



„WP Monitor“ Feldmessung von Wärmepumpenanlagen



Autoren

Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Danny Günther

Dr.-Ing. Marek Miara

Dipl.-Ing. (FH) Robert Langner

Dipl.-Ing. Sebastian Helmling

Dipl.-Ing. (FH) Jeannette Wapler

Projektträger

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Projektdauer

01.12.2009 bis 30.06.2013

Projektpartner

ait-deutschland GmbH, Bosch Thermoteknik AB, EnBW
Energie Baden-Württemberg AG, Glen Dimplex
Deutschland GmbH, Hautec GmbH, Heliotherm Wär-
mepumpentechnik Ges.m.b.H, Max Weishaupt GmbH,
Ochsner Wärmepumpen GmbH, Stiebel Eltron GmbH,
Vaillant GmbH, Viessmann Wärmepumpen GmbH, Wolf
GmbH

Projektleitung

Dr.-Ing. Marek Miara (Fraunhofer ISE)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik
Abteilung Solares Bauen
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg

Telefon ++49 761 4588-5529

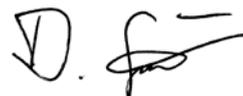
Telefax ++49 761 4588-9529

E-Mail marek.miara@ise.fraunhofer.de

Freiburg, 15. Juli 2014



Dr.-Ing. Marek Miara
Projektleiter



Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Danny Günther
Projektmitarbeiter

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Projektziele und Rahmenbedingungen	9
2 Allgemeines zum Bericht	11
3 Durchführung des Projektes	12
3.1 Der Monitoring-Prozess	12
3.2 Messtechnik	16
3.2.1 Elektroenergiezähler	18
3.2.2 Wärmemengenzähler	19
3.3 Fehlergrenzen der Messtechnik	21
3.3.1 Thermische Energien	21
3.3.2 Elektrische Energien	21
3.3.3 Außentemperaturen	21
3.4 Fehlerrechnung	22
3.5 Das Messdatenerfassungssystem	25
4 Charakterisierung der Monitoring Objekte	27
4.1 Entwicklung der Datenbasis im Projektverlauf	27
4.2 Anlagen aus „WP-Effizienz“ und neue Anlagen	28
4.3 Wärmequellenanlage	28
4.4 Wärmenutzungsanlage	31
4.5 Splitgeräte und leistungsgeregelte Verdichter	33
4.6 Einbindung von Solarthermieanlagen	33
4.7 Gebäudetypen und Gebäudeflächen	34
4.8 Energiebedarf für Heizung und Trinkwassererwärmung	36
5 Ergebnisse	42
5.1 Definition der Bilanzgrenzen für die Berechnung der Arbeitszahlen	42
5.2 Wetterbedingungen im Messzeitraum	46
5.3 Mittelwerte und Verteilungen aller Jahresarbeitszahlen 2 - Juli 2010 bis Juni 2013	49
5.3.1 Wärmequelle Außenluft	49
5.3.2 Wärmequelle Erdreich	51
5.4 Effizienz und Einflussgrößen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013	52
5.4.1 Wärmequelle Außenluft	54
5.4.2 Wärmequelle Erdreich	71
5.4.3 Wärmequelle Grundwasser	88
5.5 Betriebszeiten und Takthäufigkeit	94
5.5.1 Wärmequelle Außenluft	96
5.5.2 Wärmequelle Erdreich	98
5.6 Systemarbeitszahlen Wärmepumpe und Solar	100
5.7 Betriebsbedingungen und Effizienzwerte im Jahresverlauf	103
5.7.1 Einfluss des Heizstabbetriebs Juli 2011 bis Juni 2013	103
5.7.2 Effizienzunterschied bestehender und neuer Anlagen Juli 2011 bis Juni 2013	108
5.7.3 Soletemperaturen bei Erdwärmesonden von Januar 2008 bis Juni 2013	112

6	Optimierungspotenzial und festgestellte Fehler	117
7	Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Projektes	120
7.1	Projekt-Homepage	120
7.2	Vorträge	121
7.3	Veröffentlichungen in Printmedien und Beiträge Dritter	121
	Literatur- und Quellenverzeichnis	123
	Abkürzungen	124
	Formelzeichen	125
	Indizes	126
	Anhang	127

Zusammenfassung

Das Hauptziel von „WP Monitor“ ist die unabhängige Untersuchung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen bei realem Betrieb im Feld. Gleichzeitig ist es das Anschlussprojekt von „WP-Effizienz“. Der Fokus der Untersuchung liegt auf Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in neuen oder auch – in einigen wenigen Fällen – entsprechend sanierten Einfamilienhäusern. Das Projekt begann im Dezember 2009 und endete laut Kooperationsvereinbarung im Mai 2013. Durch eine kostenneutrale Verlängerung reicht der Messzeitraum von Juli 2010 bis Juni 2013. Insgesamt wurden 87 Wärmepumpen untersucht, wovon 50 aus „WP-Effizienz“ verlängert wurden (nachfolgend alte WP) und 37 Neuanmeldungen (nachfolgend neue WP) hinzukamen. Durch letztere wurde die Vielfalt der untersuchten Anlagen um Direktverdampfungssysteme, Anlagen mit CO₂-Sonden sowie weiteren drehzahlgeregelten Verdichtern erweitert. Von den untersuchten Anlagen nutzen 54 % das Erdreich (35 % der neuen WP), 40 % die Außenluft (60 % der neuen WP) und 6 % das Grundwasser (5 % der neuen WP) als Wärmequelle. Als Wärmeübertrager an den Raum wurden überwiegend Fußbodenheizungen eingesetzt. Die Gebäude hatten im Mittel eine Fläche von 188 m² und der mittlere gemessene Heizwärmeverbrauch im letzten Auswertungsjahr lag bei 78 kWh/m².

Als Hauptergebnis kann festgestellt werden, dass die Effizienz von Wärmepumpen im Feld zunimmt. Sowohl für Erdreich- als auch für Luft-Wärmepumpen wurden höhere Arbeitszahlen als im „WP-Effizienz“-Projekt ermittelt. Diese sind überwiegend auf die neuen Wärmepumpen zurückzuführen. Der ökologische und energetische Vorteil von Wärmepumpen gegenüber fossil betriebenen Heizungssystemen wird somit auf Basis dieser Ergebnisse weiter vergrößert. Da jedoch auch im Rahmen von „WP Monitor“ sehr große Bandbreiten an Effizienzwerten ermittelt wurden, muss auch auf das weiterhin bestehende, große Optimierungspotenzial hingewiesen werden.

Der Messzeitraum betrug drei Jahre. Aufgrund der langsam wachsenden Datenbasis wurde die Hauptauswertung für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 durchgeführt. Dabei erzielten die Wärmepumpen mit der Wärmequelle Außenluft im Mittel Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 3,1 (2,3...4,3), wobei die alten Anlagen bei 3,0 (2,3...3,5) und die neuen Anlagen bei 3,2 (2,5...4,3) lagen. Bei den Erdreich-Wärmepumpen lag die mittlere JAZ bei 4,0 (3,0...5,4). Für die alten Anlagen wurde ein Durchschnitt von 3,9 (3,0...5,1), für die neuen Anlagen von 4,3 (3,5...5,4) ermittelt. Die vier auswertbaren Grundwasser-Wärmepumpen erzielten JAZ zwischen 3,6 und 4,2. Für den gleichen Zeitraum wurden auch die mittleren Betriebsbedingungen für Wärmepumpen mit gleicher Wärmequelle ermittelt. Luft-Wärmepumpen stellten für Raumheizzwecke im Mittel Temperaturen von 33 °C und für die Trinkwassererwärmung von 47 °C bereit. Für Erdreich-Wärmepumpen wurden mit 32 °C bzw. 48 °C ähnliche Werte erzielt. Gleiches gilt für den Anteil der Trinkwasserwärme, der bei den Luft-Wärmepumpen 20 % und bei den Erdreich-Wärmepumpen bei 18 % ausmachte. Die mittleren Wärmequellentemperaturen lagen bei 3,2 °C für Luft- bei 4,2 °C für Erdreich-Wärmepumpen.

Der mittlere Temperaturhub in der Auswerteperiode 2012/13 lag für die Luft-Wärmepumpen bei 33 K (27...38 K). Die Erdreich-WP mussten im Schnitt einen Temperaturhub von 31 K (22...40 K) überwinden. Für zwei dahingehend auswertbare Grundwasser-Wärmepumpen lagen die Werte bei 25 K und 31 K. Eine gemeinsame Betrachtung der jeweiligen Relationen von Temperaturhub und Effizienz einzelner Anlagen führte zu dem Ergebnis, dass sich eine Zunahme der Effizienz bei abnehmendem Temperaturhub nur bedingt abbilden lässt. Dies ist unter anderem auf die großen Unterschiede bei den Leistungszahlen sowie das unterschiedliche Betriebsverhalten zurückzuführen. In die genannten JAZ gehen, neben dem Elektroenergieverbrauch des Verdichters, auch der Verbrauch der Steuerung, des Antriebes in der Wärmequelle sowie des Heizstabes ein. Diese zum Verdichter zusätzlichen Energieverbräuche wurden als Durchschnittswerte für Anlagen mit gleicher Wärmequelle ermittelt. Bei den Luft-Wärmepumpen wurde für die Steuerung im Schnitt 2,7 % (0,7...5,4 %) und bei den Erdreich-Wärmepumpen 2,6 % (1,0...8,8 %) zusätzliche Elektroenergie benötigt. Größere Unterschiede wurden bei den Antrieben im Wärmequellenkreis ermittelt. Der zusätzliche Energieverbrauch der Ventilatoren lag bei 6,1 % (1,8...12,5 %) und jener der Solerpumpen bei 4,9 % (2,1...9,2 %). Die zusätzlichen Energieverbräuche der Heizstäbe hatten im Mittel kaum einen Einfluss. Diese lagen für die Luft-Wärmepumpe bei 0,9 % (0,0 bis 8,9 %) und für die Erdreich-Anlagen bei 0,3 % (0,0...6,0 %). Sowohl bei den Luft-, als auch bei den Erdreich-Anlagen konnte für den Großteil des Heizstabbetriebs eine Korrelation zur Außenlufttemperatur hergestellt werden. Hinsichtlich der Wetterbedingungen sei darauf hingewiesen, dass bei einer Auswertung für Luft-Wärmepumpen mit gleichbleibender Datenbasis für den Zeitraum 2012/13 (2,2 %) etwa die Hälfte der erforderlichen Heizstabarbeit, verglichen mit dem Auswertungsjahr 2011/12 (4,3 %), gemessen wurde.

