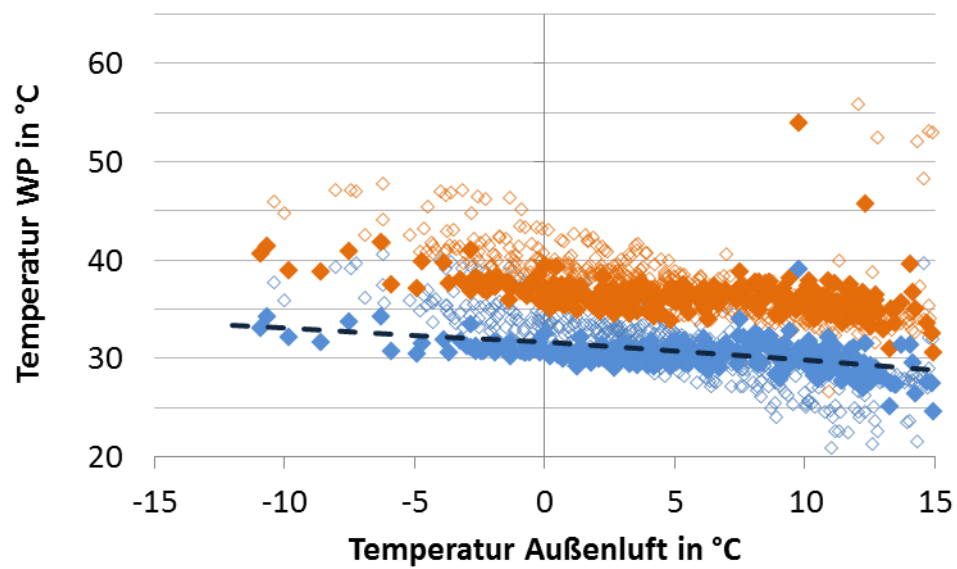


Abbildung 3: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 305 (Inverter geregelte WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr: 1981

Beschreibung: Freistehendes Zweifamilienhaus;
beide Wohnungen werden mit der
Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 230 m²

Energetischer Gebäudezustand: k.A.

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2012
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe 1: RH, TWE Wärmepumpe 2: RH Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Holzofen: RH (2 Öfen, im Wohnzimmer EG und DG)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 40 % Heizkörper (DG), 53 % FBH (EG), 4 % FBH und Handtuchheizkörper (EG), 3 % FBH und Heizkörper (DG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	90 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,3
T_WP_Heizkreis: mittel	40,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	49,9 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	18 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Keine Angabe
Fenster	2014: 3-fach-Verglasung
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	Einbau Fußbodenheizung und Austausch Heizkörper
Wärmeerzeuger	2012: Einbau Wärmepumpen

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Es liegen keine Informationen über den Umfang der Nutzung der Holzöfen vor.

ID 306

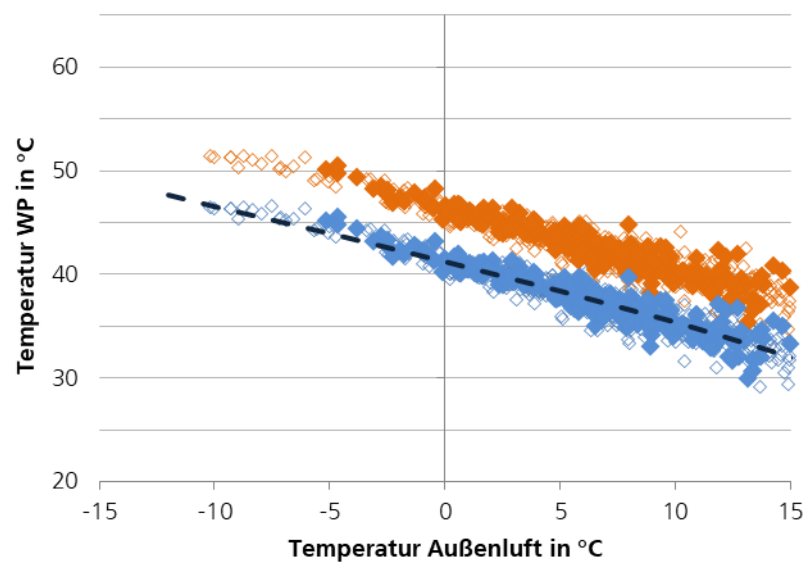


Abbildung 4: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 306 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr:	1974	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus	
beheizte Fläche:	300 m ²	
Energetischer Gebäudezustand:	k.A.	

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Ölkessel: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 50 % Heizkörper (OG, KG), 50 % FBH (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	62 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	3,9
T_WP_Heizkreis: mittel	34,1 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	0 %
		Kesselnutzungsgrad	-
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	5 % / 0 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	0 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Wärmedämmung (keine Spezifikation vorhanden)
Fenster	Austausch (keine Spezifikation vorhanden)
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	Austausch des vorhandenen Heizsystems durch FBH und Heizkörper
Wärmeerzeuger	2015: Einbau Öl-Hybrid Wärmepumpe

Kommentar

Die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung ist nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

ID 307

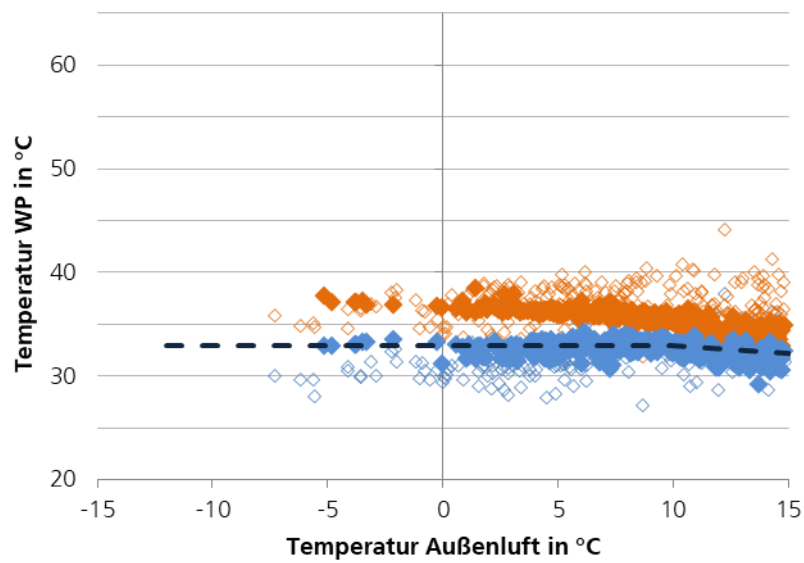


Abbildung 5: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 307 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr:	1972	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss, beheiztem Dachgeschoss sowie teilbeheiztem Keller	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 163 m²			

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2017
Wärmequelle WP	Außenluft, Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf) Kaminofen: RH (im Wohn- und Esszimmer) Elektr. WW-Boiler: TWE
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	98 kWh/(m²a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	3,8
T_WP_Heizkreis: mittel	41,9 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand (2017 erdreichberührende Kellerwände: 60 – 100 mm Dämmung (PS))
Fenster	2011: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2018: 160 mm Zwischensparren-, 20 mm Untersparrendämmung
Wärmeübergabesystem	2017: Einbau Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2005: Einbau elektr. WW-Boiler 2017: Austausch Nachtspeicherheizung (Bj. 1972) durch Wärmepumpen

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Nach Auskunft der Bewohner lag der Verbrauch an Holz für den Kaminofen im Vorjahr bei rund 6 RM Buche/Jahr.

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

ID 308

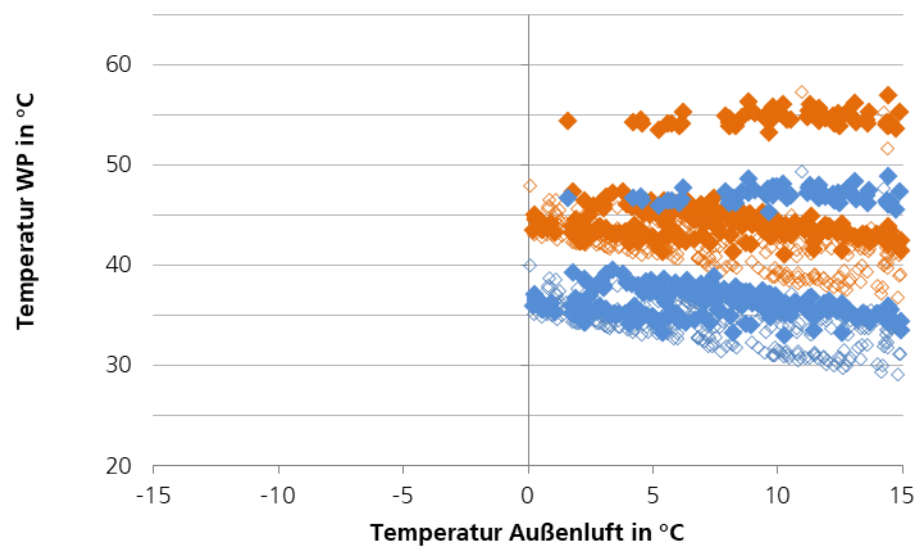


Abbildung 6: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 308 (Inverter geregelte WP; Heizkörper);

Basisinfos

Baujahr:	2000	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Doppelhaushälfte mit einem Vollgeschoss, beheiztem Dachgeschoss sowie beheiztem Keller	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche:	143 m²	Gebäude Dach Wand Fenster	Gebäude Dach Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2018
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 93 % FBH, 7 % FBH und Handtuchheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2017 bis Juni 2018

Spez. Heizwärmeverbrauch	44 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,6
T_WP_Heizkreis: mittel	27,0 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,4 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	46,1 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	30 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2006: Austausch Gaskessel (Bj. 2000) durch Wärmepumpe 2016 und 2018: Austausch Wärmepumpe

Kommentar

Ausgehend von den sehr geringen mittleren Heizkreistemperaturen von 27,0°C ist die JAZ von 3,6 vergleichsweise gering. Diese wird im Vergleich zu den übrigen Anlagen u.a. negativ vom hohen Energieanteil zur TWE (30 %) und einer relativ geringen Norm-Leistungszahl beeinflusst.

ID 309

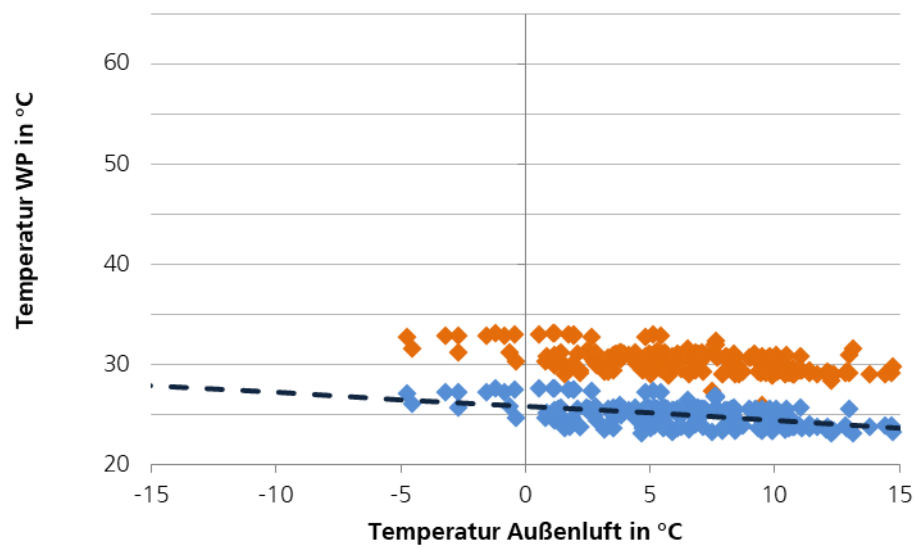


Abbildung 7: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 309 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; FBH und Handtuchheizkörper)

Basisinfos

Baujahr: 1990

Beschreibung: Freistehendes Mehrfamilienhaus mit drei Wohnungen; alle Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 423 m²

Energetischer Gebäudezustand: k.A.

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Solarthermie: TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 12 % Heizkörper, 88 % FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	88 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP+HS)	4,4
T_WP_Heizkreis: mittel	37,9 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS: mittel	44,3 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	5 %
Deckungsbeitrag Solar: RH / TW	- / 70 %		

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Keine Angabe
Fenster	Keine Angabe
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	Keine Angabe
Wärmeerzeuger	2014: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

--

ID 310

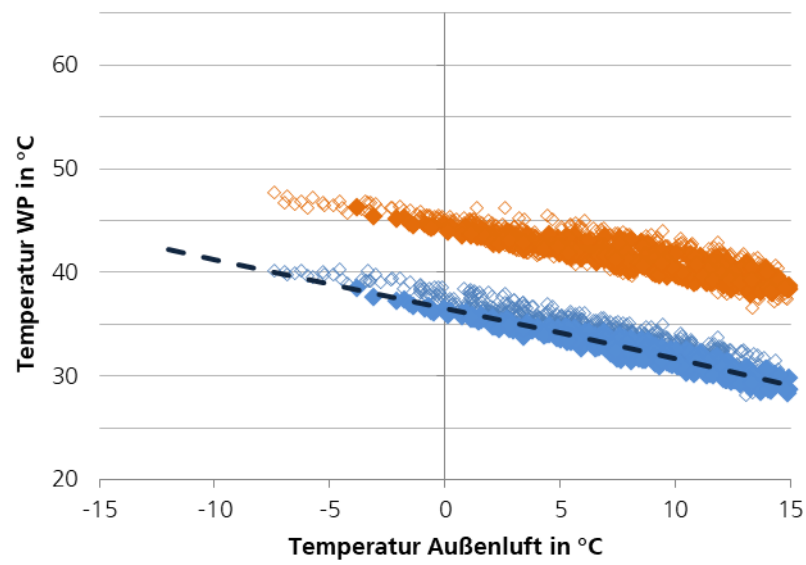


Abbildung 8: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 310 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1976

Beschreibung: Doppelhaushälfte mit einem Vollgeschoss, beheiztem Dachgeschoss sowie teilweise beheiztem Keller

beheizte Fläche: 127 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2016
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 14 % Plattenheizkörper (KG), 86 % FBH (EG, DG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	120 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,5
T_WP_Heizkreis: mittel	33,1 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	1 % / 2 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	45,9 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	19 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand, außer Vorbau im EG: 2019: 200 mm Dämmung (außen)
Fenster	Originalzustand
Dach	2017: 120 mm Dämmung (GW)
Wärmeübergabesystem	2017: Austausch Plattenheizkörper, Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2016: Austausch Gaskessel durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Kaminofen, der in der Garage eingebaut ist und über den senkrechten Durchzug Wohn-/Esszimmer (EG) und Schlafzimmer (DG) mit beheizen kann, wird nach Angabe der Bewohner „an Wochenenden genutzt“ und hat von Herbst 2018 bis Mitte Januar 2019 2,5 Raummeter Holz verbraucht.

ID 313

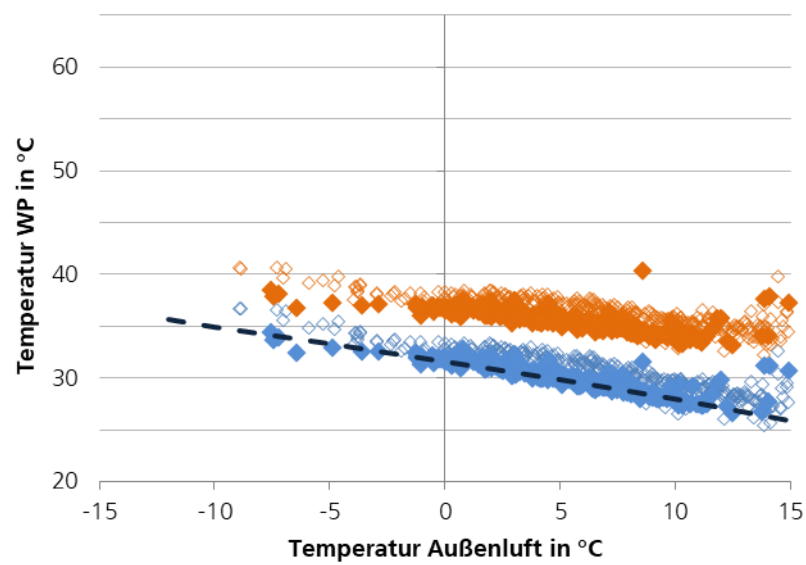


Abbildung 9: Vorlauf- und Rücklauf-temperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 313 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1987 (1930)

Beschreibung: Freistehendes Doppelhaus mit zwei Vollgeschossen und teilbeheiztem Dachgeschoss; beide Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 320 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand	Istzustand			
k.A.	<table border="1"> <tr> <td>Dach</td> </tr> <tr> <td>Wand</td> </tr> <tr> <td>Fenster</td> </tr> </table>	Dach	Wand	Fenster
Dach				
Wand				
Fenster				

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2017
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 75 % Plattenheizkörper (OG, DG), 25 % FBH (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	102 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,2
T_WP_Heizkreis: mittel	38,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	53,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	26 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand (Vorderhaus: 1987; Hinterhaus: 1930)
Fenster	1988: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	Vorderhaus: Originalzustand (1987) Hinterhaus: 1988: 120 mm Zwischensparren- (SW), 25 mm Untersparrendämmung (PS)
Wärmeübergabesystem	Originalzustand (1988)
Wärmeerzeuger	2017: Austausch Gaskessel (Bj. 1988) durch Wärmepumpe

Kommentar

Das Objekt besteht aus zwei Gebäudeteilen (Vorderhaus und Hinterhaus). Das Vorderhaus wurde im Jahr 1987 abgerissen und auf das bestehende Kellergeschoss neu aufgebaut. Das Hinterhaus diente zuvor als Stallung (Bj 1930) und wurde im Jahr 1988 zu einem Wohngebäude ausgebaut und saniert. Im Vorderhaus ist das DG nicht beheizt. Im Hinterhaus ist das EG (Garage) nicht beheizt, jedoch das DG.