Für dahingehend auswertbare Anlagen wurden die Betriebs- sowie Einschalthäufigkeiten für die Auswertungsperiode 2012/13 untersucht. Die Luft-Wärmepumpen waren im Durchschnitt 2240 h (1300...4630 h), die Erdreich-Wärmepumpen 2000 h (800...4040 h) in Betrieb. Dabei gab es für die Luft-Wärmepumpen mit im Schnitt 13 (4...29) etwas mehr Anfahrvorgänge als für die Erdreich-Wärmepumpen mit 11 (3...26). Bemerkenswert sind die Ausmaße der Bandbreiten, sowohl der Jahresbetriebsstunden als auch der Einschalthäufigkeit.

Für die Bilanzierung der Effizienz von Kombinationen aus Solarthermieanlage und Wärmepumpe waren zehn Systeme (neun Erdreich-, eine Luft-WP) mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet. Bei den Erdreich-WP lagen die Effizienzsteigerungen zwischen 3 % und 15 % (vier Anlagen mit solarer Trinkwassererwärmung) sowie 6 % und 29 % (fünf Anlagen mit solarer Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung). Die Kombination der Luft-Wärmepumpe und einer Solaranlage zur Trinkwassererwärmung führte zu einer Effizienzsteigerung von 6 %.

Zusammen mit den Messdaten aus „WP-Effizienz“ konnten für elf Erdreich-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden der Entwicklungen der Soletemperaturen seit Anfang 2008 bewertet werden. Über kurze Zeiträume (Tage) konnte eine starke Korrelation der Soletemperatur zur Außenlufttemperatur festgestellt werden. Bei geringerem Wärmeentzug steigen die Soletemperaturen gleich wieder an. Im Verlauf einer Heizperiode sinken die Soletemperaturen

bezogen auf die Außenlufttemperaturen leicht ab. Längerfristig (sechs Jahre) konnte jedoch kein Absinken des Soletemperaturniveaus festgestellt werden.

Insgesamt wurden die neuen Wärmepumpenanlagen besser geplant und mit größerer Sorgfalt installiert als die Anlagen im „WP-Effizienz“-Projekt. Einerseits wurden alle im Rahmen von „WP-Effizienz“ detektierten Fehlfunktionen auch bei „WP Monitor“ festgestellt, andererseits traten diese wesentlich seltener auf. Neben den besser umgesetzten Anlagenkonzepten konnte auch eine Effizienzsteigerung bei den Einzelkomponenten festgestellt werden. Dies betrifft neben den höheren Leistungszahlen der Wärmepumpen auch den Einsatz effizienterer Antriebe im Wärmequellenkreis.

Summary

The main objective of the project "WP Monitor" was the independent investigation of the efficiency of heat pump systems under real operating conditions in the field, following-up on the project "WP-Effizienz". The focus of the investigation was on heat pumps for space heating and domestic hot water in either new or, in some rare cases, appropriately retrofitted buildings. The project started in December 2009 and ended in May 2013 as provided for in the cooperation agreement. The measurement period had been prolonged and ranged from July 2010 to June 2013. A total of 87 heat pumps were examined, 50 of these came out of the project "WP-Effizienz" (hereinafter referred to as "old HP") and 37 were added through new registrations (hereinafter referred to as "new HP"). The variety of the studied systems had been enlarged comprising direct evaporation systems, ground source heat pumps with carbon dioxide in the ground-coupled evaporators and systems with a variable speed compressor. The investigated heat pump systems consisted of 54 % ground source heat pumps (35 % of the new HP), 40 % air source heat pumps (60 % of the new HP) and 6 % water source heat pumps (5 % of the new HP). The most commonly used heat transfer systems were underfloor heating systems. The heated area of the investigated buildings reached an average value of 188 m². The average energy usage for space heating of these buildings amounted to 78 kWh / m² in the final year of the measurement.

As a main result of the project it can be stated that the efficiency of heat pumps in the field is increasing. For both, ground source heat pumps as well as air source heat pumps higher seasonal performance factors (SPF) than in the past were identified ("WP-Effizienz"). This is mostly due to the use of a new generation of heat pumps. The results show that the ecological and energetic advantage of heat pumps compared to fossil-fueled heating systems has further increased. It should be noted however, that the wide variety of efficiency values in the context of "WP Monitor" suggests that there still exists a large potential for optimization.

The entire measurement period lasted three years. Since the data base continued to grow only gradually in the beginning, the main evaluation was set for the period from July 2012 to June 2013. Within this period air source heat pumps reached an average SPF of 3.1 (2.3 ... 4.3), respectively 3.0 (2.3...3.5) for the old HP and 3.2 (2.5 ... 4.3) for the new HP. Ground source heat pumps reached an average SPF of 4.0 (3.0...5.4) - respectively 3.9 (3.0...5.1) for the old HP and 4.3 (3.5 ... 5.4) for the new HP.

The SPF of the four evaluated water source heat pumps was determined at 3.6 to 4.2. For the same period, the average operating conditions for heat pumps using the same heat source were determined. Air source heat pumps provided an average temperature of 33 °C for space heating and 47 °C for domestic hot water. Ground source heat pumps obtained similar values: 32 °C respectively 48 °C. The same is true for the share of heat for hot domestic water which accounted for 20 % regarding air source heat pumps and 18 % regarding ground source heat pumps. The average heat source temperatures were 3.2° C for air source heat pumps and 4.2° C for ground source heat pumps.

In the evaluation period 2012/13 the average temperature lift was 33 K (27...38 K) for the air source heat pump. Ground source heat pumps had to overcome a temperature lift of 31 K (22 ... 40 K). A joint analysis of the respective relations of temperature lift and efficiency regarding individual installations led to the conclusion that an increase in efficiency in combination with a decreasing temperature lift can be depicted only partially. This is due, among other things, to the wide differences in the coefficients of performance (COP) on the one hand and to the very different operating behavior on the other hand.

The calculation of the above mentioned SPF takes into account not only the electric energy consumption of the compressor, but also includes the consumption of the control system, the drive of the brine pump of the vent and the electric back-up heater. This additional energy consumption was calculated by determining average values for systems using the same heat source. For air source heat pumps this was 2.7 % for the control (0.7...5.4 %) and for ground source heat pumps 2.6 % (1.0 ... 8.8 %). Larger differences were determined regarding the drives in the heat source circuit. The additional energy consumption of the fans was 6.1 % (1.8 ... 12.5 %) and that of the brine pumps 4.9 % (2.1 ... 9.2 %).

On average, the additional energy consumption of the electrical back-up heaters had hardly any impact. It was 0.9 % (0.0 to 8.9 %) for air source heat pumps and 0.3 % (0.0 ... 6.0 %) for ground source heat pumps. For both, the air source installations, as well as the ground source installations a correlation with the ambient air temperature could be established regarding most of the activity of the electrical back-up heaters. With regard to the weather conditions it should be noted that the evaluation of air source heat pumps determined only half as much back-up heater activity for the period 2012/13 (2.2 %) compared to 2011/12 (4.3 %) while using a consistent data base.

Installations that were available for the analysis of the operating frequency were investigated accordingly. Air heat pumps operated an average of 2240 hours (1300 ... 4630 h), ground source heat pumps 2000 h (800 ... 4040 h). With an average of 13 (4 ... 29) there were more start-ups for air source heat pumps compared to ground source heat pumps which had an average 11 (3 ... 26). Noteworthy are the dimensions of the bandwidth, both regarding the annual hours of operation and the start-up frequency.

For the assessment of the efficiency of combinations of solar thermal and heat pump systems ten (nine ground source and one air source heat pump) were equipped with the necessary measurement instrumentation.

Ground source heat pump efficiency increased between 3 % and 15 % (four installations with solar water heating), and 6 % and 29 % (five systems with solar water heating and heating support) respectively. The combination of the air source heat pump and a solar thermal system for DHW heating led to an increase of efficiency of 6 %.

Including the measured data from the project "WP-Effizienz", it was possible to evaluate the development of the brine temperatures since early 2008 with

regard to eleven heat pumps with boreholes. For short periods (days) a strong correlation between the brine temperature and the ambient air temperature was detected. After the extraction of a small amount of heat, the brine temperatures rise again immediately. In the course of a heating season, the brine temperatures decrease slightly relative to the ambient air temperatures. In the longer term (6 years), however, no decrease in the brine temperature levels could be detected.

Overall, the new heat pump systems have been better planned and installed with greater care than the systems in the project "WP-Effizienz". On one hand, all the malfunctions that were found within the project "WP-Effizienz" were also detected in the project "WP Monitor," on the other hand they were much less common in the latter. In addition to the improved implementation of the systems, an increase of the efficiency of the individual components could be detected. This applies not only to the higher SPF's of the heat pumps but also the use of more efficient drives in the heat source circuit.

1 Projektziele und Rahmenbedingungen

Um den Entwicklungen im Wärmepumpenbereich Rechnung zu tragen und nach dem „WP-Effizienz“-Projekt weitere Fragen zu beantworten, wurde mit einem offiziellen Zeitrahmen von Dezember 2009 bis Mai 2013 das Projekt „WP Monitor“ durchgeführt. Der Auswertungszeitraum wurde mit dem „WP-Effizienz“-Projekt abgestimmt und begann daher im Juli 2010 und endete im Juni 2013. Um eine komplette dreijährige Auswertung zu ermöglichen, wurde das Projekt um einen Monat verlängert. Das Hauptziel der Untersuchung bestand in der unabhängigen und hochqualitativen Vermessung aktueller Wärmepumpen in einem breit angelegten Quervergleich.

Das Projekt „WP-Effizienz“ wurde im Zeitraum von Oktober 2005 bis September 2010 unter der Federführung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE (nachfolgend Fraunhofer ISE) durchgeführt. Daneben bestand das Projektkonsortium aus sieben Wärmepumpenherstellern und zwei Energieversorgern. Von Seiten des BMWi wurde das Projekt gefördert (Förderkennzeichen 0327401A) Ebenfalls wurden mit dem Hauptziel einer unabhängigen Ermittlung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen im Feld insgesamt etwa 110 Systeme untersucht. In der anonymisierten Auswertung der Messdaten wurden 56 Erdreich/Wasser-, 18 Luft/Wasser-, sowie 3 Wasser/Wasser-Wärmepumpen berücksichtigt. Die Anlagen waren fast ausschließlich in neuen Gebäuden mit Flächenheizsystemen installiert. Der durchschnittliche gemessene Heizwärmeverbrauch aller Gebäude betrug im Jahr 2009 72 kWh/m² [Miara et al. 2011].

Die Federführung oblag auch bei „WP Monitor“ dem Fraunhofer ISE. Das Projekt wurde sowohl finanziell als auch fachlich von elf Wärmepumpenherstellern (ait-deutschland GmbH¹, Bosch Thermotechnik¹, Dimplex, Hautec¹, Heliotherm, Stiebel Eltron¹, Ochsner, Vaillant¹, Viessmann¹, Weishaupt und Wolf) und dem Energieversorgungsunternehmen EnBW Energie Baden-Württemberg AG¹ unterstützt. Sechs Hersteller und der genannte Energieversorger nahmen bereits am „WP-Effizienz“-Projekt teil. Ergänzt wurde dieses neue Projektkonsortium von fünf weiteren Wärmepumpenherstellern.

Die Ziele dieses Vorhabens waren:

- Die aktuellen Wärmepumpensysteme in einer von den einzelnen Herstellern unabhängigen, vergleichenden Vermessung zu beurteilen und die entsprechenden Kennwerte zu ermitteln.
- Erkenntnisgewinne in Bezug auf Systeme, die bisher im Projekt „WP-Effizienz“ nicht berücksichtigt wurden. Dies betrifft vor allem Direktverdampfungssysteme oder z.B. Anlagen mit drehzahlgeregelten Verdichtern.

¹ Bereits Teilnehmer im „WP-Effizienz“-Projekt

- Die Identifikation der Optimierungsmöglichkeiten und das Auffinden von (Installations-) Fehlern der Wärmepumpenanlagen.
- Die Erhöhung der Akzeptanz der Wärmepumpentechnologie durch die Verbreitung und Präsentation der Ergebnisse aus den durchgeführten Messungen.
- Dem Thema Smart Metering generell eine Plattform zu geben sowie der komplexen Fragestellung hinsichtlich der Möglichkeiten welche Smart Metering in Verbindung mit Wärmepumpen mit sich bringen, nachzugehen.
- Der Absatz von Luft/Wasser-Wärmepumpen ist in den letzten Jahren überdurchschnittlich gestiegen. Somit spielen Luft/Wasser-Wärmepumpen eine immer größere Rolle. Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen, wurde im Rahmen von „WP Monitor“ angestrebt, dass mindestens 50% der zu vermessenden Wärmepumpen die Wärmequelle Außenluft nutzen.

Von den sechs genannten Projektzielen wurden fünf fast vollständig erreicht. Hierzu zählen neben der unabhängigen messtechnischen Untersuchung und Bewertung auch die Berücksichtigung bislang nicht vermessener Systeme sowie die Identifikation von Optimierungsmöglichkeiten. Auf diese Punkte wird ausführlich in den Kapiteln 5 und 6 eingegangen. Die im Rahmen von „WP Monitor“ durchgeführte Öffentlichkeitsarbeit zur Erhöhung der Akzeptanz der Wärmepumpentechnologie wird im Kapitel 7 vorgestellt. Das Thema Smart Metering wurde im Projekt nicht wie beschrieben verfolgt. Hierzu trugen vor allem die Verzögerungen zu Beginn des Projektes bei, was eine volle Konzentration auf die möglichst zügige Ausstattung der Anlagen mit Messtechnik und dem Messdatenerfassungssystem erforderte. Dennoch wurde dem Thema Wärmepumpen im zukünftigen Smart Grid Rechnung getragen. So wurden die Projektpartner über die parallel durch das Fraunhofer ISE durchgeführten Arbeiten zum Thema informiert und entsprechende Ergebnisse in der Members Area der Projekthomepage zur Verfügung gestellt. Ein weiteres Projektziel umfasste einen Anteil für Luft-Wärmepumpen an den untersuchten Anlagen von 50 %. Letztlich konnte mit 60 % Luft-Wärmepumpen unter den neuen Anlagen ein Anteil von 40 % erzielt werden.

2 Allgemeines zum Bericht

„WP Monitor“ gilt als Verlängerung des „WP-Effizienz“-Projektes, in dessen ausführlichem Abschlussbericht eine Vielzahl unterschiedlicher Schwerpunkte untersucht wurden. Der Großteil dieser Auswertungen widmete sich der Untersuchung von Anlagengruppen mit ähnlichen Merkmalen. Der vorliegende Bericht soll sich davon abheben und wurde mit dem Ziel angefertigt, die individuelle Wärmepumpenanlage zu fokussieren und damit die Vielfalt unterschiedlichen Betriebsverhaltens sehr verschiedener Systemen zu beleuchten. 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 bessere Charakterisierung einer Anlage durch Kombination der Ergebnisse unterschiedlicher Auswertungen in Kapitel 5. Gleiches gilt für die Kombination mit den allgemeinen Eigenschaften der Monitoringobjekte in Kapitel 4.

Trotz dieser individuellen Auswertung wurde versucht, auf eine ausreichende Anonymisierung der Messergebnisse zu achten. Hierfür musste u.a. auf die Nennung einiger Anlagencharakteristika verzichtet werden, obwohl diese für die Auswertung zum Teil erheblichen Mehrwert mit sich gebracht hätten. In erster Linie ist hierbei der COP der einzelnen Anlagen zu nennen. Auf die Teststandeffizienz wird daher in diesem Bericht nicht eingegangen.

Die Fehlerrechnung in Kapitel 3.4 kommt zu dem Ergebnis, dass JAZ mit nur einer Dezimalstelle sinnvoll gerundet sind. Dennoch werden im vorliegenden Bericht häufig zwei Nachkommastellen angegeben. Hierdurch wird einerseits der Tatsache Rechnung getragen, dass der Fehlerrechnung die maximal nach technischer Vorschrift zulässigen Fehlergrenzen unterliegen. Hersteller geben häufig geringere Fehlergrenzen für ihre Produkte an. Andererseits ermöglicht erst die Nennung von zwei Dezimalstellen die Quantifizierung mancher Effizienzeinflüsse.

Bei „WP Monitor“ werden zu einem großen Teil Anlagen untersucht, die bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ vermessen wurden. Diese Anlagen wurden im Zeitraum 2006 bis 2008 installiert. Die übrigen für „WP Monitor“ angemeldeten Anlagen wurden in den Jahren 2010 und 2011 installiert. Zur Vereinfachung wird im vorliegenden Bericht von „alten“ (aus „WP-Effizienz“ übernommen) und „neuen“ (für „WP Monitor“ neu angemeldeten) Anlagen gesprochen.

Ferner sei darauf hingewiesen, dass die Wärmepumpen in diesem Bericht meist vereinfachend nur mit ihrer Wärmequelle (Luft-, Erdreich-, Grundwasser-Wärmepumpe) näher bezeichnet werden. Eine Unterscheidung nach Wärmeträgermedium der Senke ist nicht notwendig, da alle Anlagen wasserführende Heizkreise nutzen.

3 Durchführung des Projektes

3.1 Der Monitoring-Prozess

In diesem Abschnitt werden die im Projektverlauf durchgeführten Arbeitspakete vorgestellt. Die Beschreibung orientiert sich dabei am Ablaufdiagramm in Abb. 1. Im Mittelpunkt stehen die in blau dargestellten Tasks. Diese werden durch die notwendigen Tools (rot) sowie die jeweils involvierten Projektteilnehmer (grün) ergänzt. Die Erläuterung von Details, wie die eingesetzte Messtechnik (Kapitel 3.2) oder die verwendeten Bilanzgrenzen zur Berechnung der Arbeitszahlen (Kapitel 5.1), erfolgt an anderer Stelle.