ID 315

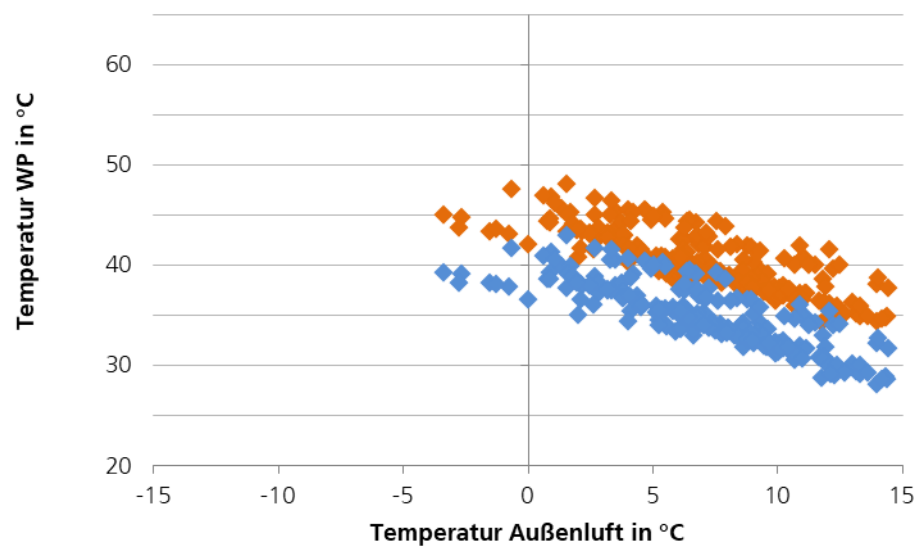


Abbildung 10: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 315 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr:	1979	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss, beheiztem Dachgeschoss sowie teilbeheiztem Keller	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 275 m²		Dach Gebäude Wand Fenster	Dach Gebäude Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Eisspeicher
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH, TWE Holzofen: RH (EG)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 49 % Rippen- und Plattenheizkörper, 51 % FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	116 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,6
T_WP_Heizkreis: mittel	35,0 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	3 % / 2 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	47,7 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	14 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	3-fach Verglasung (Holzverbundfenster)
Dach	2012: 160 mm Dämmung (PUR)
Wärmeübergabesystem	2012: Erneuerung Wärmeübergabesystem im DG
Wärmeerzeuger	2013: Einbau Wärmepumpe und Holzofen

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Holzofen steht im offenen Raumverbund des EG und wird nach Angabe der Bewohner „bei Außenlufttemperaturen unter 0°C regelmäßig in Betrieb“ genommen. Der Verbrauch an Holz liegt nach Angabe der Bewohner im Mittel bei 3 bis 4 Festmeter pro Jahr.

ID 316

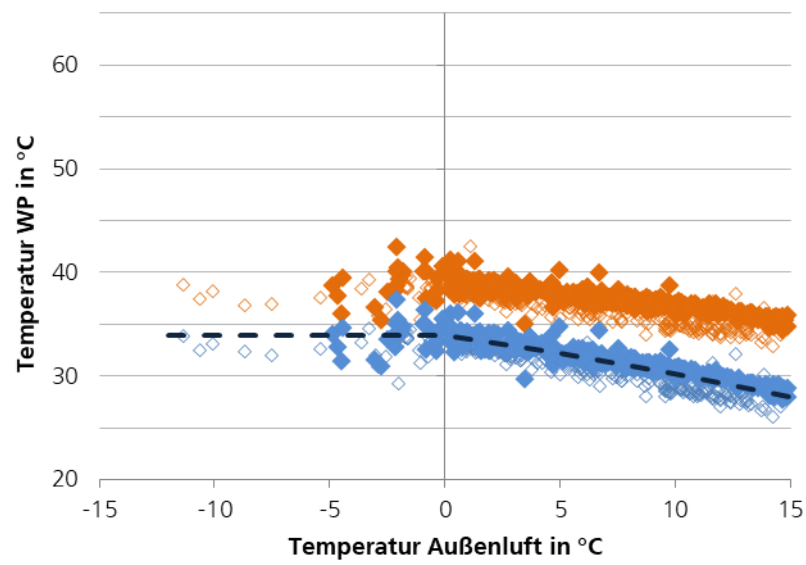


Abbildung 11: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 316 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1986

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen, beheiztem Dachgeschoss sowie teilbeheiztem Keller

beheizte Fläche: 176 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft, Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 67 % FBH (EG, OG), 28 % Platten- und Gliederheizkörper (DG), 5 % FBH und Handtuchheizkörper (Bad OG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	99 kWh/(m²a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	4,9
T_WP_Heizkreis: mittel	29,9 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Ölkessel (Bj. 1986) durch Wärmepumpen

Kommentar

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

ID 317

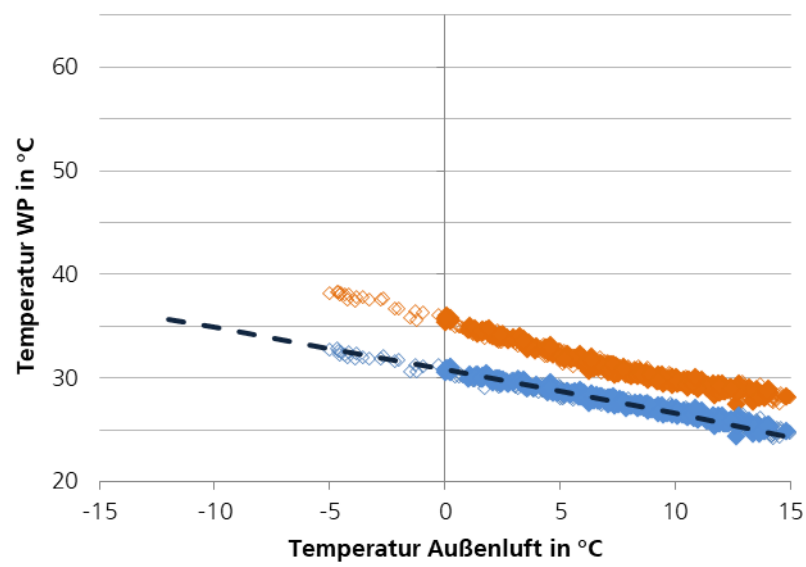


Abbildung 12: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 317 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1828 (1940)
 Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss im Fachwerkhaus (1828) sowie zwei Vollgeschossen im Anbau (1940)

beheizte Fläche: 210 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Dach	Dach
Gebäude Wand	Gebäude Wand
Fenster	Fenster



Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft, Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH; Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Holzofen: RH
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 55 % Plattenheizkörper (Anbau), 45 % FBH (Fachwerk)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	131 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	2,3
T_WP_Heizkreis: mittel	45,7 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	18 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	1982: 100 mm Dämmung (MW, innen) (Fachwerkhaus)
Fenster	1982: 2-fach Isolierverglasung (50 % Fachwerkhaus) 2015: 2-fach Wärmeschutzverglasung (50 % Fachwerkhaus, 100 % Anbau)
Dach	2014: 200 mm Dämmung oberste Geschossdecke (MW) (Fachwerk und Anbau)
Wärmeübergabesystem	1982: Einbau FBH (Fachwerk) 2014: Einbau Heizkörper (Anbau)
Wärmeerzeuger	2014: Einbau Wärmepumpe als Ersatz für Nachtspeicherheizung (Anbau) bzw. wasserführenden Kaminofen (Fachwerk)

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Nach Angabe der Bewohner wird der Holzofen „regelmäßig genutzt“ und rund 10 RM Holz/Jahr verbraucht.

Trinkwassererwärmung erfolgt über separater Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

Die Anlage erreicht eine vergleichsweise geringe JAZ von 2,3. Diese ist u.a. auf die höchsten mittleren Heizkreistemperaturen aller untersuchten Außenluft-Wärmepumpen, dem signifikanten Einsatz des Elektroheizstabes (18 %, zwischen Februar und Mai 2019 bei Außenlufttemperaturen zwischen 6°C und 20°C) und einer relativ geringen Norm-Leistungszahl zurückzuführen.

ID 318

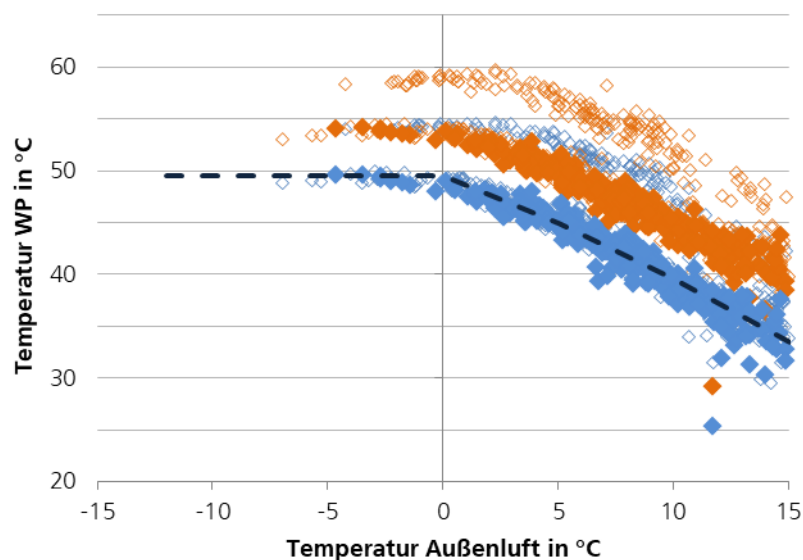


Abbildung 13: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 318 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Vermutlich wurde eine deutlich Anpassung der Heizkurve – Absenkung um ca. 5K – vorgenommen.

Basisinfos

Baujahr: 1930

Beschreibung: Freistehendes Mehrfamilienhaus mit zwei Wohnungen; nur eine Wohnung wird mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 115 m²

Energetischer Gebäudezustand: k.A.

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2010
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	44 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,8
T_WP_Heizkreis: mittel	32,1 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,1 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	47,8 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	42 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Keine Angabe
Fenster	Keine Angabe
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	Keine Angabe
Wärmeerzeuger	2010: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

Gemessen an den vergleichsweise geringen mittleren Heizkreistemperaturen wäre eine höhere JAZ zu erwarten gewesen. Bei dieser Anlage ist jedoch der Wärmeanteil zur TWE mit 42 % am höchsten, verglichen mit allen hier untersuchten Wärmepumpen. Ein entsprechend größeres Gewicht im Hinblick auf die Effizienz bekommen die im Mittel zur TWE erforderlichen 47,8 °C.

ID 319

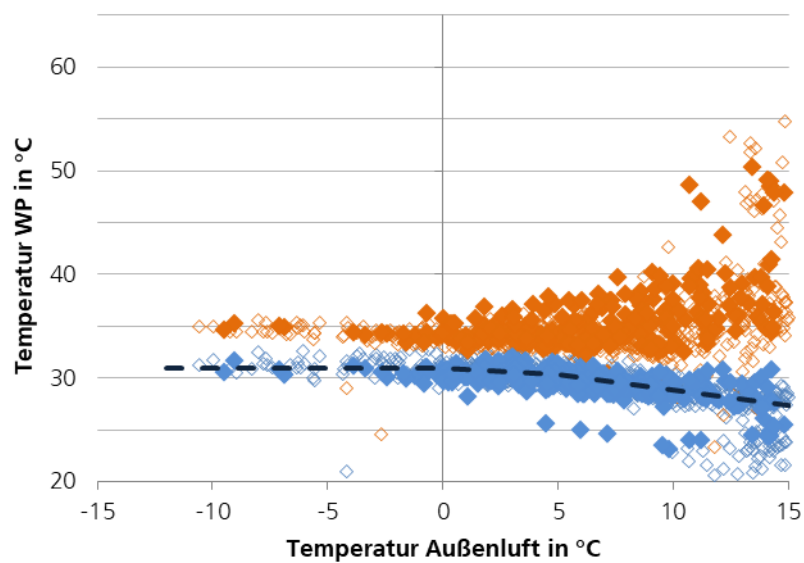


Abbildung 14: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 319 (Inverter geregelte WP; FBH). Kommentar: Die Temperatur ist vermutlich rücklauftemperaturgeregelt. Der Volumenstrom sinkt bei der Anlage mit steigender Außenlufttemperatur, so dass die Spreizung deutlich steigt.

Basisinfos

Baujahr:	1956	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 91 m ²		Gebäude Dach Wand Fenster	Gebäude Dach Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	129 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,2
T_WP_Heizkreis: mittel	37,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,4 % / 4 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	46,3 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	17 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2015: 80 mm Dämmung (WDVS) (außen)
Fenster	2015: 2-fach / 3-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2015: 160 mm Zwischensparrendämmung (MW)
Wärmeübergabesystem	2015: Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Badeofen, Dauerbrandofen und Ofen „Berliner Typ“ durch Wärmepumpe

Kommentar

--

ID 321

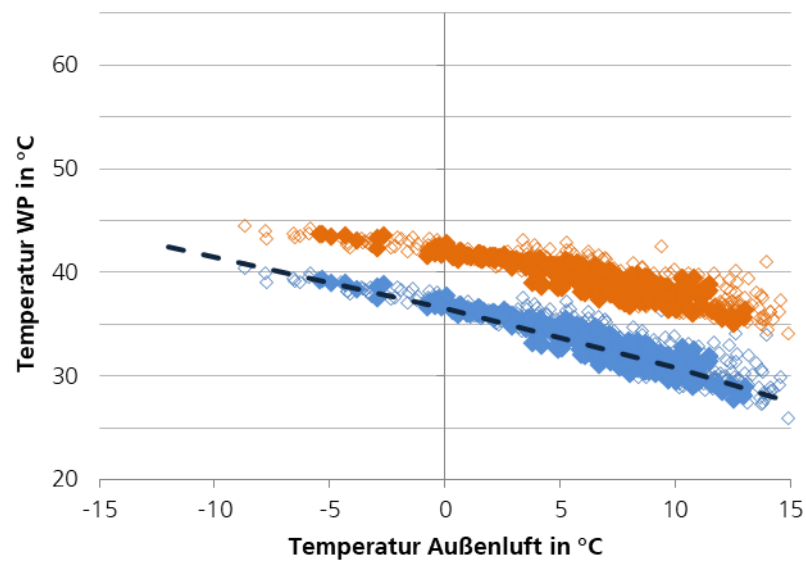


Abbildung 15: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 321 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; FBH)

Basisinfos

Baujahr:	1976
Beschreibung:	Freistehendes Zweifamilienhaus; beide Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt
beheizte Fläche:	230 m ²
Energetischer Gebäudezustand:	
Originalzustand	Istzustand
Gebäude	Dach
	Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2010
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Heizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	55 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,3
T_WP_Heizkreis: mittel	34,9 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	46,1 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	19 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2011: 140 mm Dämmung (EPS, WLG 035) (außen)
Fenster	2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2011: 160 mm Dämmung (MW), 60 mm Holzfaserdämmplatte; Oberste Geschossdecke: 30 mm Dämmung
Wärmeübergabesystem	Keine Angabe
Wärmeerzeuger	2010: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

ID 322

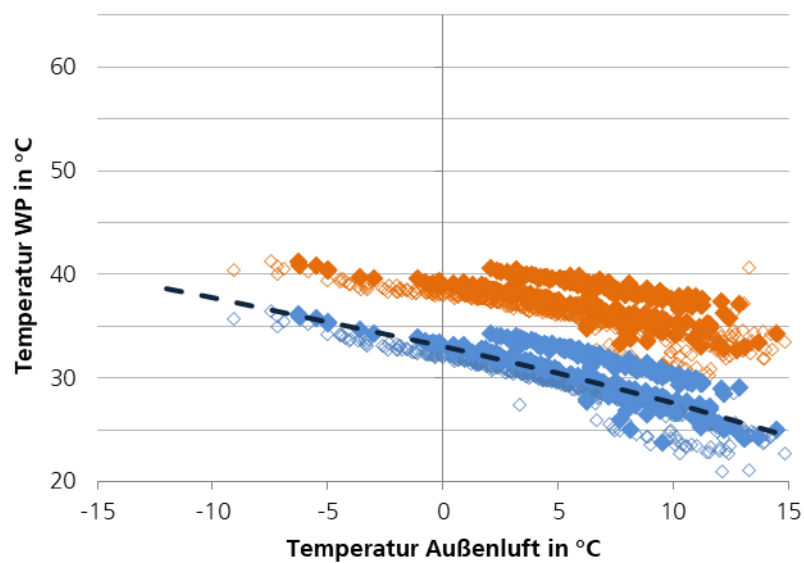


Abbildung 16: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 322 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper). Kommentar: die Heizkurve wurde während der Projektlaufzeit häufiger geändert (auch einmal während der Auswertungsperiode im Februar 2019)

Basisinfos

Baujahr:	1952	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 210 m²		Dach Gebäude Wand Fenster	Dach Gebäude Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Holzofen: RH (2 Öfen; Bad und offener Wohnbereich)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	61 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,6
T_WP_Heizkreis: mittel	30,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,1 % / 6 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	47,1 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	17 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2015: 200 mm Dämmung (WDVS, WLG 032) (außen)
Fenster	2015: 3-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2015: 140-180 mm Dämmung (MW), 60 mm Holzfaserplatte
Wärmeübergabesystem	2014: Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Nachtspeicherheizung (Bj. 1970/1980) durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Holzofen im Wohnbereich wird nach Auskunft der Bewohner „an den Wochenenden im Winter regelmäßig“ und der Holzofen im Bad „nur sehr selten“ genutzt. Der Holzverbrauch (Buche) liegt nach Bewohnerangaben bei rund 3 Schüttraummeter pro Jahr.

Der Heizstabbetrieb zur TWE ist zu 99 % auf die einmal wöchentlich ausgeführte zusätzliche Erwärmung des Trinkwarmwassers zur Legionellenvermeidung zurückzuführen.