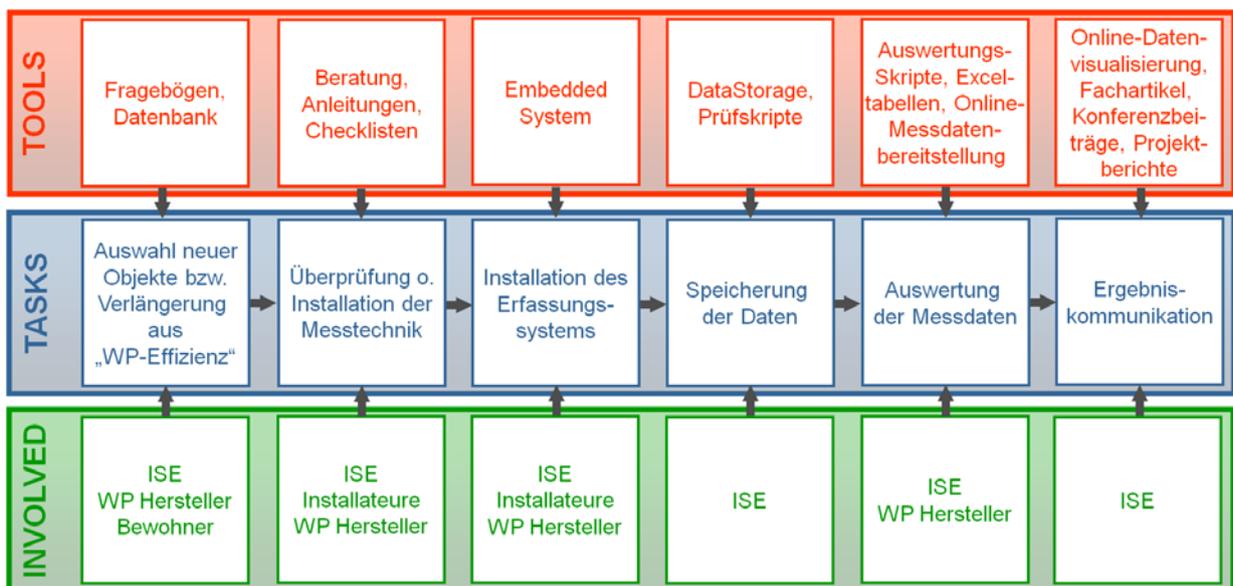


Abb. 1: Der im Rahmen von „WP Monitor“ durchlaufene Monitoring-Prozess mit seinen einzelnen Tasks sowie den jeweils notwendigen Tools und involvierten Projektteilnehmern

Task 1 - Auswahl neuer Objekte bzw. Verlängerung aus „WP-Effizienz“

Das Projektkonsortium setzte sich aus sechs Teilnehmern des Vorgängerprojektes „WP-Effizienz“ sowie fünf neuen Partnern zusammen. Die bestehenden Partner haben mit 50 Anlagen einen Großteil ihrer Wärmepumpen aus „WP-Effizienz“ verlängert. Ferner wurden von den alten Partnern auch zwölf neue Anlagen für „WP Monitor“ angemeldet. Die neuen Projektpartner haben mit insgesamt 25 Anlagen am Projekt teilgenommen. Für alle neuen Anlagen war eine entsprechende Stammdatenerhebung notwendig. Hierfür wurden Fragebögen ausgegeben. Diese bestanden aus drei Teilen und dienten der Abfrage folgender Informationen:

- Bewohner und Haus:
Nutzer, Gebäude, 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

Für die Verwaltung der Stammdaten wurde eine Datenbank erstellt. Alle in den Fragebögen enthaltenen Angaben sowie in der täglichen Projektarbeit anfallenden Informationen wurden darin verwaltet. Ferner enthält die Datenbank Angaben zu Details der Sensorik, zum Stand des Projektablaufs, der Sensorlieferung und der Installation der Messwerterfassung. Die Datenbank zeigte an, wann welche Einzelaktion durchgeführt werden musste und ermöglichte eine Kontrolle, was von wem getan wurde. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Menge an unterschiedlichsten Daten schnell und zuverlässig gespeichert, bearbeitet und analysiert wurde. Zusätzlich war es möglich, den Überblick über die zu versendende und zu installierende Messtechnik zu behalten und die Lieferung rechtzeitig zu organisieren. Die Datenbank ist so systematisiert, dass Informationen schnell abgerufen werden konnten und verschiedene Daten in einzelnen Übersichten einsehbar waren.

Task 2 – Überprüfung oder Installation der Messtechnik

In diesem Task wurden die Anlagen zuerst dahingehend unterschieden, ob sie neu ausgewählt oder verlängert wurden. Die verlängerten Anlagen konnten wiederum einer ersten oder einer zweiten Projektphase des „WP-Effizienz“-Projektes zugeordnet werden. Anlagen aus der zweiten Phase mussten keiner weiteren Prüfung unterzogen werden. Diese wurden bereits im Rahmen eines weiterentwickelten Messkonzeptes abgenommen. Die für „WP Monitor“ verlängerten Anlagen aus der ersten Phase wurden entsprechend den Regularien dieses neuen Messkonzeptes abgenommen. Im Zentrum dieser Abnahme stand ein vor Ort Termin mit der Durchführung des sogenannten Relais-tests (vgl. Task 3). Die neuen Anlagen mussten zuerst mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet werden. Dieser Vorgang lag im Aufgabenbereich des Fraunhofer ISE, der Installateure und der Hersteller. Die Hersteller stellten dem Fraunhofer ISE das Anlagenschema sowie technische Unterlagen des zu vermessenden Systems zur Verfügung. Das Fraunhofer ISE lokalisierte die Messstellen und plante die benötigte Messtechnik. Nach Rücksprache mit den Herstellern und deren Einwilligung hinsichtlich der Messtechnik, nahm das Fraunhofer ISE Kontakt mit dem Installateur vor Ort auf. Die Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer ISE und den Installateuren wurde durch eine Reihe von Unterlagen erleichtert. Für die reibungslose und fehlerfreie Montage der Sensoren wurden den Installateuren detaillierte Anleitungen zur Verfügung gestellt. Für jeden Wärmemengenzählertyp wurde ein Blatt mit Montagehinweisen und technischen Daten erstellt, wozu auch Anleitungen für die Temperatursensoren in Kugelhähnen und für die Elektrozählermontage gehörten. Weitere Unterlagen dienten der Abnahme der Anlagen durch die Hersteller und der Ausführungsprüfung bei der Ortsbegehung und Installation der Messwerterfassung. Einbau und Vorbereitung für den Anschluss der Messtechnik erfolgte durch den Installateur und den Elektriker. Auf hydraulischer Seite wurden die Wärmemengenzähler installiert und die M-Bus-Leitungen verlegt. Die elektri-

schen Verbraucher wurden auf die entsprechenden Zähler im Elektrozählerkasten geklemmt.

Task 3 – Installation des Erfassungssystems

Für die neuen Anlagen erfolgten in einem dritten Schritt das Anbringen des Messdatenerfassungssystems und das Anschließen der M-Bus und Impulsleitungen von Seiten des Fraunhofer ISE. Um sofort auf falsche oder fehlende Elektroinstallationen reagieren zu können, war in diesem Schritt auch der zuständige Elektriker vor Ort. Sowohl für die neuen als auch für die alten Anlagen aus der ersten Phase von „WP-Effizienz“ wurde ein Messkomponentencheck in Form eines Relais-tests durchgeführt, um noch höhere Sicherheit bezüglich der Zuordnung von Verbraucher und Zähler zu erlangen. Hierfür musste auch ein Werksmonteur des jeweiligen Herstellers vor Ort sein. Die Abnahme wurde protokolliert.

Tasks 4 und 5 – Speicherung und Auswertung der Messdaten

Aufgrund der komplexen Abhängigkeiten beider Tasks werden Datenfluss, Auswertung und Ergebnisdarstellung gemeinsam erläutert. Hierfür zeigt die Abb. 2 alle notwendigen Zusammenhänge.

Vom Messdatenerfassungssystem jeder Anlage wurde mehrfach täglich der Rohdatensatz des vergangenen Tages per gesicherter GSM-Verbindung (**Abschnitt 1** in der Graphik) durch den Server des Fraunhofer ISE (**Abschnitt 2**) angefragt und bei erfolgreichem Verbindungsaufbau auf diesen übertragen. Ein Zwischenspeicher vor Ort verhinderte bei Verbindungsproblemen von bis maximal zu vier Wochen den Ausfall von Messdaten.

Ebenfalls täglich wurden die Rohdaten vom Filtrationsserver (**Abschnitt 3**) abgefragt. Auf diesem Server arbeitete die Software DataStorage. Diese dient der Messdatenspeicherung sowie –filterung. Definierte Filter errechnen bspw. aus den Impulszählerständen der Elektrozähler die Minutenwerte für Energie und Leistung. Gleichzeitig wurden die einzelnen Sensoren mit verständlichen Bezeichnungen versehen. Zeitfilter errechneten durch Mittelwertbildung bzw. Addition die ¼-h sowie Tageswerte aller Sensoren. Sowohl die Rohdaten als auch alle genannten gefilterten Daten wurden mit entsprechendem Zeitstempel in einer sogenannten hdf5 Datenbank abgelegt. Diese Struktur bietet einen schnellen Zugriff auf die gewünschten Datensätze für einen definierten Zeitraum. Ebenfalls in diesem Abschnitt fand eine Prüfung der eingehenden Rohdaten statt. Bei Datenverzug erschien die Anlage mit der Dauer des Verzuges in einer automatisch generierten Email an die Projektmitarbeiter des Fraunhofer ISE.