ID 323

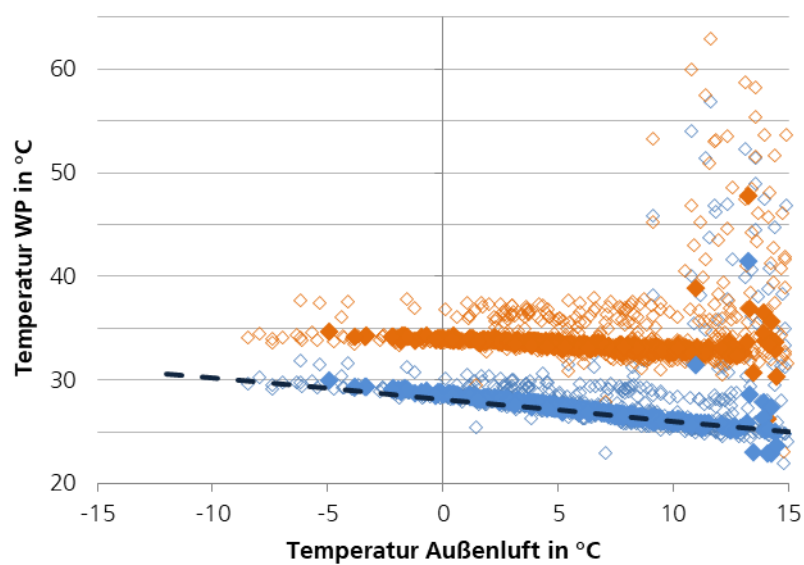


Abbildung 17: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 323 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; FBH). Kommentar: die hohen Temperaturen in der Übergangsperiode sind möglicherweise auf Umschaltvorgänge Trinkwassererwärmung/Raumheizung zurückzuführen.

Basisinfos

Baujahr: 1990

Beschreibung: Freistehendes Haus mit zwei Wohnungen: ein Vollgeschoss und zwei beheizte Dachgeschosse; beide Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 240 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Schwedenofen: RH (Wohnzimmer im EG)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	88 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	4,4
T_WP_Heizkreis: mittel	38,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	4 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	52,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	12 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2015: Austausch von vier Plattenheizkörpern
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Ölkessel durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Holzverbrauch des Schwedenofens liegt nach Auskunft der Bewohner bei ca. 3 – 4 Ster pro Jahr.

Nur bei dieser Erdreich-Wärmepumpe wurde Heizstabbetrieb mit signifikantem Anteil gemessen. Der Heizstab dieser Anlage wurde im Januar 2019 über drei Tage, ohne erkennbare Korrelation zur Außenlufttemperatur, im Modus RH betrieben, während die Wärmepumpe nicht in Betrieb war.

ID 324

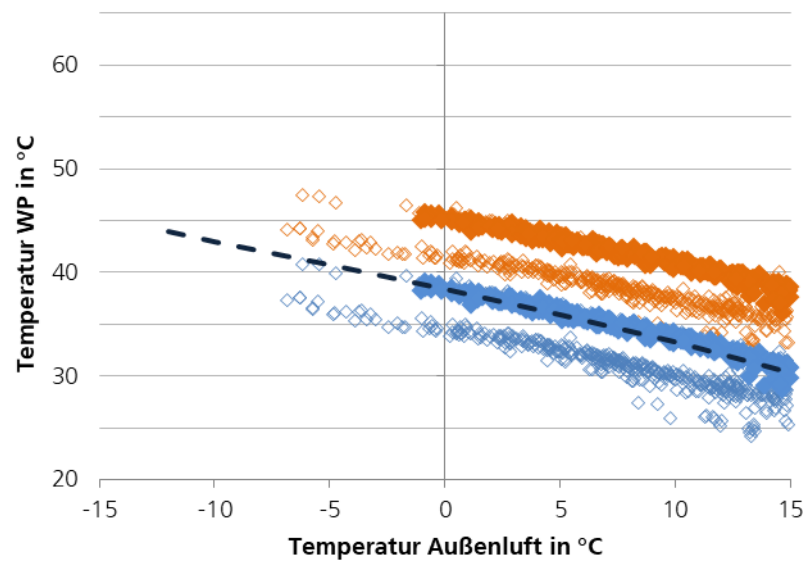


Abbildung 18: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 324 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper). Kommentar: a) Die Heizkurve wurde vermutlich im Februar 2018 erhöht. b) Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr: 1976

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss

beheizte Fläche: 282 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand	Istzustand
-----------------	------------

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 77 % Heizkörper (EG, DG, KG), 9 % FBH (EG), 13 % Heizkörper und FBH (EG); Heizkörper sind teils Platten- und teils Gliederheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	99 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,9
T_WP_Heizkreis: mittel	39,5 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	43,9 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	24 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	1996: 140 mm Zwischensparrendämmung (PS); Oberste Geschossdecke: 40 mm Dämmung (PS)
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2013: Austausch Öl-/ Holzkessel (Bj. 1976) durch Wärmepumpe

Kommentar

ID 325

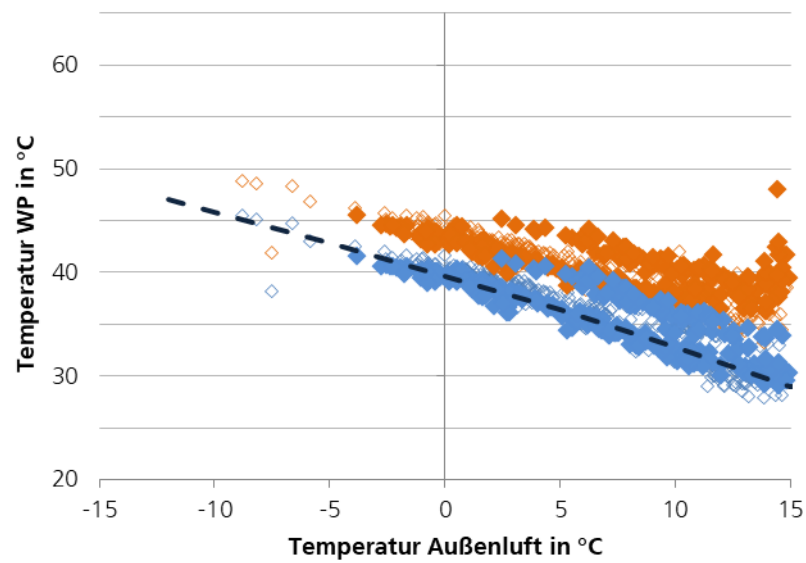


Abbildung 19: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 325 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH). Die Heizkurve wurde vermutlich im März 2019 geändert.

Basisinfos

Baujahr:	1970	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheizten Dachgeschoss	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche:	140 m ²	Dach Gebäude Wand Fenster	Dach Gebäude Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2006 (Heizungswärmepumpe) bzw. 2001 (Brauchwasser-Wärmepumpe)
Wärmequelle WP	Außenluft; Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf) Kaminofen: RH (Küche)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 93 % Gliederheizkörper, 7 % Gliederheizkörper und FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	107 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	2,2
T_WP_Heizkreis: mittel	40,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	3 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2002: nur neuer Putz
Fenster	2002: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2002: 200 mm Dämmung; oberste Geschossdecke: 50 mm Dämmung
Wärmeübergabesystem	2006: Austausch Heizkörper 2007: Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2001: Ersatz Ölkessel durch Heizungswärmepumpe und Brauchwasser-Wärmepumpe 2006: Austausch Heizungswärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Kaminofen, mit dem sich nur die Küche heizen lässt, wird nach Auskunft der Bewohner „selten“ genutzt.

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

Bei dieser Wärmepumpe mit einer vergleichsweise geringen JAZ 3_HK von 2,2 handelt es sich um ein älteres Gerät von 2006 mit sehr geringer Norm-Leistungszahl. Darüber hinaus wird die JAZ 3_HK negativ vom Heizstabbetrieb sowie der im Mittel – verglichen mit den übrigen Außenluft-Wärmepumpen - geringsten Außenlufttemperatur während des Betriebs von 1,3°C beeinflusst.

ID 326

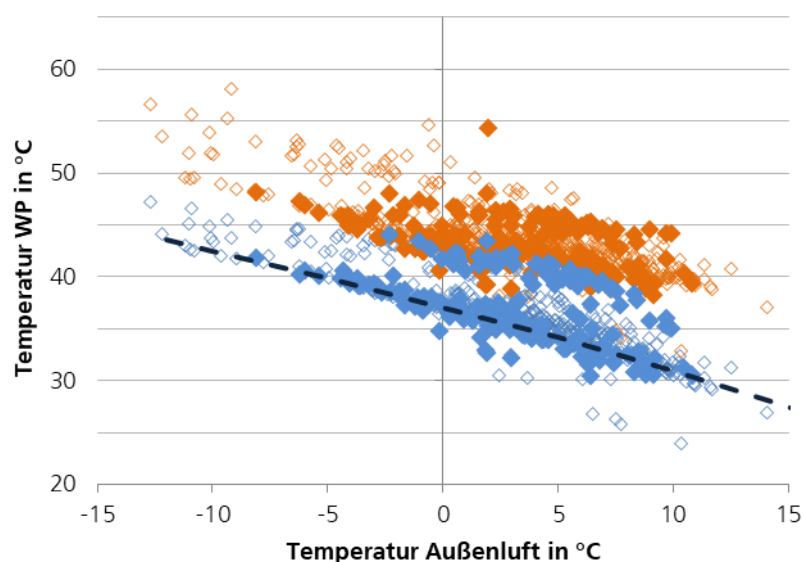


Abbildung 20: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 326 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH). Kommentar: Im Februar 2019 wurde vermutlich die Heizkurve erhöht. Zudem ist seit dem der Volumenstrom höher und damit die Spreizung geringer.

Basisinfos

Baujahr:	1937	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche:	153 m ²	Gebäude Dach Wand Fenster	Gebäude Dach Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH Elektr. Durchlauferhitzer: TWE
Wärmeübergabesystem	Gebläsekonvektoren

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	207 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,0
T_WP_Heizkreis: mittel	39,1 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,1 % / 1 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	42,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	9 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2015: 2-fach/ 3-fach-Verglasung
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2015: Einbau Gebläsekonvektoren
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Nachtspeicherheizung durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Zum Umfang der Nutzung des Kaminofens liegen keine Informationen vor.

ID 327

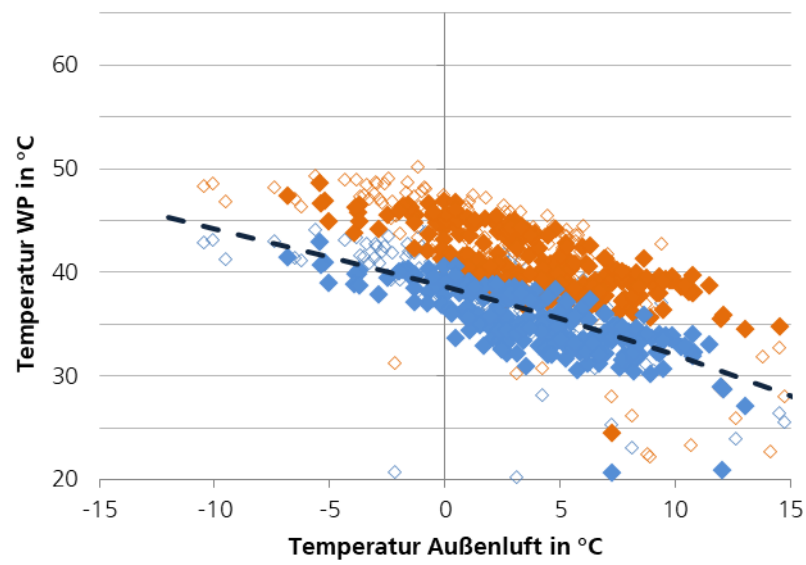


Abbildung 21: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 327 (WP mit Leistungsstufen; Gebläsekonvektor)

Basisinfos

Baujahr:	1900*
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen sowie beheiztem Dachgeschoss
beheizte Fläche:	250 m²
Energetischer Gebäudezustand:	
Originalzustand	Istzustand
Dach	Dach
Gebäude Wand	Gebäude Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2011
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	60 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	4,7
T_WP_Heizkreis: mittel	31,2 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	21 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2009*: OG, DG: 160 mm Dämmung (SW) (innen); EG: teils 120mm Formglas (innen), teils 300 mm Poroton-Planstein
Fenster	2009: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2009: 200 mm Dämmung (MW)
Wärmeübergabesystem	2011: Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2011: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

*Das ehemalige Wirtschaftsgebäude wurde von 2009 bis 2012 zu einem Wohnhaus umgebaut.

Die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung war aufgrund einer kompakten Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl getrennt für die beiden Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

Diese Wärmepumpe stellt – für die Anlagengruppe der Erdreich-Wärmepumpen - die im Mittel geringsten mittleren Temperaturen zur Raumheizung in Höhe von 31,2°C bereit, was sich entsprechend positiv auf die JAZ auswirkt, die gleichzeitig die höchste aller hier untersuchten Erdreich-Wärmepumpen ist.

ID 328

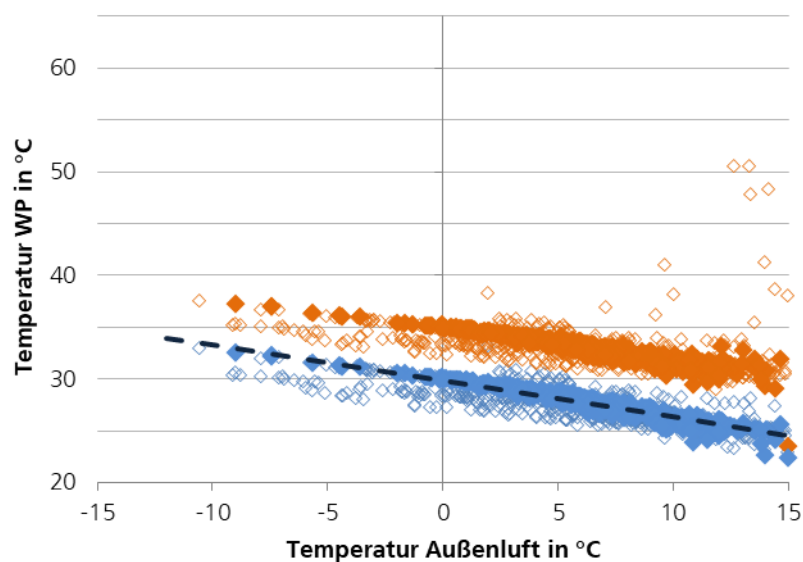


Abbildung 22: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 328 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1955

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und zwei beheizten Dachgeschossen

beheizte Fläche: 131 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Dach

Gebäude Wand

Fenster

Dach

Gebäude Wand

Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 89 % Plattenheizkörper, 11 % FBH (Wintergarten, Bad in DG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	68 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,1
T_WP_Heizkreis: mittel	37,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	46,3 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	23 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2014: 140 mm Dämmung (PS) (außen)
Fenster	2014: 3-fach-Verglasung (Kunststoffrahmen)
Dach	2014: 160 mm Aufsparrendämmung (PU-Schaum); Oberste Geschossdecke: 80 - 100 mm Dämmung (GW)
Wärmeübergabesystem	2014: Austausch der Heizkörper (Bj 1980) durch Plattenheizkörper, Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Gaskessel (Bj. 1980), Holzofen (Bj. 1955) und Durchlauferhitzer durch Wärmepumpe

Kommentar

Der Spitzboden wurde Ende 2018 / Anfang 2019 ausgebaut und ab Anfang 2019 beheizt.

ID 329

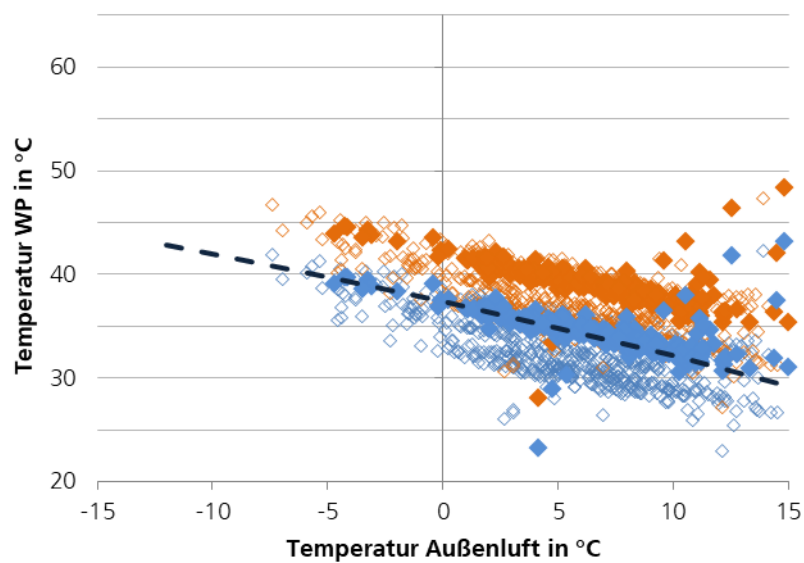


Abbildung 23: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 329 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Die Heizkurve wurde während der Messperiode, nicht aber während der Auswertungsperiode, vermutlich mehrfach geändert.

Basisinfos

Baujahr: 1971

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und einem beheiztem Dachgeschoss

beheizte Fläche: 195 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand	Istzustand
Gebäude	Gebäude
Dach	Dach
Wand	Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Konvektoren

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	137 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,9
T_WP_Heizkreis: mittel	43,1 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,1 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	45,1 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	14 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Überwiegend Originalzustand 2018: nur Giebel: 40 mm Dämmung (EPS) (außen)
Fenster	Überwiegend Originalzustand (2018: 1 Fenster: 3-fach-Verglasung)
Dach	2018: 100 mm Untersparrendämmung (MW), Wand zw. Dachschräge und Dachraum: 60 mm Dämmung (EPS) Oberste Geschossdecke: 140 mm Dämmplatte (EPS)
Wärmeübergabesystem	Austausch vorhandener Heizkörper durch Konvektoren
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Ölkessel (Bj. 1969) durch Wärmepumpe

Kommentar

Verglichen mit den übrigen Außenluft-Wärmepumpen stellt diese Wärmepumpe mit 43,1 °C die im Mittel höchste mittlere Temperatur zur Raumheizung bereit.

ID 330

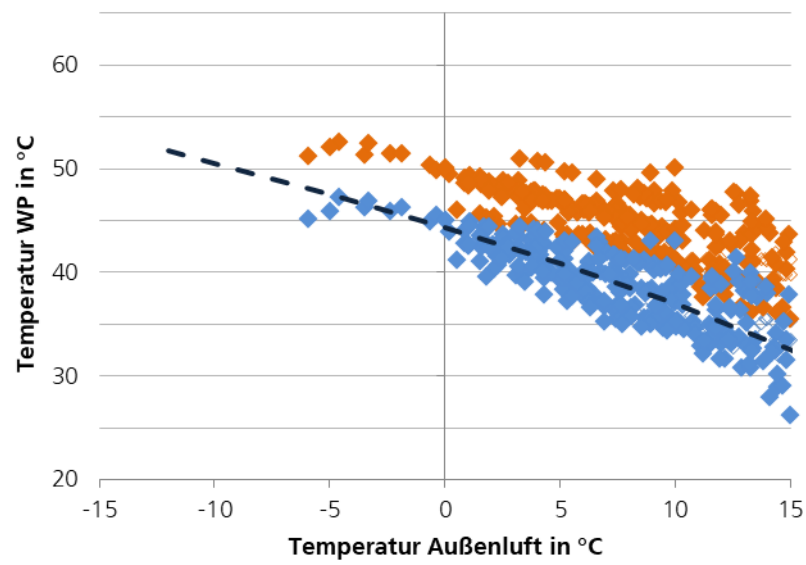


Abbildung 24: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 330 (Inverter geregelte WP; Konvektor).

Basisinfos

Baujahr:	1930
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und beheiztem Dachgeschoss
beheizte Fläche:	180 m ²
Energetischer Gebäudezustand:	
Originalzustand	Istzustand
Gebäude	Gebäude
Dach	Dach
Wand	Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2016
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 44 % Heizkörper (OG), 56 % FBH (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	90 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,8
T_WP_Heizkreis: mittel	40,5 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	25 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2000: 100 mm Dämmung (PS) (außen)
Fenster	2000: 2-fach-Verglasung mit Holzrahmen (Wärmeschutz)
Dach	2000: 160 mm Dämmung (SW)
Wärmeübergabesystem	2000: Einbau von FBH und Heizkörpern
Wärmeerzeuger	2000: Ersatz Etagenheizung (Holz, Kohle) durch Ölkessel 2016: Ersatz Ölkessel (Bj. 2000) durch Wärmepumpe

Kommentar

--

ID 331

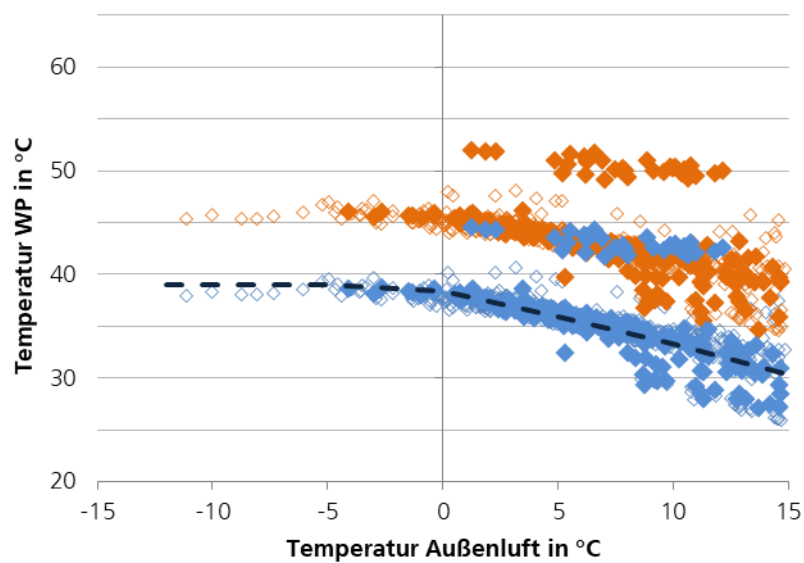


Abbildung 25: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 331 (fixed-speed Sole/Wasser- WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Die Heizkurve wurde vermutlich für einen Zeitraum von rund 4 Wochen Ende Oktober / Anfang November 2019 signifikant erhöht.

Basisinfos

Baujahr:	1953 (mit Anbau von 2005)
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss
beheizte Fläche:	186 m ²
Energetischer Gebäudezustand:	
Originalzustand	Istzustand
Dach	Dach
Gebäude Wand	Gebäude Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 88 % FBH, 9 % Heizkörper (KG), 3 % FBH und Heizkörper (Flur)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	96 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	4,5
T_WP_Heizkreis: mittel	32,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0,1 % / 0,1 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	48,6 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	9 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2005: 120 mm Dämmung (PS) (außen)
Fenster	2005: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2005: 140 mm Dämmung (MW)
Wärmeübergabesystem	2005: Einbau FBH und Heizkörper als Ersatz für Öl-Einzelöfen
Wärmeerzeuger	2005: Austausch Öl-Einzelöfen und Holzofen durch Wärmepumpe 2013: Austausch Wärmepumpe

Kommentar

--

ID 333

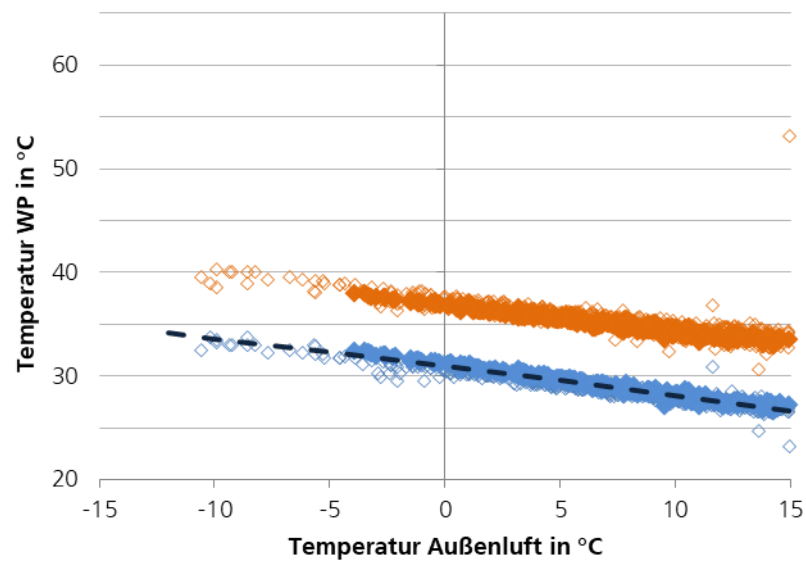


Abbildung 26: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 333 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1985

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie zwei beheizten Räumen im Dachgeschoss

beheizte Fläche: 140 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Außenluft, Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Kachelofen: RH
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	84 kWh/(m²a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	3,2
T_WP_Heizkreis: mittel	36,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2013: 140 mm Dämmung (WDVS, EPS) (außen)
Fenster	2013: 3-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2013: Einbau Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2013: Austausch Nachtspeicherheizung (Bj. 1985) durch Wärmepumpen

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Nach Auskunft der Bewohner wird der Kachelofen jedoch „fast nicht mehr genutzt“.

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

ID 336

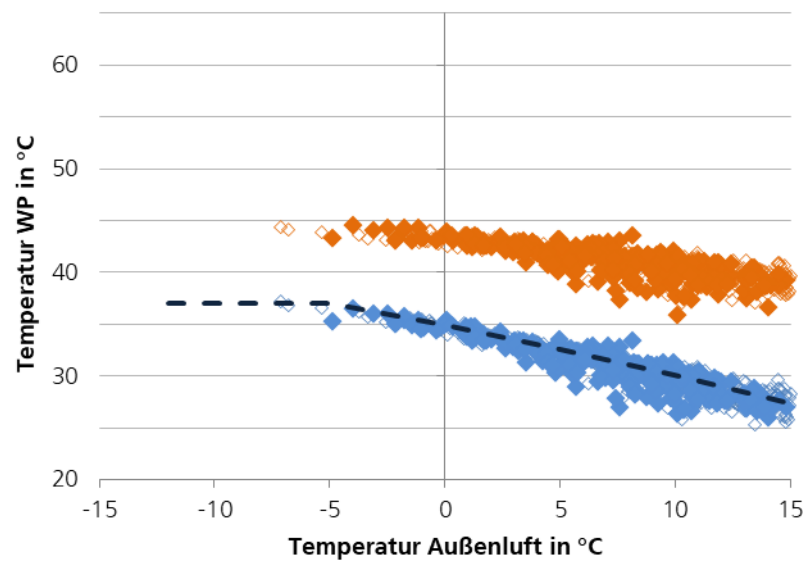


Abbildung 27: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 336 (fixed-speed Aul/Wasser-WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr:	1930	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen, beheiztem Dachgeschoss und beheiztem Keller	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche:	302 m ²	Gebäude	Gebäude
		Dach	Dach
		Wand	Wand
		Fenster	Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH (im offenen Wohnbereich des EG) Solarthermie: TWE
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	50 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP+HS)	4,3
T_WP_Heizkreis: mittel	32,7 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS: mittel	51,4 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	21 %
Deckungsbeitrag Solar: RH / TW	- / 31 %		

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2015: 120 mm Dämmung (PS) (außen, KG-Anbau); 200 mm WDVS (außen, EG-Anbau) (SW); 200 mm WDVS (außen, OG-Anbau) (SW)
Fenster	2015: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	2015: 240 mm Dämmung (SW); oberste Geschossdecke: 240 mm Dämmung (SW)
Wärmeübergabesystem	Austausch Heizkörper durch FBH
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Gaskessel (Bj. 1992) durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der jährliche Holzverbrauch des Kaminofens liegt nach Auskunft der Bewohner bei ca. 2 – 3 Schüttmetern Mischholz pro Jahr.

ID 337

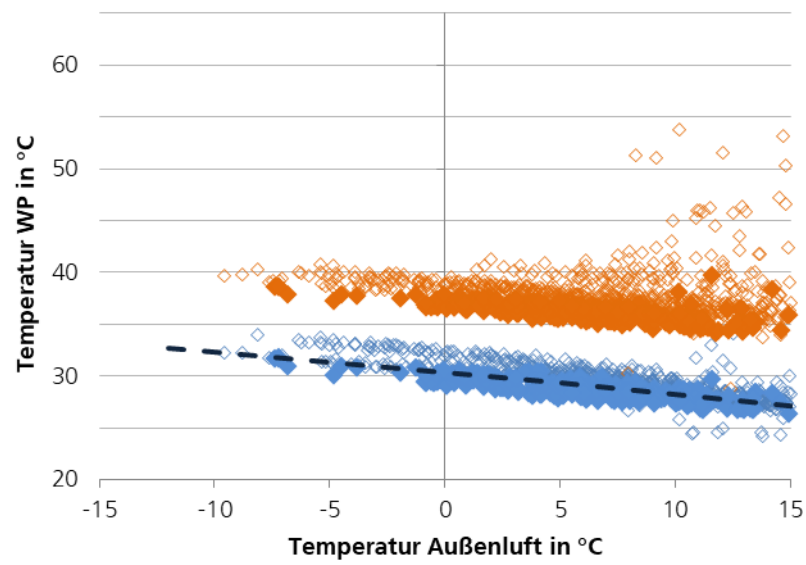


Abbildung 28: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 337 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; FBH).

Basisinfos

Baujahr: 1979
 Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss
 beheizte Fläche: 150 m²
 Energetischer Gebäudezustand: k.A.

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH (im Wohnzimmer)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	102 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,5
T_WP_Heizkreis: mittel	31,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	41,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	10 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Keine Angabe
Fenster	Keine Angabe
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	Keine Angabe
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Nachtspeicherheizung (Blockspeicherheizung mit 6.000 Liter Puffervolumen) durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Nach Auskunft der Bewohner wird der Kaminofen „nur gelegentlich und nicht zur maßgeblichen Deckung des Heizwärmebedarfes verwendet.“

ID 339

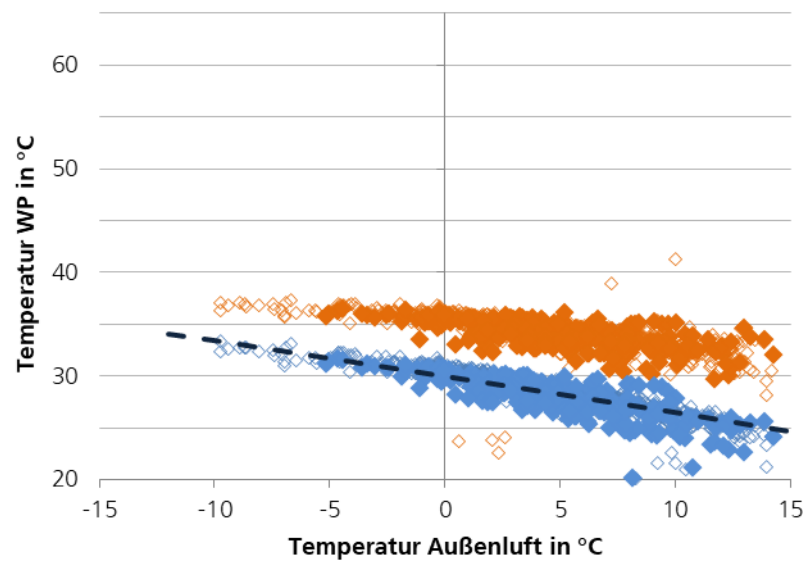


Abbildung 29: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 339 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; FBH)

Basisinfos

Baujahr:	1993
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss
beheizte Fläche:	120 m ²
Energetischer Gebäudezustand:	
Originalzustand	Istzustand
Dach	Dach
Gebäude	Gebäude
Wand	Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 46 % Plattenheizkörper (OG), 54 % FBH (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	115 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,7
T_WP_Heizkreis: mittel	40,5 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	46,5 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	26 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Ölkessel (Bj. 1992) durch Wärmepumpe

Kommentar

Die Wärmepumpen stellen im Schnitt 15 % der Energie zur TWE bereit. Die diesbezügliche Bandbreite reicht bei den Erdreich-Wärmepumpen von 5 % bis zu 26 % bei dieser Anlage. Ein entsprechend größeres Gewicht bekommen die Temperaturen zur TWE bei dieser Anlage im Hinblick auf die Effizienz.

ID 343

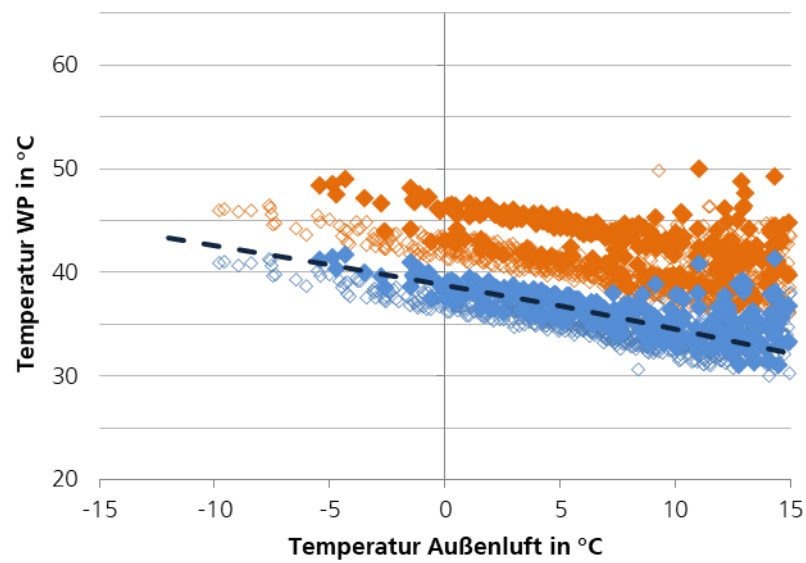
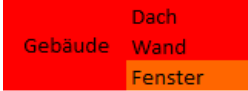


Abbildung 30: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 343 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Mitte Dezember 2019 änderte sich der Volumenstrom deutlich. Möglicherweise ist die Anlage rücklauftemperaturregelt, die Heizkurve wurde nicht angepasst und die geänderte Vorlauftemperatur ist eine Folge des geänderten Volumenstromes und damit der geänderten Spreizung.

Basisinfos

Baujahr:	1956 (mit Anbau von 1974)	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und beheiztem Dachgeschoss im Gebäudeteil von 1956	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 150 m²			

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	139 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,5
T_WP_Heizkreis: mittel	41,0 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	23 % / 0,1 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	46,1 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	5 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2015: 3-fach-Verglasung
Dach	Gebäudeteil 1956: Dämmung zu 75% (MW) Gebäudeteil 1974: Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2015: Einbau Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2015: Ausbau Nachtspeicheröfen; Einbau Wärmepumpe 2016: Ausbau elektr. Durchlauferhitzer

Kommentar

Die vergleichsweise geringe JAZ von 2,5 wird vor allem durch die relative Heizstabarbeit in Höhe von 23 % negativ beeinflusst, die auf eine Abweichung vom Regelbetrieb zurückzuführen ist. Lediglich 1 % der Heizstabarbeit ist auf tiefe Außenlufttemperaturen zurück zu führen. Dem gegenüber traten 74 % dieser Heizstabarbeit aufgrund eines Defektes der Wärmepumpe während der kältesten Woche der Auswerteperiode auf. Die übrigen 25 % der Heizstabarbeit wurden bei moderaten Temperaturen im November 2018 gemessen.