Der Projektserver im **Abschnitt 4** diente in erster Linie der manuellen Datenauswertung. Die Basis bildeten die gefilterten Tageswerte. Hierfür wurden die Minutendaten aller relevanten Sensoren mittels Addition bzw. Mittelwertbildung zu Tageswerten hochgerechnet. Im gleichen Schritt wurden neue Größen berechnet. Tageswerte umfassen daher bspw. auch Arbeitszahlen und thermische Abtauenergie bei Prozessumkehr sowie Takt- und Pausenzeiten des Verdichters. Im Rahmen der monatlich stattfindenden manuellen Messdatenauswertung wurden die Tageswerte in die Monatstabellen kopiert. Diese Tabellen dienen der grundsätzlichen Charakterisierung der Anlagen im Hin-

blick auf Betriebsbedingungen und Performance. Hierfür wurden die eingefügten Tageswerte auf Monatswerte hochgerechnet. Anschließend fand eine Messdatenkontrolle durch einen Mitarbeiter des Fraunhofer ISE statt. Die vergleichende Auswertung wurde ebenfalls auf Excel Basis durchgeführt. Hierfür wurden die gefilterten Messdaten (Monats- und Jahreswerte) der einzelnen Anlagen in einer gemeinsamen Tabelle zusammengefasst. Arbeitszahlberechnungen wurden sowohl in den individuellen als auch in der gemeinsamen Tabelle unabhängig voneinander durchgeführt. Durch den Vergleich beider Werte bestand eine weitere Kontrollinstanz hinsichtlich der Arbeitszahlformel. Die im Rahmen der vergleichenden Auswertung ermittelten Projektergebnisse fand u.a. Eingang in Präsentationen auf Projekttreffen oder Konferenzen. Weiterhin bildeten sie den Inhalt zahlreicher Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, in Broschüren sowie in einem Fachbuch (vgl. Kapitel 7).

Auf dem Web-Server wurden den Projektpartnern die Projektergebnisse in unterschiedlicher Form zur Verfügung gestellt. Auf einer passwortgeschützten ersten Ebene (**Abschnitt 5**) bestand einerseits Zugang zu automatisch generierten Ergebnissen, den Messwerten sowie den in Abschnitt 4 erzeugten Excel Tabellen mit Monatswerten. Erstgenannte Ergebnisse entsprechen Grafiken die auf dem Filtrations-Server (**Abschnitt 3**) automatisch erstellt und auf den Web-Server kopiert wurden. Diese Grafiken umfassen die wichtigsten Kennwerte zur Beurteilung der Anlagenperformance: Die bereitgestellte thermische Energie, die notwendige elektrische Energie und die resultierende Arbeitszahl als Monatswerte sowie die Quellen- und Senkentemperaturen als Tageswerte. Darüber hinaus wurden die Tageswerte definierter Sensoren der 6 vorherigen Tage auf dem Anlagenschema dargestellt. Weiterhin half eine Anlagenbeschreibung bei der Einordnung der Ergebnisse.

Durch Eingabe eines weiteren Passwortes gelangten die Projektpartner auf eine zweite Ebene der Messdatenauswertung (**Abschnitt 6**). Hier bestand Zugang zu den Messdaten, wie sie in den hdf5-Datenbanken abgelegt waren. Der Nutzer konnte somit auf Rohdaten und gefilterte Daten in unterschiedlichen Zeitschritten zugreifen. Gleichzeitig konnten ausgewählte Sensoren in unterschiedlichen Plots dargestellt werden. Ferner bestand die Möglichkeit Sensoren und Zeiträume zum Download zu definieren.

Auf der Members Area (**Abschnitt 7**) wurden neben projektrelevanten Dokumenten wie Installationsanleitungen oder Protokolle auch sämtliche Ergebnisse bzw. Veröffentlichung mit Bezug zum Projekt abgelegt.

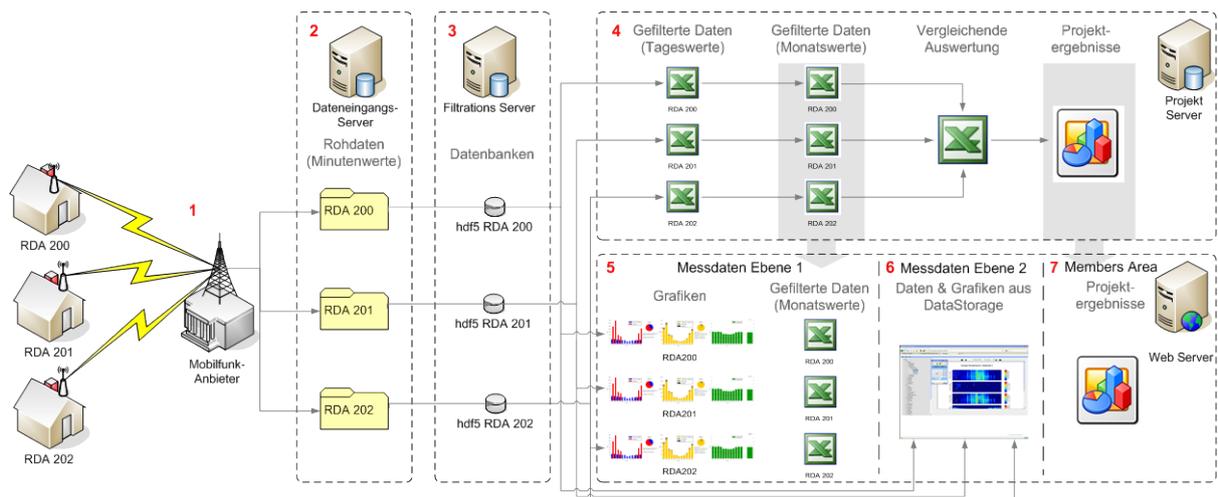


Abb. 2: Ablauf der Messdatenverarbeitung am Institut und Bereitstellung der Projektergebnisse

Tasks 6 – Ergebniskommunikation

Im Rahmen dieses Tasks wurden die Projektergebnisse zielgruppenspezifisch aufbereitet und kommuniziert. Die teilnehmenden Projektpartner erhielten einen Zwischen- sowie den vorliegenden Endbericht. Darin werden alle Messergebnisse detailliert zusammengefasst. Der Öffentlichkeit wurde eine Kurzfassung des Endberichtes mit den Hauptergebnissen des Projektes zur Verfügung gestellt. Vor allem für diese Zielgruppe wurden zudem Tages- und Monatsmessdaten sowie die dazugehörigen Grundinformationen auf der Projekt-homepage veröffentlicht. Die Zahl der Anlagen deren Messdaten täglich aktualisiert auf der Homepage gezeigt wurden, wuchs im Projektverlauf an und erreichte ein Maximum von 26. Speziell für die Bewohner wurden sogenannte Einzelberichte mit den Messergebnissen zu ihrer jeweiligen Anlage angefertigt. Das Fachpublikum wurde im Rahmen einer Vielzahl von Beiträgen in Fachzeitschriften sowie durch Vorträge auf Konferenzen erreicht.

Auf die im Projektrahmen erfolgte Öffentlichkeitsarbeit wird im Einzelnen im gleichnamigen Kapitel 7 eingegangen. Dieses enthält zudem Listen mit den Veröffentlichungen in den Rubriken Fachbeiträge auf Konferenzen sowie in Fachzeitschriften.

3.2 Messtechnik

Dieser Abschnitt widmet sich den zu vermessenden Komponenten sowie den hierfür eingesetzten Messinstrumenten. Die Fehlergrenzen der Messtechnik werden im folgenden Kapitel 3.3 erläutert.

Der Hauptgrund für die Messung lag in der zuverlässigen Ermittlung der Effizienz der Wärmepumpenanlagen. Wie durch die Beschreibung der Bilanzgrenzen in Kapitel 5.1 ersichtlich ist, müssen hierfür neben der thermischen Energie zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung folgende Elektroenergieverbraucher bilanziert werden:

- Verdichter und Steuerung
- Antrieb in der Wärmequelle (Ventilator, Sole- oder Brunnenpumpe)
- 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: Positionen der Wärmemengenzähler

Wärmequelle	Wärmesenke
Sole- oder Wasserkreis bei Erdreich-Wärmepumpen	Gemeinsamer Ladekreis (Trinkwasser und Raumheizung / Pufferspeicherbeladung)
Sole- oder Wasserkreis bei Grundwasser-Wärmepumpen	Trinkwasserspeicherladekreis
Solekreis zur getrennten Außeneinheit bei Luft-Wärmepumpen	Trinkwarmwasserzapfung
Solevorwärmung durch Abluft	Trinkwasserzirkulation
Heizkreis als Wärmequelle für Trinkwarmwasser-Wärmepumpen	Heizungspufferspeicherladekreis
Solarkreis zum Trinkwasser-, Heizungspuffer- oder Kombispeicher	Raumheizungskreis
	Kreis der passiven Kühlung

Elektroenergiezähler

Tabelle 2: Positionen der Elektroenergiezähler

Verdichter (ggf. inkl. Wärmequellenantrieb oder Steuerung der Wärmepumpe)	Ladepumpe für Heizungspufferspeicher
Antrieb im Wärmequellenkreis (Ventilator, Sole- oder Brunnenpumpe)	Gemeinsame Ladepumpe für Trinkwasserspeicher und Heizungspufferspeicher
Steuerung der Wärmepumpe (je nach Verschaltung inkl. Energie für weitere Pumpen)	Heizkreispumpe
Steuerung der Solaranlage (je nach Verschaltung inkl. Energie für die Solarpumpe)	Solarkreispumpe
Steuerung der passiven Kühleinheit (je nach Verschaltung inkl. Energie für die Pumpe zur passiven Kühlung)	Pumpe zur passiven Kühlung
Heizstab (im gemeinsamen Wärmepumpenvorlauf, im Trinkwasserspeicher, im Pufferspeicher)	Zirkulationspumpe
Ladepumpe für Trinkwasserspeicher	Abluftventilator

Temperatursensoren (nicht als Teil des Wärmemengenzählers)

- Außenluft (am Gebäude oder bei Luft-Wärmepumpe zum Teil im Zuluftkanal)
- Raumluft im Wohnbereich
- Raumluft im Keller

Ausnahmen hinsichtlich der Messstellen traten insbesondere bei folgenden Konfigurationen auf:

- Direktverdampfer (keine Vermessung der Wärmequelle)
- Direktkondensation im Trinkwasserspeicher (keine Vermessung der Beladung)
- Kompaktgeräte (teilweise keine Vermessung der Beladung des integrierten thermischen Speichers)

3.2.1 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 100, 1.000 und 10.000 Impulsen pro Kilowattstunde.