ID 344

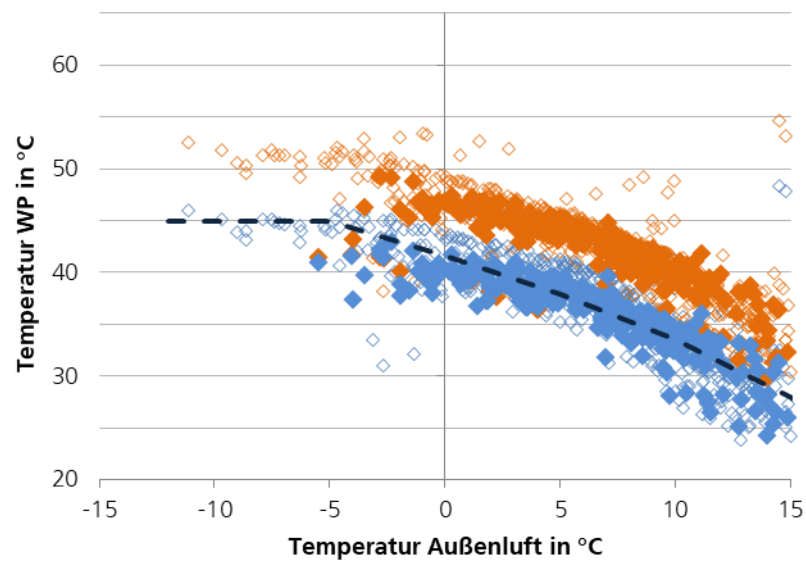


Abbildung 31: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 344 (Inverter geregelte WP; Heizkörper). Kommentar: Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe. (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr: 1978

Beschreibung: Reihenendhaus mit – um ½ Etagenhöhe – versetzter Bauweise auf 6 Ebenen sowie beheiztem Dachgeschoss; Hanglage

beheizte Fläche: 127 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	87 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,1
T_WP_Heizkreis: mittel	31,5 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	50,6 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	28 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2012: 2-fach / 3-fach Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	1989: Erneuerung Dachdämmung wegen Baumängeln
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2014: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

--

ID 345

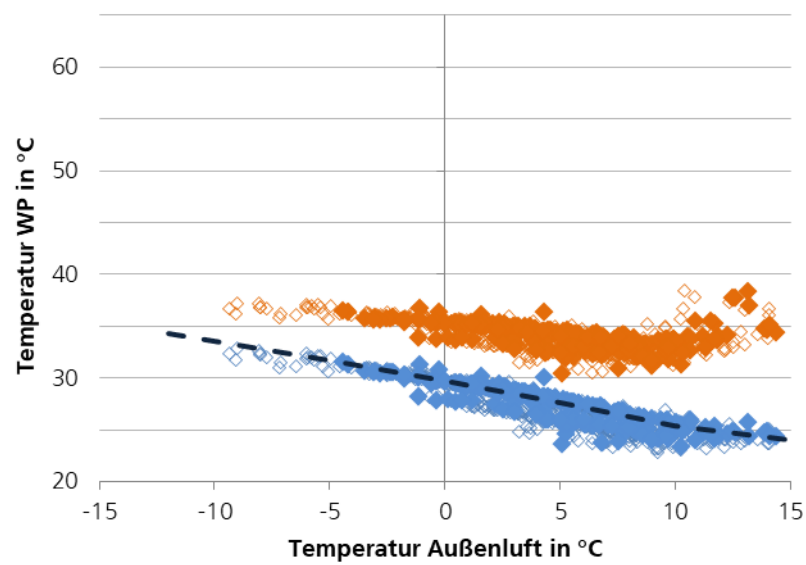


Abbildung 32: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 345 (fixed-speed WP; FBH).

Basisinfos

Baujahr: 1905

Beschreibung: Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen

beheizte Fläche: 175 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Dach
Gebäude Wand
Fenster

Dach
Gebäude Wand
Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Eisspeicher
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Gaskessel: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	69 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,7
T_WP_Heizkreis: mittel	37,9 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS-Beladung: mittel	44 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	16 %
		Kesselnutzungsgrad	-
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	0 % / 0 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	1975: 50 mm Luftschicht, 50 mm Bimsstein
Fenster	2001 - 2005: 3-fach-Verglasung
Dach	2001: oberste Geschossdecke: 200 mm Dämmung (PS)
Wärmeübergabesystem	2014: Austausch Heizkörper (Bj. 1975) durch Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2015: Ergänzung Gaskessel (Bj. 1975) mit Wärmepumpe

Kommentar

ID 346

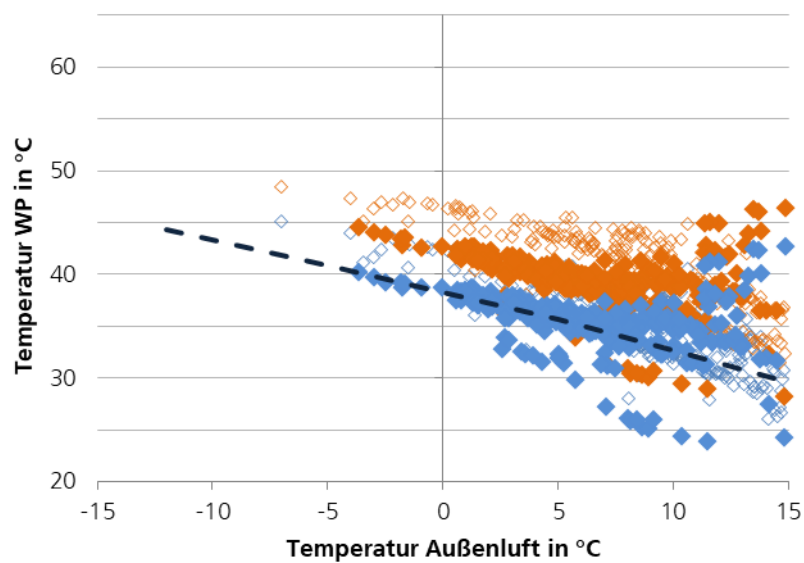


Abbildung 33: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 346 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper). Kommentar: Die Heizkurve wurde vermutlich während der Messperiode mehrfach geändert.

Basisinfos

Baujahr: 1961

Beschreibung: Freistehendes Mehrfamilienhaus mit vier Wohnungen: zwei Vollgeschosse und ausgebautes Dachgeschoss; alle Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 270 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2010
Wärmequelle WP	Außenluft, Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper, Gliederheizkörper und Röhrenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	102 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	1,5
T_WP_Heizkreis: mittel	45,2 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	40 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	1993: 60 mm Dämmung (PS) (außen)
Fenster	1993: 2-fach-Isolierverglasung
Dach	1993: 100 mm Aufsparrendämmung (PUR)
Wärmeübergabesystem	1995: Einbau Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2010 Austausch Gaskessel (Bj. 1995) durch Wärmepumpen

Kommentar

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

Für diese Anlage wurde eine sehr geringe JAZ 3_HK ermittelt. Dies ist zum einen auf die vergleichsweise hohen Temperaturen zur RH und der sehr geringen Norm-Leistungszahl (älteres Gerät von 2009) zurückzuführen, im Wesentlichen jedoch mit grundlegenden Problemen im Gerät und der Wärmesenken-seitigen Hydraulik. Nur geringe Lasten konnten von der Wärmepumpe (bei sehr geringer Effizienz) allein gedeckt werden. Noch in der Übergangszeit musste zusätzlich der Heizstab in Betrieb gehen, wodurch die Effizienz nochmals gesenkt wurde. Anfang 2019 wurden mehrere Komponenten der Wärmepumpe getauscht bzw. repariert und die Sensorik im Pufferspeicher neu positioniert. Die vorgenommenen Änderungen führten im Zeitraum Juli 2019 bis Mai 2020 zu einer AZ von 2,5 bei einem relativem Heizstabanteil von 3,9 %.

ID 348

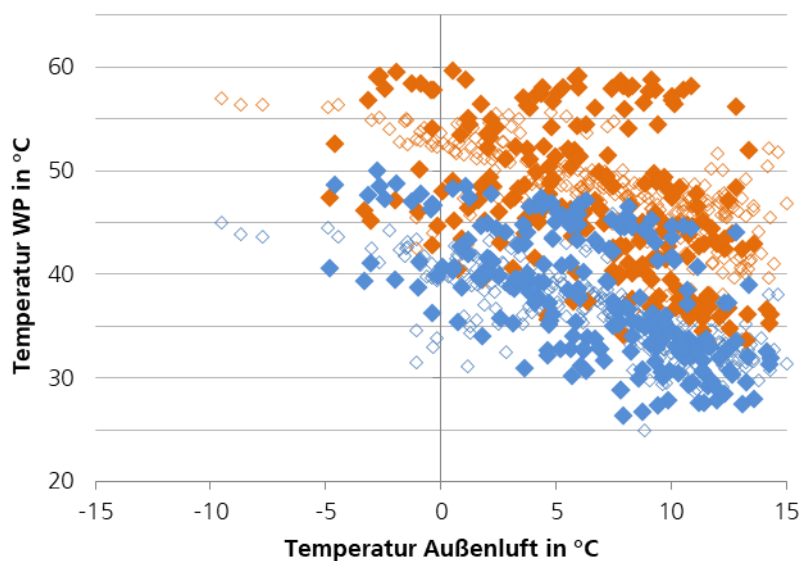


Abbildung 34: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 348 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr: 1962

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen

beheizte Fläche: 160 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand	Istzustand
k.A.	Dach
	Gebäude Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	75 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,3
T_WP_Heizkreis: mittel	31,5 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	49,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	15 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2010: 140 mm Dämmung (WDVS, PUR) (außen)
Fenster	2010: 3-fach-Verglasung
Dach	2017: 140 mm Zwischensparren- (MW), 100 mm Aufsparrendämmung (PIR)
Wärmeübergabesystem	2010: Austausch vorh. Heizkörper durch Plattenheizkörper 2017: Einbau Plattenheizkörpern im Zuge des DG-Ausbaus
Wärmeerzeuger	2010: Austausch Ölkessel (Bj. 1962, Brenneraustausch 1980) durch Wärmepumpe 2014: Austausch Wärmepumpe

Kommentar

ID 349

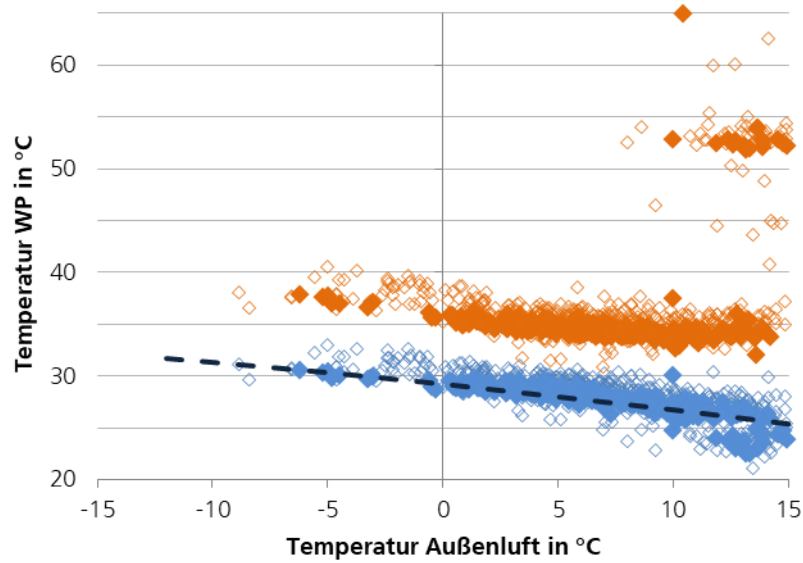
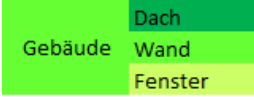
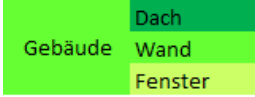


Abbildung 35: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 349 (Inverter geregelte WP; Heizkörper). Kommentar: a) Die große Spreizung in einem Teil der Übergangsperiode ist eine Folge davon, dass der Volumenstrom in der Zeit weniger als ein Zehntel des üblichen Volumenstromes der Anlage betrug. Die Anlage ist vermutlich rücklauftemperaturgeregelt. b) Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr:	1997	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Mehrfamilienhaus mit drei Wohnungen: ein Vollgeschoss, beheiztes Dachgeschoss sowie teilbeheizter Keller; alle Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche: 197 m²			

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2016
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	91 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,8
T_WP_Heizkreis: mittel	35,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	48,5 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	12 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2015: Austausch einzelner Fenster (2-fach-Verglasung, Wärmeschutz)
Dach	2015: 180 mm Zwischensparrendämmung (MW)
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2016: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

Die zusätzliche Dämmung des Daches im Jahr 2015 hat den U-Wert verbessert. Dies wird nicht in einer Änderung der Klassifikation deutlich, da das Dach aufgrund der mit der Gebäudeerrichtung installierten Aufsparrendämmung bereits der höchsten („dunkelgrünen“) Klasse zugeordnet war.

ID 350

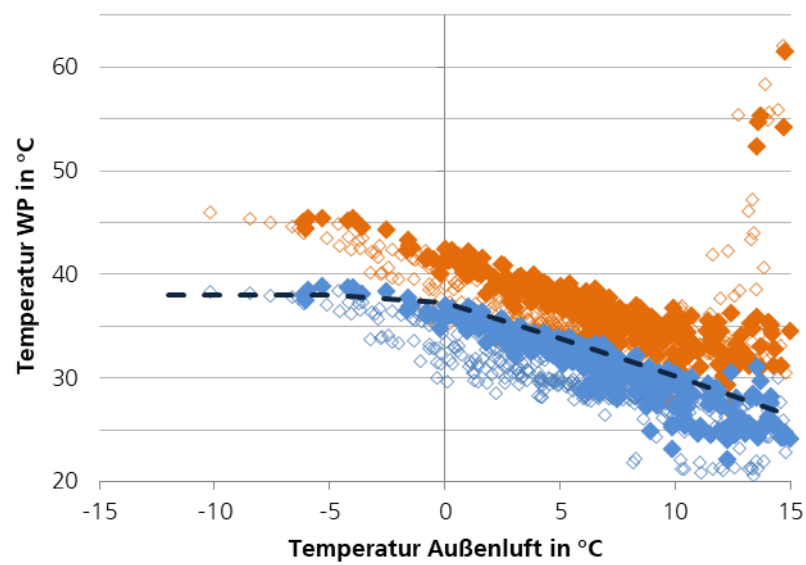


Abbildung 36: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 350 (Inverter geregelte WP; Heizkörper).

Basisinfos

Baujahr: 1988

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss, beheiztem Dachgeschoss sowie teilbeheiztem Keller

beheizte Fläche: 100 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Dach
Gebäude Wand
Fenster

Dach
Gebäude Wand
Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 51 % Plattenheizkörper (KG, DG) , 49 % FBH (EG, Bad im DG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	88 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,6
T_WP_Heizkreis: mittel	32,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	51,5 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	20 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2015: 3-fach-Verglasung
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2015: Austausch vorhandener Plattenheizkörper durch Plattenheizkörper mit höherer nominaler Heizleistung (KG, DG), Ersatz Plattenheizkörper durch FBH (EG, Bad DG)
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Gaskessel (Bj. 1988) durch Wärmepumpe

Kommentar

ID 351

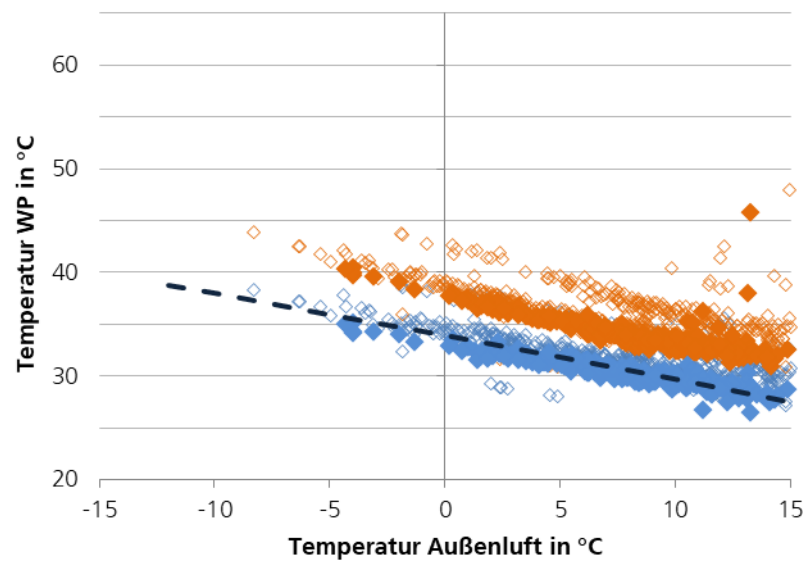


Abbildung 37: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 351 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr:	1996
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und beheiztem Dachgeschoss
beheizte Fläche:	185 m ²
Energetischer Gebäudezustand:	
Originalzustand	Istzustand
Dach	Dach
Gebäude Wand	Gebäude Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Ölkessel: RH, TWE Holzofen: RH (im Wohnzimmer)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 46 % Plattenheizkörper, 47 % FBH, 7 % FBH und Handtuchheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	147 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,8
T_WP_Heizkreis: mittel	37,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS-Beladung: mittel	51,3 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	7 %
		Kesselnutzungsgrad	80 %
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	38 % / 54 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	13 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2015: Einbau Wärmepumpe, vorhandenen Ölkessel bleibt bestehen

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die bivalente Wärmepumpenanlage (Wärmepumpe, Heizstab, Ölkessel). Nach Auskunft der Bewohner wird der Holzofen im Schnitt nur „an einem Tag im Jahr“ genutzt.

ID 352

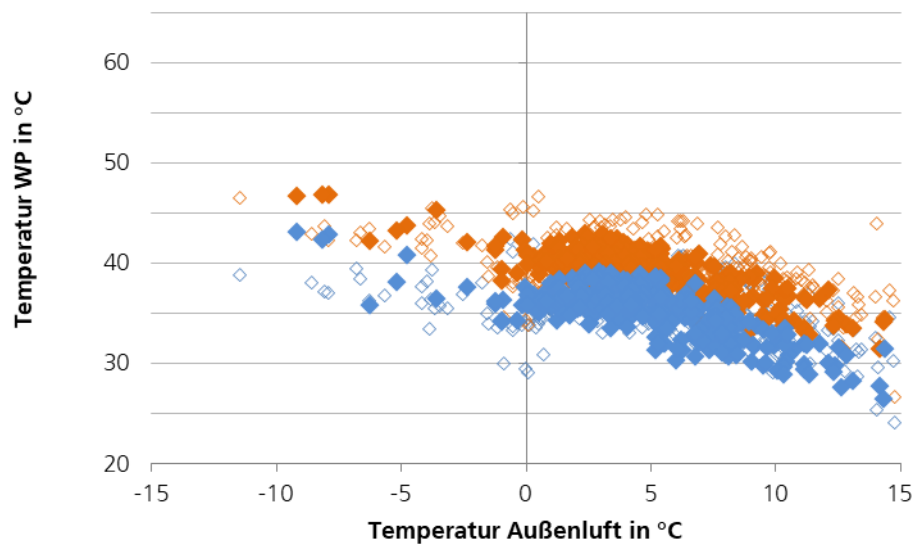


Abbildung 38: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 352 (bivalente Anlage; Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Kessel und Wärmepumpe sind meist nur alternativ in Betrieb.

Basisinfos

Baujahr: 1880

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen und beheiztem Dachgeschoss

beheizte Fläche: 153 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand	Istzustand
Dach	Dach
Gebäude Wand	Gebäude Wand
Fenster	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Gaskessel: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 40 % Plattenheizkörper (DG, EG), 54 % Wandheizung (OG), 6 % Wandheizung und Handtuchheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	69 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,7
T_WP_Heizkreis: mittel	39,4 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS-Beladung: mittel	52,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	12 %
		Kesselnutzungsgrad	-
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	0,1 % / 4 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	87 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2015: OG und Giebel: 20-30 mm Dämmung (GW) (außen) und 40-70 mm Dämmung (Holzfaser) (innen); EG: Originalzustand
Fenster	2015: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz, Holzrahmen)
Dach	2015: 200 mm Dämmung (SW), oberste Geschossdecke: Einblasdämmung in Holzbalkendecke
Wärmeübergabesystem	2015: Einbau von Heizkörpern und Wandheizung
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Nachtspeicherheizung und elektr. Durchlauferhitzer durch Wärmepumpe

Kommentar

ID 353

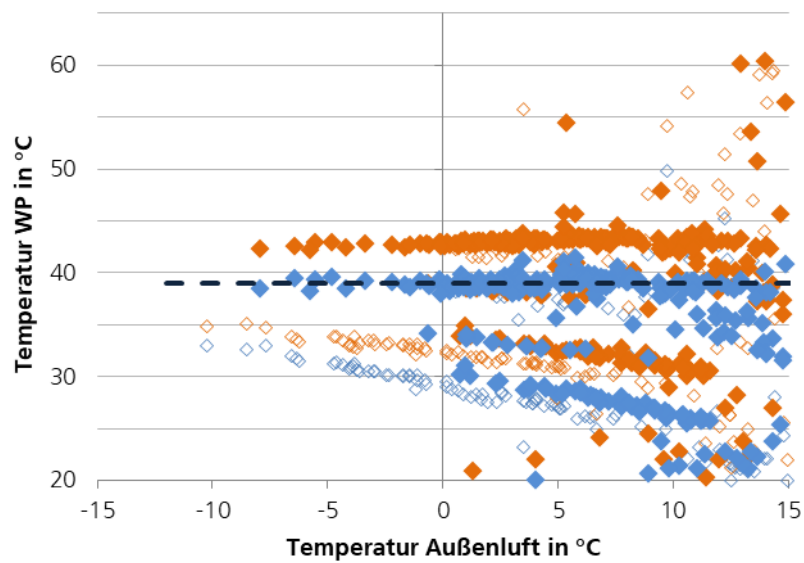


Abbildung 39: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 353 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und Wandheizung). Kommentar: Die Heizkurve wurde vermutlich Anfang Januar 2019 von einer witterungsgeführten Regelung auf eine konstante Sollwertvorgabe geändert.

Basisinfos

Baujahr: 1985

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und beheiztem Dachgeschoss; Appartement im Dachgeschoss des Nachbargebäudes wird ebenfalls mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 185 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Dach
Gebäude Wand
Fenster

Dach
Gebäude Wand
Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2006
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 33 % Plattenheizkörper (DG im EFH), 43 % FBH (EG im EFH), 24 % Gebläsekonvektoren (DG im Nachbargebäude)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	81 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	4,1
T_WP_Heizkreis: mittel	29,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS-Beladung: mittel	44,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	9 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	2017: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2007: Austausch Gaskessel durch Wärmepumpe

Kommentar

Die JAZ dieser Wärmepumpe ist vergleichsweise hoch, was u.a. auf eine relativ hohe Norm-Leistungszahl des Gerätes und der im Mittel geringsten – bezogen auf die Außenluft-Wärmepumpen - mittleren Heizkreistemperatur von 29,8°C zurückzuführen ist.

ID 354

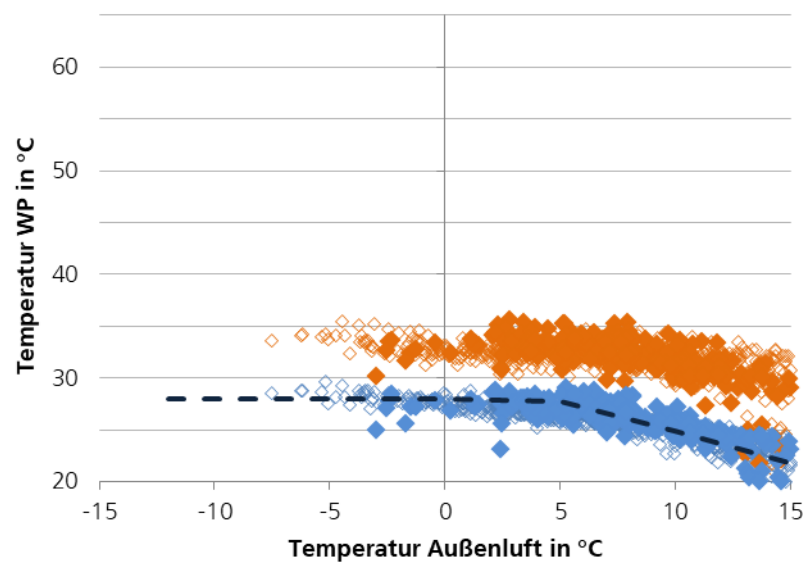


Abbildung 40: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 354 (Inverter geregelte WP; Heizkörper, FBH und Gebläsekonvektor)

Basisinfos

Baujahr: 1926 (mit Anbau von 1988)

Beschreibung: Doppelhaushälfte mit einem Vollgeschoss und beheiztem Dachgeschoss

beheizte Fläche: 138 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Ölkessel: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 65 % Heizkörper, 35 % FBH und Heizkörper (Bad, Wohnzimmer, Küche); Heizkörper sind teils Glieder-, teils Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	214 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,3
T_WP_Heizkreis: mittel	42,5 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS-Beladung: mittel	41,4 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	8 %
		Kesselnutzungsgrad	82 %
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	27 % / 19 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	5 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	1995: 2-fach-Verglasung mit Holzrahmen (Wärmeschutz)
Dach	Altbau: Zwischensparrendämmung (MW), sowie oberste Geschossdecke (DG zu Spitzboden): 80 mm Dämmung (MW); Anbau (1988): Originalzustand
Wärmeübergabesystem	1988: Einbau Gliederheizkörper und FBH als Ersatz für Einzelöfen im Altbau bzw. Einbau in den Anbau 1993: Ersatz einiger Gliederheizkörper durch Plattenheizkörper
Wärmeerzeuger	2015: Einbau der Wärmepumpe; vorhandener Ölkessel (Bj. 1988) bleibt bestehen

Kommentar

ID 356

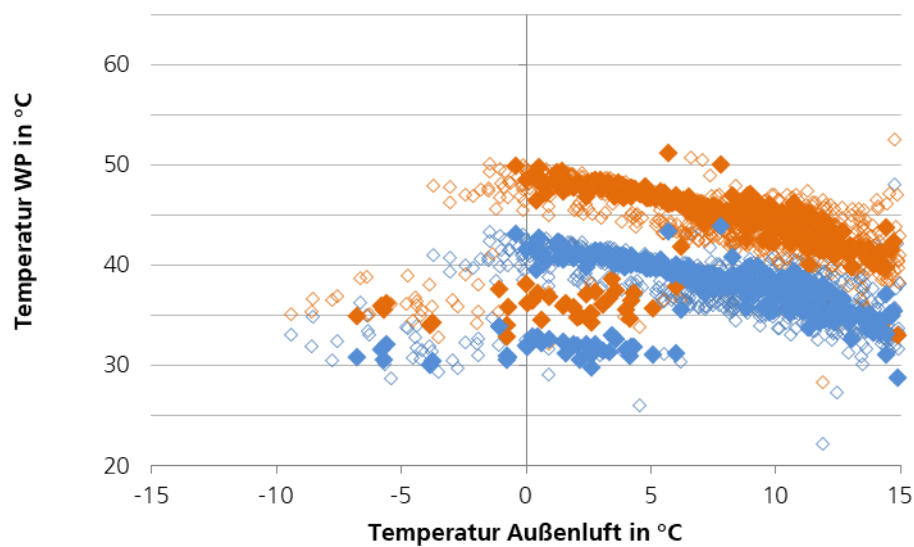


Abbildung 41: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 356 (bivalente Anlage; Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Die „niedrigen“ Vorlauf-/Rücklauftemperaturen sind auf den bivalenten Betrieb zurückzuführen. Die Bivalenzregelung wurde Ende Dezember 2018 geändert.

Basisinfos

Baujahr:	1911
Beschreibung:	Freistehendes Mehrfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen und beheiztem Dachgeschoss; nur eine Wohnungen (eine Etage) wird mit der Wärmepumpe beheizt.
beheizte Fläche:	143 m ²
Energetischer Gebäudezustand:	k.A.

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Außenluft; Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Heizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	158 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	2,1
T_WP_Heizkreis: mittel	47,0 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	3% / -
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Nicht bekannt
Fenster	2008: 2-fach-Verglasung
Dach	Nicht bekannt
Wärmeübergabesystem	Nicht bekannt
Wärmeerzeuger	2001: Einbau Wärmepumpen 2013: Austausch Wärmepumpen

Kommentar

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

Die vergleichsweise geringe JAZ 3_HK dieser Wärmepumpe wird vor allem durch die höchsten – in der Gruppe der Außenluft-Wärmepumpen gemessenen - mittleren Temperaturen zur Raumheizung von 47,0°C bzw. den höchsten maximalen Vorlauftemperatur (Tagesmittelwert) von 56,4°C negativ beeinflusst.

ID 357

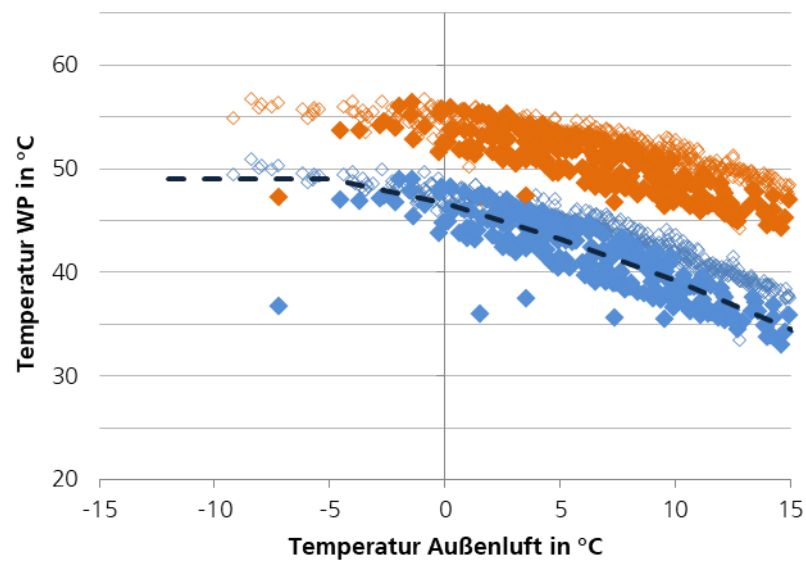


Abbildung 42: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 357 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr: 1937
 Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen
 beheizte Fläche: 160m²
 Energetischer Gebäudezustand:
 Originalzustand Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015 (Heizungswärmepumpe), 2013 (Brauchwasser-Wärmepumpe)
Wärmequelle WP	Außenluft; Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH; Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: TWE Ölkessel: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 94 % Platten- und Gliederheizkörper, 6 % FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	140 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	3,6
T_WP_Heizkreis: mittel	36,8 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-
		Kesselnutzungsgrad	-
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	52 % / 0 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	0 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2013: 45 mm Dämmung (PS) (innen)
Fenster	1998: 2-fach-Isolierverglasung
Dach	2016: 120 mm Dämmung (PS)
Wärmeübergabesystem	2013: Austausch von ca. 75% der Gliederheizkörper durch Plattenheizkörper; Einbau FBH (Einbaujahr unbekannt)
Wärmeerzeuger	2013: Austausch Niedertemperatur-Kessel durch Ölbrennwertkessel und Brauchwasser-Wärmepumpe 2014: Einbau Heizungswärmepumpe; Ölkessel bleibt bestehen 2015: Austausch Heizungswärmepumpe; Ölkessel bleibt bestehen

Kommentar

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

ID 358

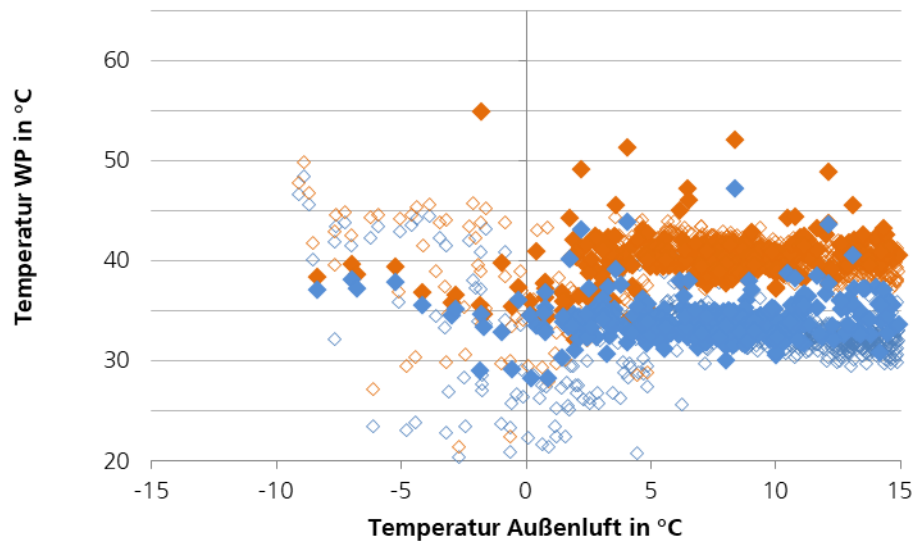


Abbildung 43: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 358 (bivalente Anlage; Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: a) Die Wärmepumpe ist bei Außenlufttemperaturen unter 2°C nur noch sehr selten bzw. nur kurzzeitig in Betrieb. b) Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr: 1982

Beschreibung: Reihenendhaus mit zwei Vollgeschossen

beheizte Fläche: 125 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 94 % FBH, 6 % Plattenheizkörper und FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	88 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	4,6
T_WP_Heizkreis: mittel	31,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	46,0 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	18 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	FBH: Originalzustand; 2016: Austausch Handtuch- mit Plattenheizkörper im Bad wegen Defekt
Wärmeerzeuger	2014: Austausch Nachtspeicherheizung (Blockheizung, Bj. 1982) durch Wärmepumpe

Kommentar

Die Wärmepumpe erreicht mit 4,6 die höchste JAZ aller untersuchten Außenluft-Wärmepumpen. Vorteilhaft für die Effizienz sind bei dieser Anlage vor allem die vergleichsweise geringe mittlere Heizkreistemperatur von 31,6 °C, die im Mittel höchste Wärmequellentemperatur von 7,1°C und die relativ hohe Norm-Leistungszahl des Gerätes.

ID 360

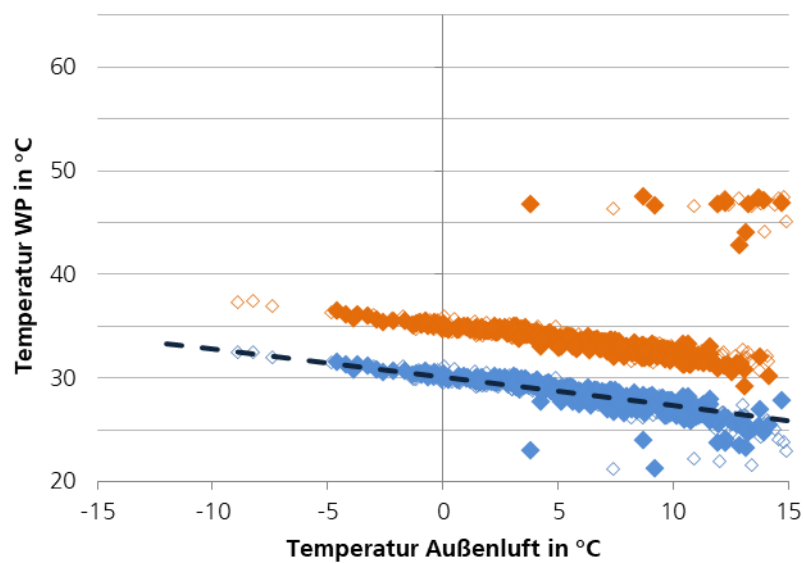


Abbildung 44: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 360 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Die einzelnen Tage mit hohen Vorlauftemperaturen sind auf sehr geringe Volumenströme zurückzuführen. Die Wärmepumpe war nur kurz in Betrieb.