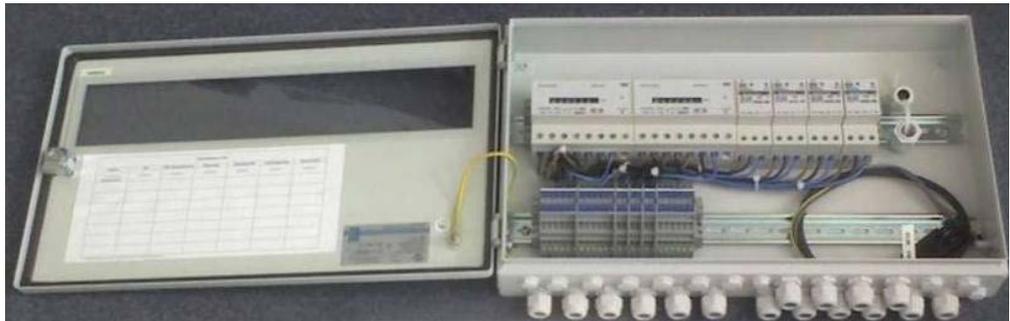
Abb. 3: Wechsel- (links) und Drehstromzähler (rechts) von EMU Elektronik AG (Quelle)



In Anlagen aus der ersten Phase des „WP-Effizienz“-Projektes wurden Elektrozähler der Firma Saia-Burgess Controls AG verwendet. Für Anlagen der zweiten Phase sowie neu hinzugekommenen Anlagen wurden Elektrozähler von EMU Elektronik AG eingesetzt. Diese Elektroenergiezähler wurden in Wechsel- und Drehstromausführung in Abb. 3 dargestellt. Entsprechend den Anforderungen durch die zu vermessende Anlage, wurden die notwendigen

Elektrozähler ausgewählt und, wie in Abb. 4 dargestellt, in einem Elektrozählerkasten zusammengefasst.

Abb. 4: Elektrozählerkasten



3.2.2 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 Rahmen der Vorbereitung des „WP-Effizienz“-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. Die beiden Ladekreise, der Heizkreis (ggf. vor und nach dem Pufferspeicher) sowie der Trinkwasserspeicherladekreis, 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. Die Bilanzierung der Energiemenge für Trinkwarmwasser gestaltete sich bei Wärmepumpen in Kompaktbauweise (Platzmangel) als komplizierter oder war im Fall von Direktkondensation nicht möglich. In diesen Fällen wurde die Entnahme aus dem Trinkwasserspeicher gemessen. Hierfür kamen trinkwassergeeignete Ringkolbenzähler sowie das Rechenwerk F 22 zum Einsatz.

Abb. 5: von links oben, Ultraschallwärmemengenzähler F 96, Industriezähler Typ MTH-I, Ringkolbenzähler, Rechenwerke F 22 und MF 4 (Quelle: Elster Messtechnik GmbH)



Die Wärmequellenseite wurde bei Erdreich-Anlagen mit Industriezählern der Bauart MTH-I und dem Rechenwerk MF 4 vermessen. Bei Grundwasser als Wärmequelle kamen mit dem F 96 die gleichen Ultraschall-Wärmemengenzähler wie bei den Wärmesenken zum Einsatz. 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.

3.3 Fehlergrenzen der Messtechnik

In den folgenden Abschnitten sind die Fehlergrenzen der im Feldtest verwendeten Messtechnik beschrieben. Dabei werden thermische und elektrische Messgrößen getrennt voneinander betrachtet. Im anschließenden Kapitel 3.4 erfolgt eine exemplarische Fehlerrechnung für eine Arbeitszahlbestimmung auf Basis typischer Randbedingungen innerhalb des Projektes „WP Monitor“.

3.3.1 Thermische Energien

Zu den thermischen Energien zählen die von den Wärmepumpen bereitgestellten (Wärmesenke) sowie jene von der Wärmepumpe aufgenommen Energiemengen (Wärmequelle). Die thermischen Energien wurden mit Wärmemengenzählern ermittelt. Wie in Kapitel 3.2 bereits ausführlich beschrieben, bestehen diese aus einem Temperatursensorkonzept für die Ermittlung der Differenz aus Vor- und Rücklauftemperatur, einem Durchflusssensor für die Ermittlung des Volumenstroms und einem Rechenwerk, welches die Eingangsgrößen zu Energiemengen verarbeitet.

Nach DIN EN 1434-1 ist die Fehlergrenze des vollständigen Wärmemengenzählers die arithmetische Summe der Fehlergrenzen der Teilgeräte. Die Fehlergrenzen für die Teilgeräte ergeben sich aus der DIN EN 1434-1 und den Richtlinien 79/830/EWG, 75/33/EWG und 2004/22/EG.

In Anhang 1 sind die im Projekt eingesetzten Wärmemengenzähler und ihre Fehlergrenzen für die verschiedenen hydraulischen Kreise gelistet. Dabei werden die einzelnen Komponenten eindeutig mit Hersteller und Typ beschrieben sowie die notwendigen Informationen zum Messfehler gegeben.

3.3.2 Elektrische Energien

Die elektrischen Energien wurden mit Stromzählern ermittelt. Die Fehlergrenzen für die Elektrozähler ergeben sich aus der DIN EN 62053-21.

Die Elektrozähler und ihre Fehlergrenzen werden in Anhang 2 tabellarisch dargestellt. Dabei wird zwischen Elektrozählern für Wechselstromverbraucher und Drehstromverbraucher unterschieden. Zudem erfolgt eine Unterscheidung zwischen den in der ersten Phase bei „WP-Effizienz“ (Phase I) und den anschließend (Phase II) verwendeten Stromzählern (vgl. Kapitel 4.2).

3.3.3 Außentemperaturen

Zur Ermittlung der Außentemperatur kamen in Phase I Temperaturfühler mit Halbleitersensoren zum Einsatz. Mit dem Übergang zu Phase II wurden Pt100 verwendet. Die eingesetzten Sensoren und deren Fehlergrenzen sind in Anhang 3 aufgeführt. Die Außentemperaturen fließen nicht in die Berechnung der Jahresarbeitszahl ein.

3.4 Fehlerrechnung

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

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

Nach DIN EN 1434-1 ergibt sich die Fehlergrenze eines vollständigen Wärmehählers 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 (vgl. Kapitel 3.3.1) maximal zulässigen Fehler an.

Für das Rechenwerk ergibt sich der Fehler zu:

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

Für das Temperaturfühlerpaar ergibt sich der Fehler zu:

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

Für den Volumenstromsensor ergibt sich der Fehler zu:

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

Der für diese Berechnung herangezogene Wärmemengenzähler 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 Primäranstriebs und der Steuerung aufgenommenen elektrischen Energie berücksichtigt werden.

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

Die Jahresarbeitszahl berechnet sich nach folgender Formel:

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

mit

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

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

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

mit

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

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

Tabelle 3: Für die Fehlerrechnung angenommene Bedingungen

Messinstrument	Größe	Wert	Einheit
Wärmemengenzähler	Temperaturdifferenz	5,0	K
	Volumenstrom	1,05	m³/h
	Laufzeit t	1800	h
Elektrozähler	elektrische Arbeit	2600	kWh

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

Tabelle 4: Ausgangswerte sowie die Ergebnisse für relative und absolute Fehler der Teilgrößen- sowie der Arbeitszahl 2

Größe	Formelzeichen	Fehlergrenze	gemessener Wert	Einheit	absoluter Fehler	relativer Fehler
Temperaturdifferenz	dT	E_t	5,0	K	0,12	2,3 %
Volumenstrom	\dot{V}	E_V	1,05	m ³ /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/m ³	10,98	1,1 %
elektrische Energie	E_{el}	E_p	2600,0	kWh	52,00	2,0 %
Arbeitszahl 2	AZ2	-	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.

3.5 Das Messdatenerfassungssystem

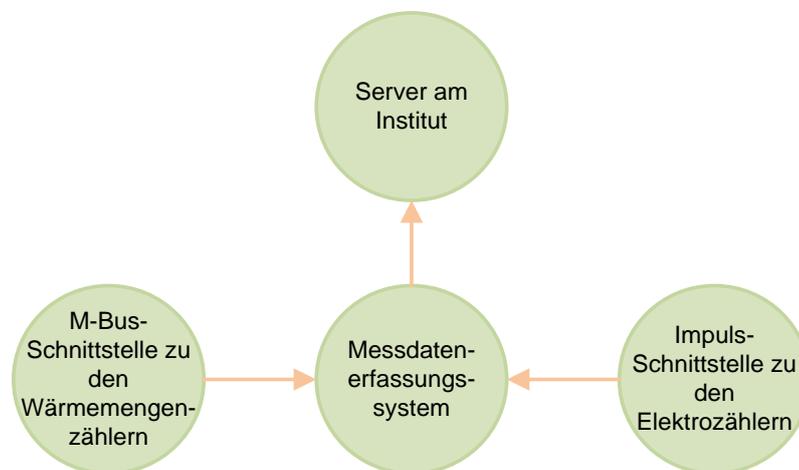
Dieser Abschnitt beschreibt die Datenerfassung und -speicherung vor Ort sowie die Übertragung der Rohdaten zur weiteren Auswertung an das Institut.

Das Messdatenerfassungssystem (MDES) hat folgende Aufgaben:

- Abfrage der Messwerte (minütlich)
- Speichern der Messwerte (bis zu 30 Tage)
- Erreichbarkeit per GSM

Das MDES stellt somit, entsprechend der Abb. 6, die Kommunikationseinheit zwischen den einzelnen Wärmemengenzählern, den Elektrozählern sowie dem Server am Institut dar.