Basisinfos

Baujahr: 1973
 Beschreibung: Reihenendhaus mit zwei Vollgeschossen, teilbeheiztem Dachgeschoss sowie teilbeheiztem Keller

beheizte Fläche: 210 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Gebäude	Dach	Gebäude	Dach
	Wand		Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2014
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	77 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,7
T_WP_Heizkreis: mittel	41,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	50,4 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	14 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	1990: 200 mm Zwischensparrendämmung (GW)
Wärmeübergabesystem	2009: Einbau Plattenheizkörper (Bad)
Wärmeerzeuger	2009: Austausch Ölkessel (Bj. 1972) durch Wärmepumpe 2014: Austausch Wärmepumpe

Kommentar

Im Hinblick auf die Effizienz dieser Wärmepumpe ist anzumerken, dass sie (abgesehen von der Anlage ID 369) innerhalb der Gruppe der Erdreich-Wärmepumpen die höchsten mittleren Temperaturen zur RH bereitstellt.

ID 363

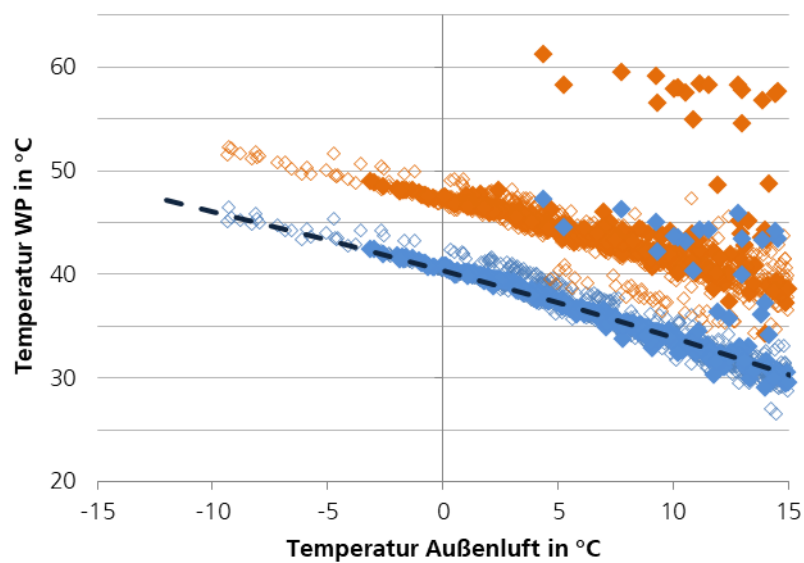


Abbildung 45: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 363 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper). Kommentar: Juli bis September 2019 war die Heizkurve vermutlich erhöht eingestellt.

Basisinfos

Baujahr: 1992

Beschreibung: Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss sowie beheiztem Dachgeschoss

beheizte Fläche: 108 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

Gebäude	Dach
	Wand
	Fenster

Gebäude	Dach
	Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf) Gaskessel: RH, TWE Kaminofen: RH (im Wohnzimmer)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 44 % Plattenheizkörper, 47 % FBH, 9 % FBH und Handtuchheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	88 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,0
T_WP_Heizkreis: mittel	34,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	2 % / 0,4 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	48,1 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	26 %
		Kesselnutzungsgrad	78 %
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	11 % / 36 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	61 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2011: Austausch Heizkörper; FBH Originalzustand
Wärmeerzeuger	2011: Austausch NT-Gaskessel durch Wärmepumpe und Gas-Brennwertgerät 2015: Austausch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich auf die bivalente Wärmepumpenanlage (WP, Heizstab, Kessel). Nach Auskunft der Bewohner wird der Kaminofen „sporadisch alle 2 bis 4 Wochen im Winter“ genutzt. Der Verbrauch liegt in der Größenordnung von 0,5 Raummeter Holz im Jahr.

ID 364

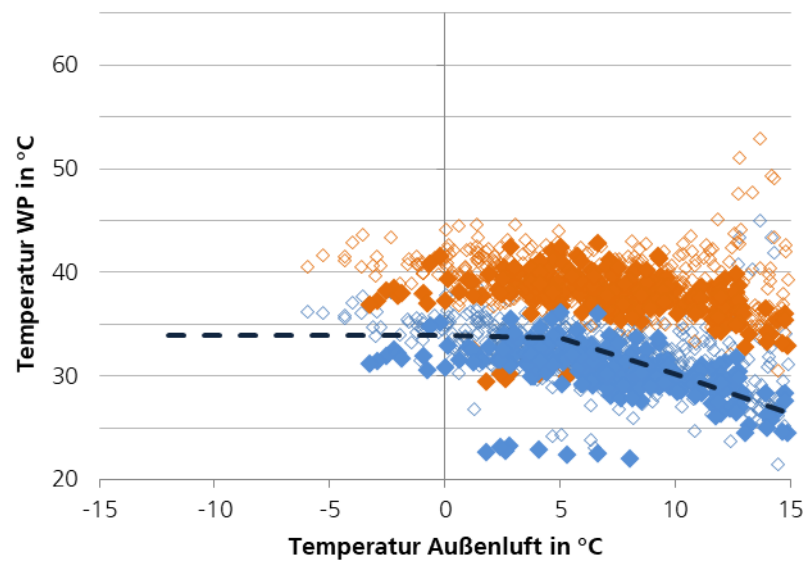


Abbildung 46: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 364 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr: 1850

Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen sowie beheiztem Dachgeschoss

beheizte Fläche: 205 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

	Dach
Gebäude	Wand
	Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2009
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Solarthermie: TWE
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	108 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP+HS)	4,0
T_WP_Heizkreis: mittel	40,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS: mittel	48,0 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	5 %
Deckungsbeitrag Solar: RH / TW	- / 69 %		

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2002: 100 mm Dämmung (Zellulose) (innen, OG); 60 mm Dämmung (SW) (außen, Giebelseite)
Fenster	1990: 2-fach-Isolierverglasung (teils mit Holz-, teils mit Kunststoffrahmen)
Dach	2002: 240 mm Dämmung (Zellulose)
Wärmeübergabesystem	1965: Einbau Heizkörper 2008: Austausch einiger Heizkörper
Wärmeerzeuger	1965: Umrüstung von Einzelöfen auf Ölkessel 1988: Austausch Ölkessel 2009: Austausch Ölkessel durch Wärmepumpe

Kommentar

ID 365

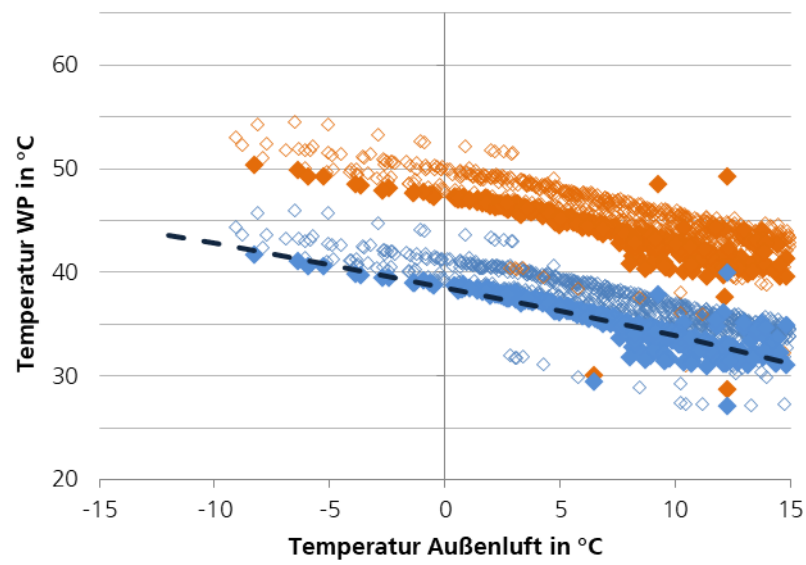


Abbildung 47: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 365 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr: Nicht bekannt
 Beschreibung: Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen
 beheizte Fläche: 308 m²
 Energetischer Gebäudezustand: k.A.

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2016
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH (Wohnraum, Küche)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	114 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,1
T_WP_Heizkreis: mittel	36,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	4 % / 1 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	49,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	5 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Keine Angabe
Fenster	2015: Fenstertausch
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	2015: Einbau FBH
Wärmeerzeuger	2015: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauchs bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Umfang der Nutzung des Kaminofens ist nicht bekannt.

ID 366

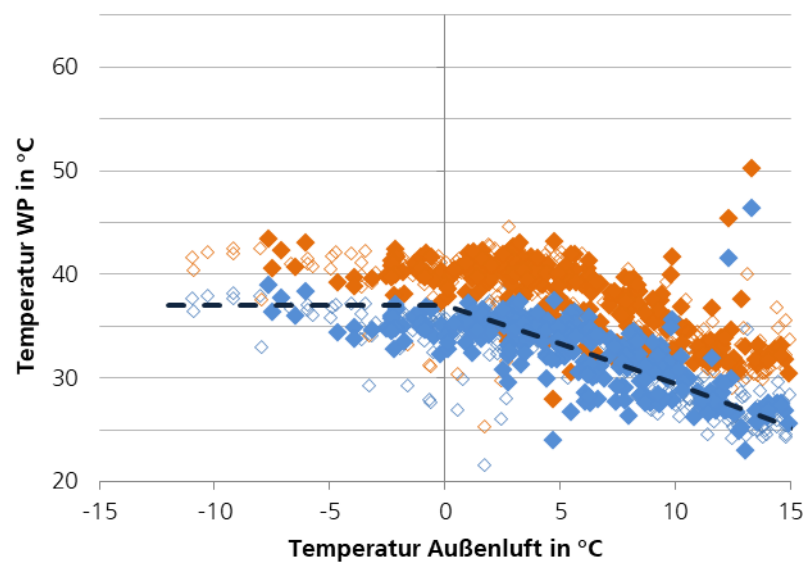


Abbildung 48: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 366 (WP mit Leistungsstufen; FBH)

Basisinfos

Baujahr:	1994	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen	Originalzustand	Istzustand
beheizte Fläche:	198 m ²	Gebäude Dach Wand Fenster	Gebäude Dach Wand Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf) Ölkessel: RH, TWE Kachelofen: RH
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	86 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,5
T_WP_Heizkreis: mittel	41,2 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0%
T_WP_TWS-Beladung: mittel	48,5 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	14 %
		Kesselnutzungsgrad	-
		Deckungsbeitrag Kessel*	6%
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2013: Einbau von Wärmepumpe; vorhandener Ölkessel (Bj. 1994) bleibt bestehen.

Kommentar

Der Kachelofen wurde nach Auskunft der Bewohner während der Projektlaufzeit nicht verwendet.
 * Der Kessel ist an einen Kombispeicher angebunden; damit können die Betriebsmodi RH und TWE für den Kessel nicht unterschieden werden.

ID 367

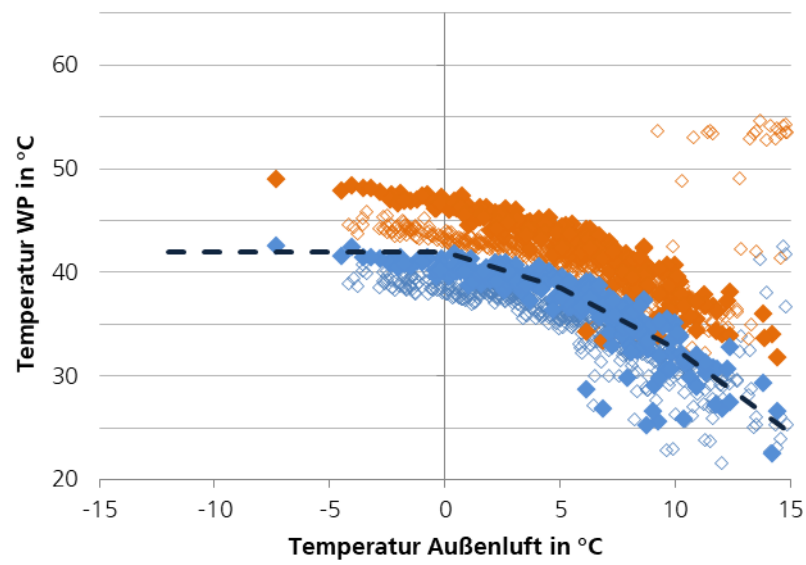


Abbildung 49: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 367 (Inverter geregelte WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr: 1969

Beschreibung: Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss und teilbeheiztem Keller

beheizte Fläche: 175 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2013
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Speicher), TWE (im Speicher) Kaminofen: RH
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 86 % Plattenheizkörper (EG, KG), 14 % Deckenheizung (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	111 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,6
T_WP_Heizkreis: mittel	41,1 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	47,6 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	10 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	1998: KG (teilweise): 160 mm Dämmung (PS) (außen) 2013: EG: teils 120 mm Dämmung (MW) (außen), teils 60 mm Dämmung (PUR) (innen)
Fenster	1999: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz, Holzrahmen mit therm. Trennung)
Dach	2013: 230 mm Dämmung (EPS)
Wärmeübergabesystem	1999: Austausche Gliederheizkörper gegen Plattenheizkörper 2013: Einbau Deckenheizung
Wärmeerzeuger	2013: Austausch Ölkessel (Bj. 1969) durch Wärmepumpe

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Kaminofen wird gelegentlich genutzt und der Deckungsanteil am Heizwärmeverbrauch vom Bewohner auf max. 10 % geschätzt.

Die im Vergleich geringere JAZ dieser Anlage ist u.a. auf eine vergleichsweise hohe Heizkreistemperatur und eine relativ geringe Norm-Leistungszahl zurückzuführen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass mit abnehmender Außenlufttemperatur die Rücklauftemperatur konstant bei ca. 38°C liegt. Dies führt mit zunehmender Heizlast zu einem Absinken der Vorlauftemperatur bzw. der mittleren Heizkreistemperatur (vgl. Grafik).

ID 368

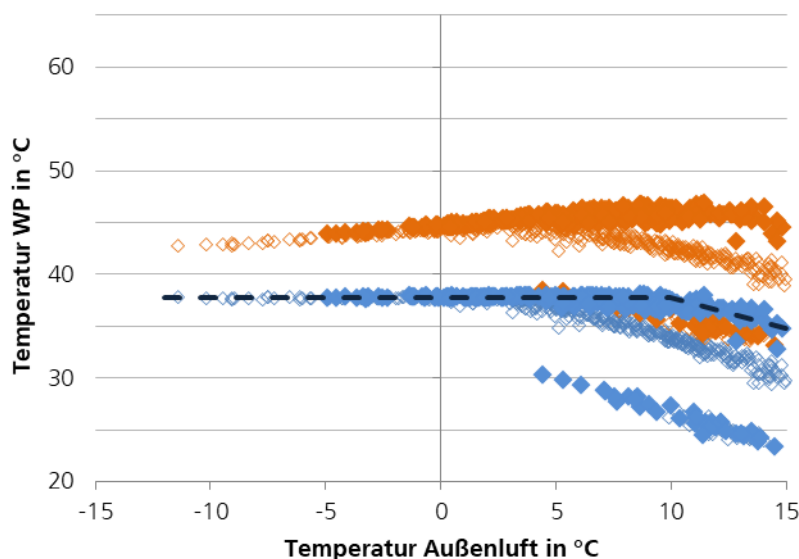


Abbildung 50: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 368 (fixed-speed AUL/Wasser-WP; Heizkörper und Deckenheizung). Kommentar: Vermutlich ist eine – auf die Rücklauftemperatur geregelte – witterungsgeführte Heizkreisregelung eingestellt, ergänzt um einen Maximalwert der Rücklauftemperatur. Da die Wärmepumpenleistung mit sinkender Außenlufttemperatur sinkt, reduziert sich die Spreizung bei gleichbleibendem Volumenstrom und die Vorlauftemperatur sinkt. Die Parametrierung der Heizkurve wurde vermutlich dreimal geändert.

Basisinfos

Baujahr:	1989	
Beschreibung:	Freistehendes Mehrfamilienhaus mit vier Wohnungen: ein Vollgeschoss, beheiztes Dachgeschoss sowie teilbeheizter Keller; alle Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt	
beheizte Fläche:	280 m²	
Energetischer Gebäudezustand:	k.A.	

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2010
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: TWE (im Speicher)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 59 % Heizkörper, 41 % FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	164 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	1,8
T_WP_Heizkreis: mittel	53,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	49,2 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	13 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Keine Angabe
Fenster	Keine Angabe
Dach	Keine Angabe
Wärmeübergabesystem	Keine Angabe
Wärmeerzeuger	2010: Einbau Wärmepumpe

Kommentar

Diese Wärmepumpe erreicht mit 1,8 die geringste JAZ 3 aller untersuchten Erdreich-Wärmepumpen. Diese Anlage stellt, abgesehen von der Energieverteilung zwischen RH (87 %) und TWE (13 %) sowie der mittleren Temperatur zur TWE (49,2°C), eine Ausnahme in dieser Anlagengruppe dar. Die maximale Vorlauftemperatur zur RH liegt mit 65°C über 19°K oberhalb der Mittelwerte der übrigen Anlagengruppe. Darüber hinaus hat das Gerät die geringste Norm-Leistungszahl aller untersuchten Sole-Wärmepumpen und ist vergleichsweise alt (2010).