Abb. 6: schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Messtechnik, Messdatenerfassungssystem und Institutsserver



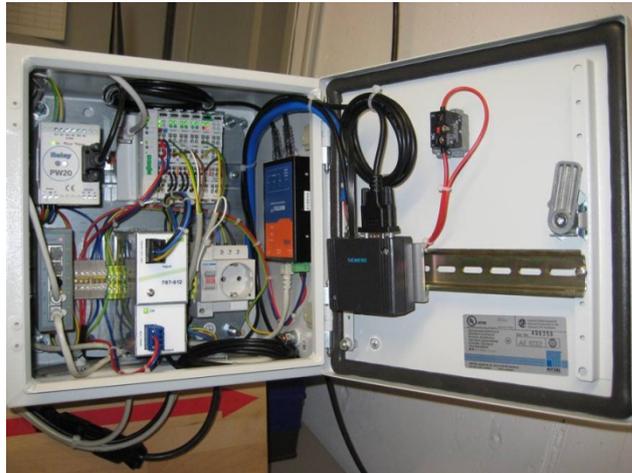
Das MDES im Zentrum der Grafik ist mit einem Embedded System ausgestattet. Dies umfasst einen Rechner mit dem Betriebssystem Linux, auf welchem das Messdatenerfassungsprogramm läuft. Es hat die Aufgabe, die Messwerte im Minutentakt von den Wärmemengen- und Elektrozählern abzufragen. Diese Messwerte werden in einer Datei für jeden Messtag abgespeichert. Der Server des Fraunhofer ISE fragt das MDES 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 ID 1 bis zur jeweils letzten ID eines Systems.

Abb. 7: Messdatenerfassungssystem, eingesetzt bei den vorherigen „WP-Effizienz“-Anlagen der zweiten Phase sowie den neuen Anlagen



Zum Auslesen der Elektrozähler wird deren Impulsausgang von einer Counterplatine (Anlagen der ersten Phase von „WP-Effizienz“) beziehungsweise dem 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 Abb. 7 zeigt ein Messdatenerfassungssystem, wie es seit der zweiten Phase von „WP-Effizienz“ eingesetzt wurde.

4 Charakterisierung der Monitoring Objekte

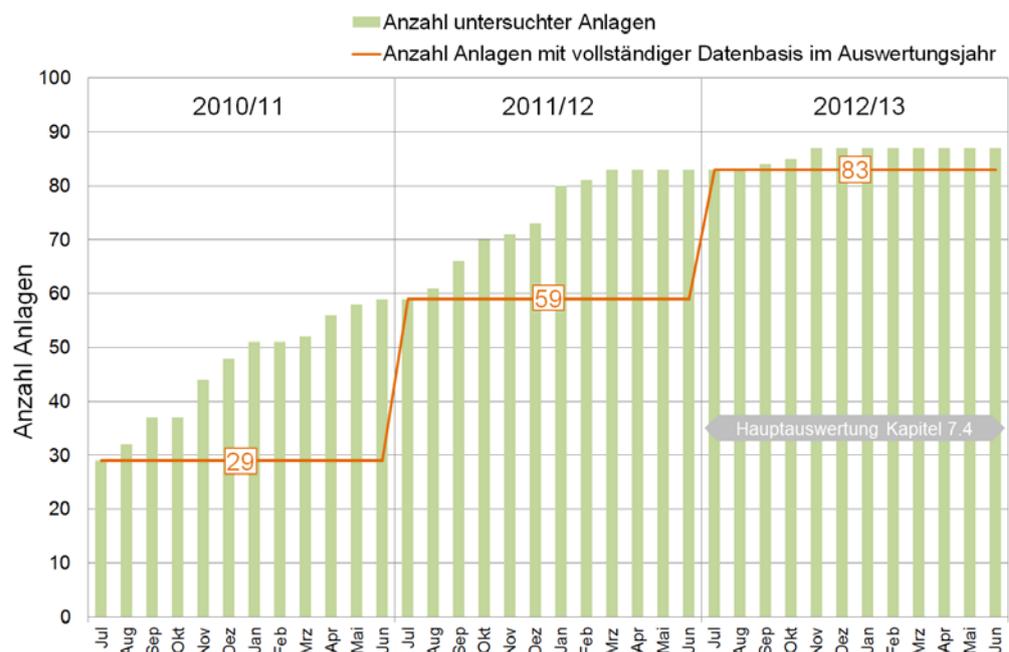
Die nachfolgende Charakterisierung erfolgt auf Basis der Stammdaten, die von den Projektpartnern, den Bewohnern und den Installateuren zur Verfügung gestellt wurden. Eine zusätzliche, tabellarische Zusammenfassung dieser individuellen Eigenschaften der Untersuchungsobjekte erfolgt, getrennt nach den Wärmequellen Erdreich (Anhang 4), Luft (Anhang 5) und Grundwasser (Anhang 6).

Die Vorstellung erfolgt für alle im Projektrahmen messtechnisch untersuchten Anlagen. Eine dieser Anlagen, die Wasser/Wasser-Wärmepumpe **ID 152**, wird aufgrund von Messtechnik-Problemen nicht im Ergebniskapitel 5 ausgewertet.

4.1 Entwicklung der Datenbasis im Projektverlauf

Die Anzahl der untersuchten Anlagen nahm im Projektverlauf kontinuierlich zu. Wie anhand der grünen Säulen in Abb. 8 ersichtlich ist, wuchs diese zwischen Juli 2010 und Juni 2013 von 29 auf 87 auswertbare Wärmepumpenanlagen an. Die in Kapitel 3.1 beschriebenen Tasks 1 bis 3 des Monitoring Prozesses (von Auswahl der Objekte bis Installation von Messtechnik und Messwerterfassungssystem) nahmen etwa 1,5 Jahre in Anspruch.

Abb. 8: Entwicklung der Datenbasis im Auswertungszeitraum Juli 2010 bis Juni 2013



Die orangefarbene Linie zeigt die Anzahl der jeweils pro Jahr zur gemeinsamen Auswertung zur Verfügung stehenden Anlagen. Unter Berücksichtigung einer identischen Datenbasis für einen definierten Auswertungszeitraum stünden jeweils folgende Anzahlen an Wärmepumpen zur Verfügung:

- Juli 2010 bis Juni 2013: 29 Anlagen
- Juli 2011 bis Juni 2013: 59 Anlagen

- Juli 2012 bis Juni 2013: 83 Anlagen

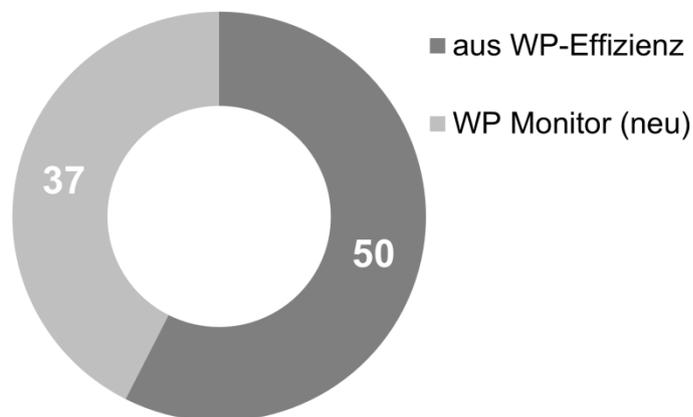
Infolgedessen wird sich die Hauptauswertung im Kapitel 5.4 auf den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 beschränken.

4.2 Anlagen aus „WP-Effizienz“ und neue Anlagen

Das Projekt „WP Monitor“ kann als Nachfolger des zwischen 2006 und 2010 durchgeführten Projektes „WP-Effizienz“ verstanden werden. Auch dieses Vorhaben hatte die unabhängige Untersuchung der Effizienz und des Betriebsverhaltens von Wärmepumpenheizungsanlagen zum Ziel. Abgesehen von einem Wärmepumpenhersteller waren alle Partner aus „WP-Effizienz“ Teilnehmer bei „WP Monitor“. Das Konsortium wurde zudem durch fünf neue Wärmepumpenhersteller erweitert. Diese Struktur führte letztlich dazu, dass ein Teil der Anlagen in „WP Monitor“ bereits bei „WP-Effizienz“ und ein anderer Teil frühestens seit dem Projektstart von „WP Monitor“ messtechnisch untersucht wurden. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die im Rahmen von „WP-Effizienz“ untersuchten Modelle etwa aus den Jahren 2006/07, die übrigen Modelle aus den Jahren 2010/11 stammen. Hieraus ergaben sich vor allem Unterschiede bei den COP-Werten.

Obwohl 50 Anlagen aus dem Vorgängerprojekt übernommen wurden, galten zu Beginn des Messzeitraumes nur 29 Wärmepumpen als auswertbar (vgl. Kapitel 4.1). Dies hängt mit der in Kapitel 3.1 erläuterten, im Rahmen von Task 2 vorgenommenen, Überarbeitung und neuerlichen Abnahme der Messtechnik zusammen.

Abb. 9: Aufteilung nach verlängerten („WP-Effizienz“) und seit „WP Monitor“ untersuchten Anlagen



Wie die Abb. 9 zeigt, wurden 50 Anlagen bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ messtechnisch untersucht. Insgesamt 37 Wärmepumpenheizungsanlagen kamen im Rahmen von „WP Monitor“ hinzu. Von diesen zusätzlichen Anlagen wurden 25 von erstmalig teilnehmenden Herstellern und 12 von Herstellern, die bereits an „WP-Effizienz“ teilgenommen haben, angemeldet.