ID 369

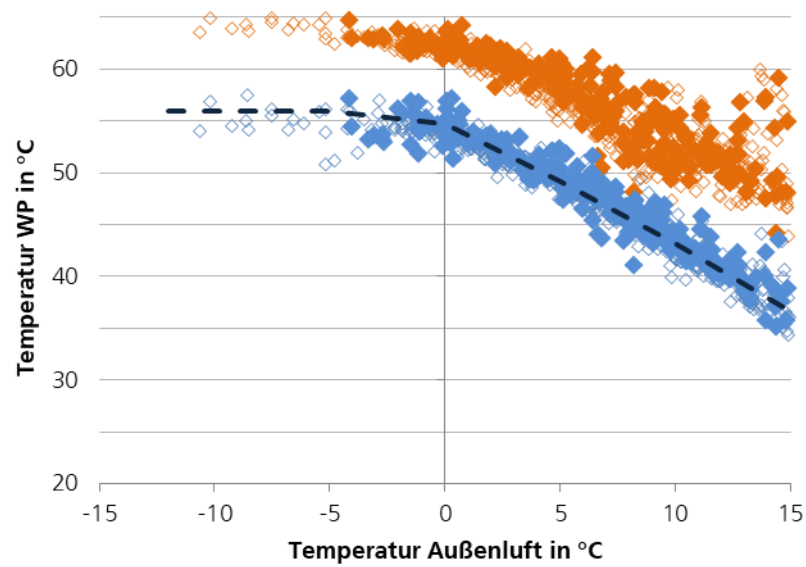


Abbildung 51: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 369 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH)

Basisinfos

Baujahr: 1980

Beschreibung: Reihenendhaus mit zwei Wohnungen: zwei Vollgeschosse und beheiztes Dachgeschoss; beide Wohnungen werden mit der Wärmepumpe beheizt

beheizte Fläche: 250 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

k.A.

Dach
Gebäude Wand
Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2000 (Brauchwasser-Wärmepumpe); 2014 (Heizungswärmepumpe)
Wärmequelle WP	Außenluft, Raumluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe (Außenluft): RH Wärmepumpe (Raumluft): TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	54 kWh/(m ² a)	JAZ 3_HK (WP & HS)	1,5
T_WP_Heizkreis: mittel	38,2 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	-	Wärmeanteil der WPA für TWE	-

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	2011: 60 mm Dämmung (PUR)
Fenster	2000: 2-fach-Isolierverglasung (alle Fenster) 2011: 3-fach-Verglasung (Wintergarten)
Dach	2011: 95 - 180 mm Zwischensparrendämmung (PUR), 60 mm Untersparrendämmung
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2000: Einbau Brauchwasser-Wärmepumpe 2014: Austausch Ölkessel (Bj. 1988) durch Heizungswärmepumpe

Kommentar

Trinkwassererwärmung erfolgt über separate Brauchwasser-Wärmepumpe. Daher ist die messtechnische Erfassung der Trinkwasserspeicherbeladung aufgrund kompakter Bauweise nicht möglich, womit keine Jahresarbeitszahl über beide Betriebsmodi, keine Temperaturen zur TWS-Beladung und keine thermischen Energieanteile der Wärmepumpe zur Trinkwassererwärmung ermittelt werden können.

Die Wärmepumpe erzielt mit 1,5 eine sehr geringe JAZ 3_HK. Im Rahmen der hier vorgenommenen Auswertung kann diesbezüglich nur auf die sehr geringe Norm-Leistungszahl dieses Gerätes verwiesen werden, was die geringe JAZ 3_HK jedoch nicht hinreichend begründet.

ID 370

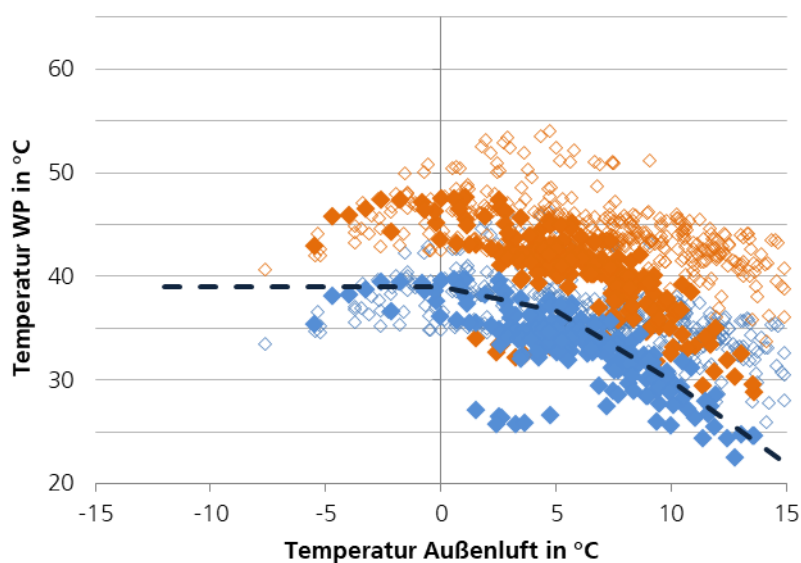


Abbildung 52: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 370 (Inverter geregelte WP; Heizkörper)

Basisinfos

Baujahr: 1938

Beschreibung: Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen

beheizte Fläche: 180 m²

Energetischer Gebäudezustand:

Originalzustand

Istzustand

	Dach		Dach
Gebäude	Wand	Gebäude	Wand
	Fenster		Fenster

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2017
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Ölkessel: RH, TWE Schwedenofen: RH (im Wohnzimmer)
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 52 % Plattenheizkörper (OG), 44 % FBH (EG), 4 % Plattenheizkörper und FBH (OG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch*	144 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,0
T_WP_Heizkreis: mittel	39,6 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_WP_TWS-Beladung: mittel	49,9 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	4 %
		Kesselnutzungsgrad	97 %
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	19 % / 61 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	22 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	1980: 50 mm Dämmung (PS) (innen)
Fenster	2005: 2-fach-Verglasung (Wärmeschutz)
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	1985: Einbau Heizkörper 1995: Einbau FBH
Wärmeerzeuger	1985: Austausch Öl-Einzelöfen durch Zentralheizung 2007: Austausch Kessel 2017: Austausch Ölkessel durch Wärmepumpe und neuen BW-Ölkessel

Kommentar

* Die Angabe des spez. Heizwärmeverbrauches bezieht sich nur auf die Wärmepumpenanlage. Der Schwedenofen wird nach Auskunft der Bewohner „gelegentlich, an sehr kalten Wintertagen“ genutzt.

ID 371

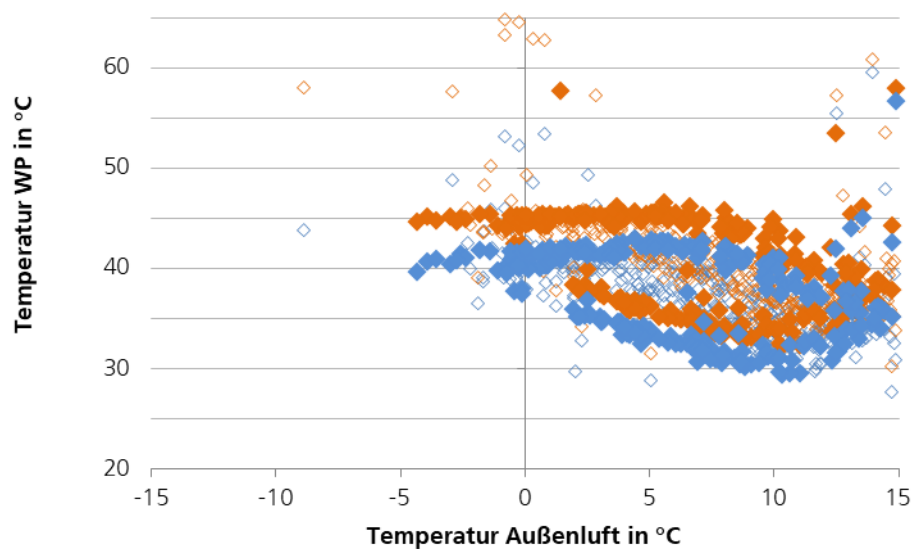


Abbildung 53: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 371 (Inverter geregelte WP; Heizkörper und FBH). Kommentar: Die Regelung der Temperatur wurde während der Messperiode vermutlich geändert; eine witterungsgeführte Regelung, dessen Niveau erhöht wurde und auf eine maximale Temperatur begrenzt ist.

Basisinfos

Baujahr: 1992

Beschreibung: Reihenmittelhaus mit zwei Vollgeschossen, beheiztem Dachgeschoss und teilbeheiztem Keller

beheizte Fläche: 122 m²

Energetischer Gebäudezustand: k.A.

**Beschreibung des Versorgungssystems**

Einbaujahr WP	2017
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Gaskessel: RH, TWE
Wärmeübergabesystem	Plattenheizkörper (OG, Bad im EG), Röhrenheizkörper (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2017 bis Juni 2018

Spez. Heizwärmeverbrauch	74 kWh/(m ² a)	JAZ 3 (WP & HS)	2,7
T_WP_Heizkreis: mittel	37,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	- / -
T_ WP_TWS-Beladung: mittel	49,9 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	28 %
		Kesselnutzungsgrad	-
		Deckungsbeitrag Kessel: RH / TWE	23 % / 43 %
		Wärmeanteil des Kessels für TWE	49 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	2008: Austausch Heizkörper in Wohnzimmer und Küche
Wärmeerzeuger	2017: Austausch NT-Gaskessel gegen BW-Gaskessel und Wärmepumpe

Kommentar

ID 374

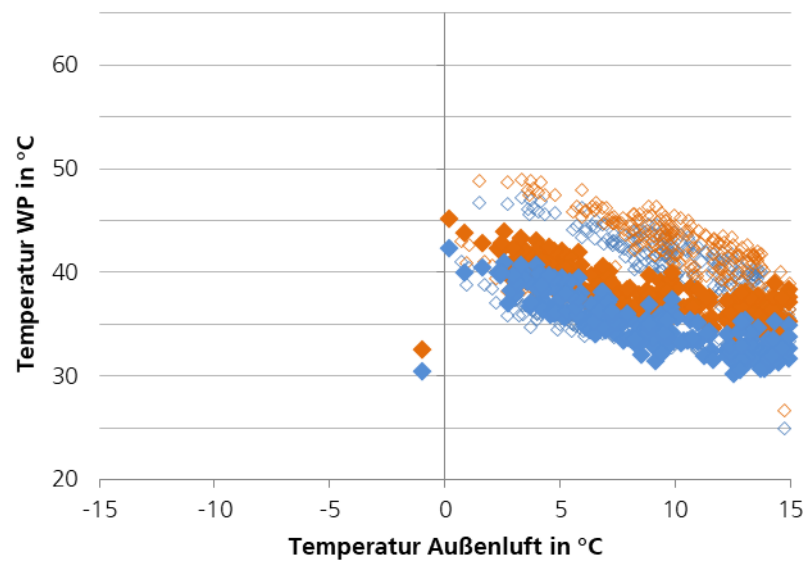


Abbildung 54: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 374 (Inverter geregelte WP; Heizkörper). Kommentar: Die Heizkurve wurde vermutlich angepasst (herabgesenkt).

Basisinfos

Baujahr:	2005	Energetischer Gebäudezustand:			
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit zwei Vollgeschossen und teilbeheiztem Keller	Originalzustand		Istzustand	
beheizte Fläche:	228 m²	Gebäude	Dach	Gebäude	Dach
			Wand		Wand
			Fenster		Fenster

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2015
Wärmequelle WP	Erdreich (Erdwärmesonde)
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Vorlauf)
Wärmeübergabesystem	FBH

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	69 kWh/(m²a)		JAZ 3 (WP & HS)	3,9
T_WP_Heizkreis: mittel	39,2 °C		Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	0 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	-		Wärmeanteil der WPA für TWE	11 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	Originalzustand
Wärmeübergabesystem	Originalzustand
Wärmeerzeuger	2015: Austausch Wärmepumpe

Kommentar

--

ID 375

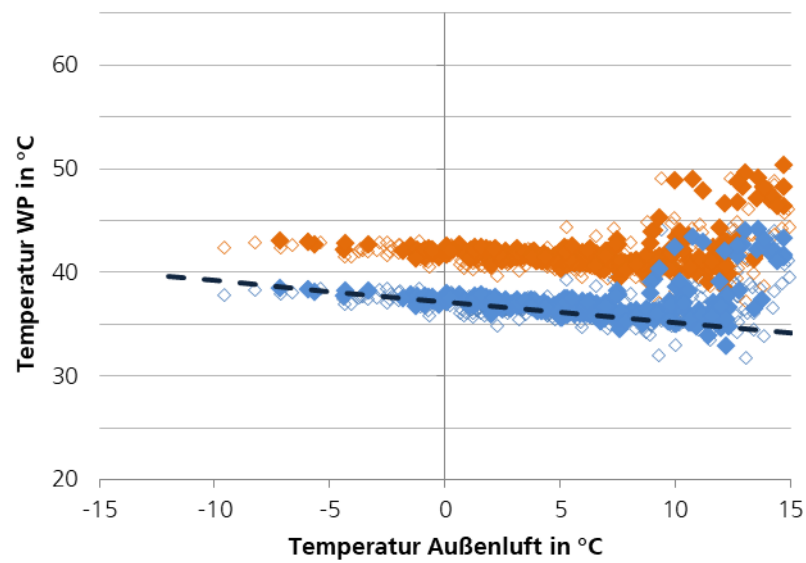


Abbildung 55: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 375 (fixed-speed Sole/Wasser-WP; FBH). Kommentar: Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes in 2017/2018 zeitweise zur Untersuchung der Lastflexibilität von Wärmepumpen über die SG-Ready Schnittstelle von extern angesteuert. Dies hatte u.U. zeitweise Einfluss auf die Betriebstemperatur der Wärmepumpe (vgl. Kapitel „Ergebnisse zur Forschungsfrage 2: Lastflexibilität von Wärmepumpen“)

Basisinfos

Baujahr:	1995	Energetischer Gebäudezustand:	
Beschreibung:	Freistehendes Einfamilienhaus mit einem Vollgeschoss, einem beheiztem Dachgeschoss und teilbeheiztem Keller; Spitzboden nicht beheizt	Originalzustand	Istzustand
		Gebäude	Gebäude
		Dach	Dach
		Wand	Wand
		Fenster	Fenster
beheizte Fläche:	194 m²		

Beschreibung des Versorgungssystems

Einbaujahr WP	2016
Wärmequelle WP	Außenluft
Wärmerzeuger	Wärmepumpe: RH, TWE Heizstab: RH (im Vorlauf), TWE (im Speicher) Elektr. Durchlauferhitzer: TWE
Wärmeübergabesystem	Mischsystem: 59 % Heizkörper (KG, DG), 41 % FBH (EG)

Messdaten für die Auswerteperiode Juli 2018 bis Juni 2019

Spez. Heizwärmeverbrauch	105 kWh/(m²a)	JAZ 3 (WP & HS)	3,1
T_WP_Heizkreis: mittel	35,3 °C	Verhältnis HS zu Verd.: RH/TWE	1 % / 0 %
T_WP_TWS-Beladung: mittel	45,7 °C	Wärmeanteil der WPA für TWE	8 %

Informationen zu durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

Außenwand	Originalzustand
Fenster	Originalzustand
Dach	2016: Oberste Geschossdecke: 130 mm Dämmung (MW)*
Wärmeübergabesystem	2016: Einbau Heizkörper und FBH
Wärmeerzeuger	2016: Austausch Nachtspeicherheizung (Bj. 1995) durch Wärmepumpe; elektr. Durchlauferhitzer (Bj 1995) bleibt bestehen

Kommentar

* Die Dämmung der Geschossdecke zwischen erstem Dachgeschoss und Spitzboden wird bei der Kategorisierung des U-Wertes „Dach“ (und folglich des Gebäudekennwertes) nicht berücksichtigt. Die gezeigte Kategorie gibt den U-Wert des Daches (Zwischensparrendämmung) wieder. Hintergrund: Die in dem Projekt gewählte Methode zur Einordnung des energetischen Gebäudezustandes nutzt einen – der Datenlage und der Zielstellung angemessenen – einfachen Ansatz, bei dem die individuellen Bauteil-U-Werte der Geometrie eines Referenzhauses zugeordnet werden.

ID 376

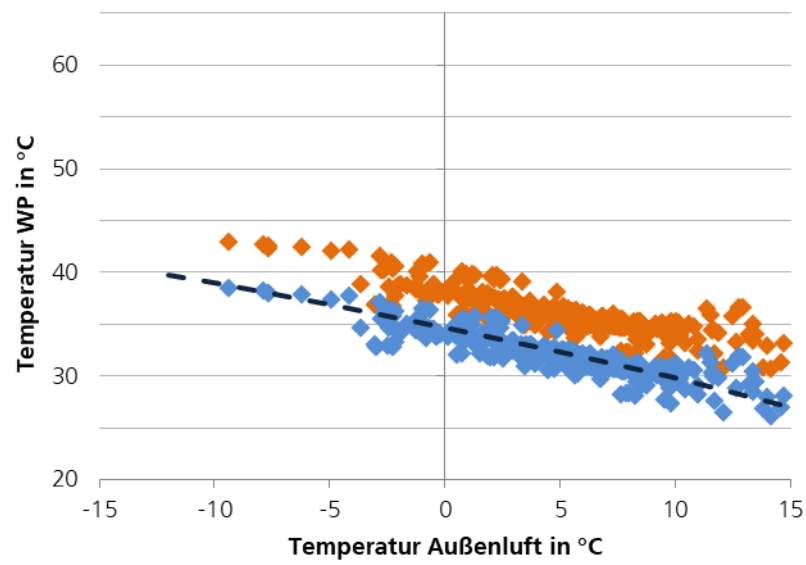


Abbildung 56: Vorlauf- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpe im Betriebsmodus Raumheizung über der Außenlufttemperatur der ID 376 (WP mit Leistungsstufen; Heizkörper und FBH)