4.3 Wärmequellenanlage

Die von den untersuchten Wärmepumpen genutzten Wärmequellen werden in der

Abb. 10 zeigt. Das Diagramm umfasst drei Kreisinge, die von innen nach außen die entsprechenden Unterkategorien darstellen. Der innere Ring gibt wieder, ob die Anlage bereits im „WP-Effizienz“-Projekt oder erst im Rahmen von „WP Monitor“ untersucht wurde. Der mittlere Ring unterscheidet nach den Wärmequellen Außenluft, Erdreich und Grundwasser. Das gesamte Projekt umfasst 35 Luft-Wärmepumpen (40 %), 47 Erdreich-Wärmepumpen (52 %) sowie fünf Grundwasser-Wärmepumpen (6 %). Relativ deutlich zeigt sich der Trend hin zur Wärmequelle Außenluft. Knapp 60 % der Neuanmeldungen nutzen diese Wärmequelle, verglichen mit 35 % Erdreich-Anlagen. Einige Wärmepumpen nutzen zwei Wärmequellen. Diese werden entsprechend ihrer primären Wärmequelle einsortiert. Gemeinsam mit weiteren besonderen Merkmalen sind diese Anlagen im dritten Ring des Diagrammes gekennzeichnet. Unter den Luft-Wärmepumpen gibt es bspw. zwei Anlagen, die Sole als Wärmeträgermedium zwischen Außen- und Inneneinheit nutzen. Eine weitere Anlage verfügt über einen ähnlichen Aufbau, wobei die Sole zusätzlich durch einen kleinen Erdwärmekollektor geführt wird. Bei den Erdreich-Wärmepumpen sind die Besonderheiten noch vielfältiger. Neben den Anlagen mit konventionellen Erdwärmesonden, die mit 64 % den Großteil der untersuchten Systeme ausmachen, und den Wärmepumpen mit konventionellen Erdwärmekollektoren (19 %) treten u.a. verschiedene Kombinationen auf. Zwei Anlagen nutzen zusätzlich die Abluft zur Solevorwärmung, eine weitere Wärmequellenanlage besteht aus Erdwärmekollektor und Energiezaun. Der Energiezaun tritt auch einmal als alleinige Hauptwärmequelle auf. Die Erdwärmesonde einer Wärmepumpe ist mit Wasser gefüllt, was durch ihre außergewöhnliche Länge von 300 m ermöglicht wird. Zu Neuanmeldungen für „WP Monitor“ zählen auch eine Anlage mit CO₂-Sonde sowie zwei Flachkollektorsysteme mit Direktverdampfung.

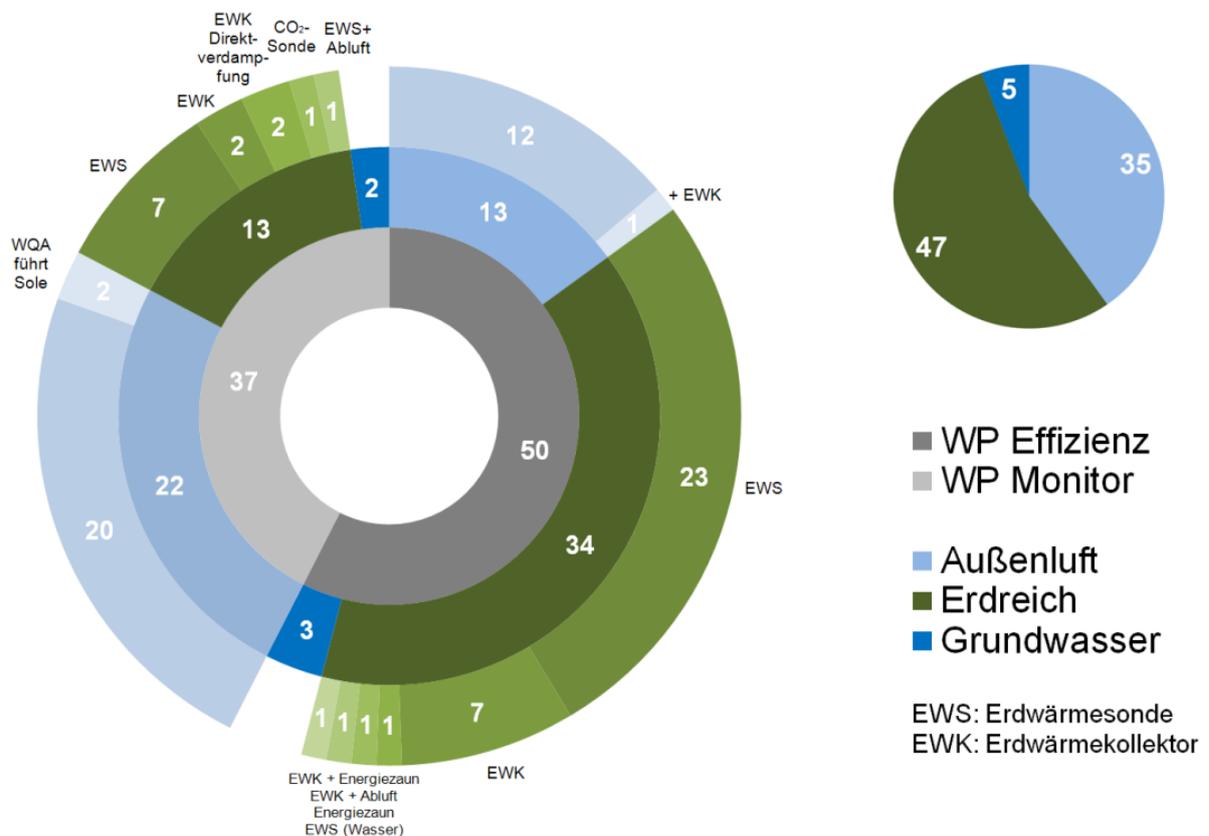


Abb. 10: Wärmequellen der Wärmepumpen sowie unterschiedliche Ausführungen

Von den 33 Erdreich-Anlagen mit Erdwärmesonden sind für 27 Anlagen die Dimensionen bekannt. Die entsprechende Statistik ist in Abb. 11 dargestellt. Die Säulen geben die addierte Länge der Einzelsonden wieder. Die Anzahl der Sonden ist am unteren Ende der Säulen dargestellt. Den Quotient beider Werte und damit die jeweilige Bohrtiefe kennzeichnen die orangefarbenen Raute. Die Bezeichnung der Säulen mit ID-Nummer ermöglicht einerseits den Projektpartnern die Identifikation der eigenen Anlage und andererseits die Verknüpfung der im aktuellen Kapitel vorgestellten Eigenschaften mit den später dargestellten Ergebnissen. Die Grafik veranschaulicht deutlich die stark variierenden Dimensionierungen. Im Schnitt liegen die Gesamtlängen bei 146 m. Die Bohrtiefen reichen von 30 m bis zu 300 m.

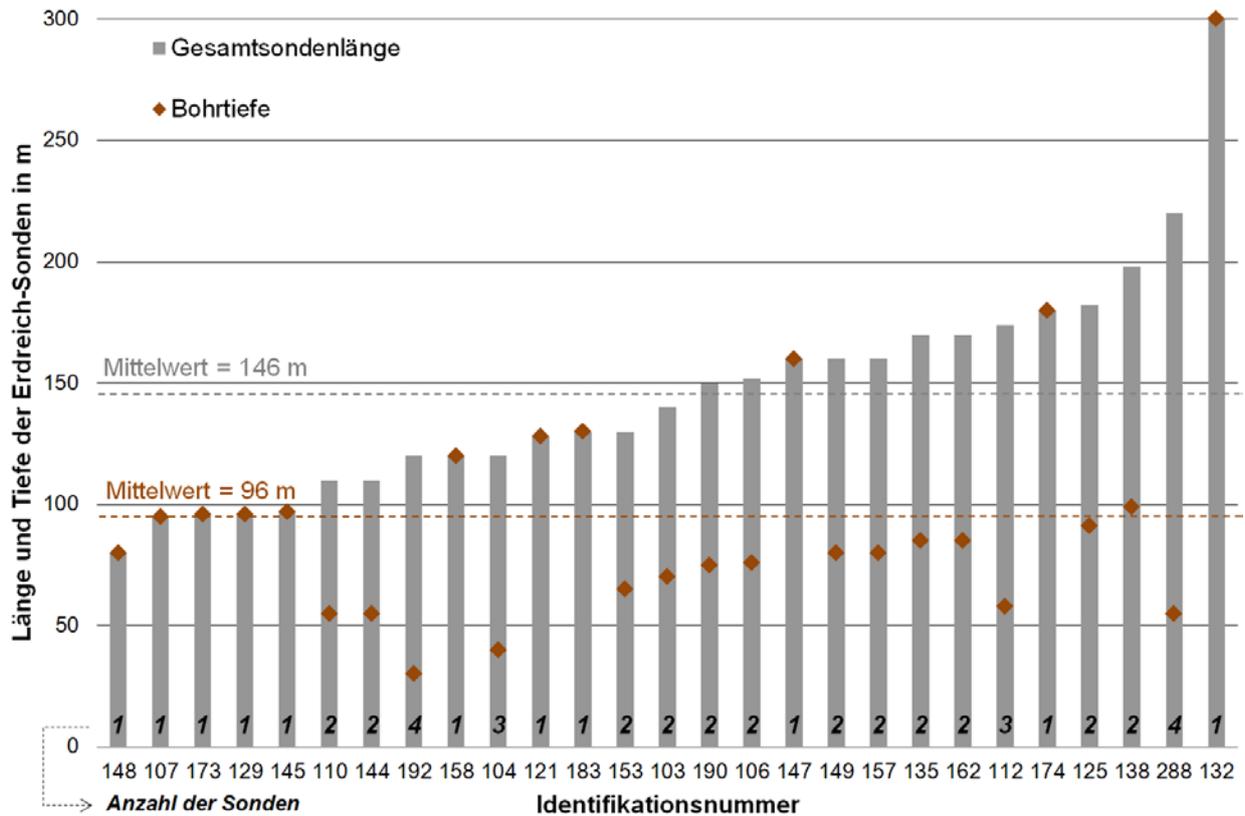
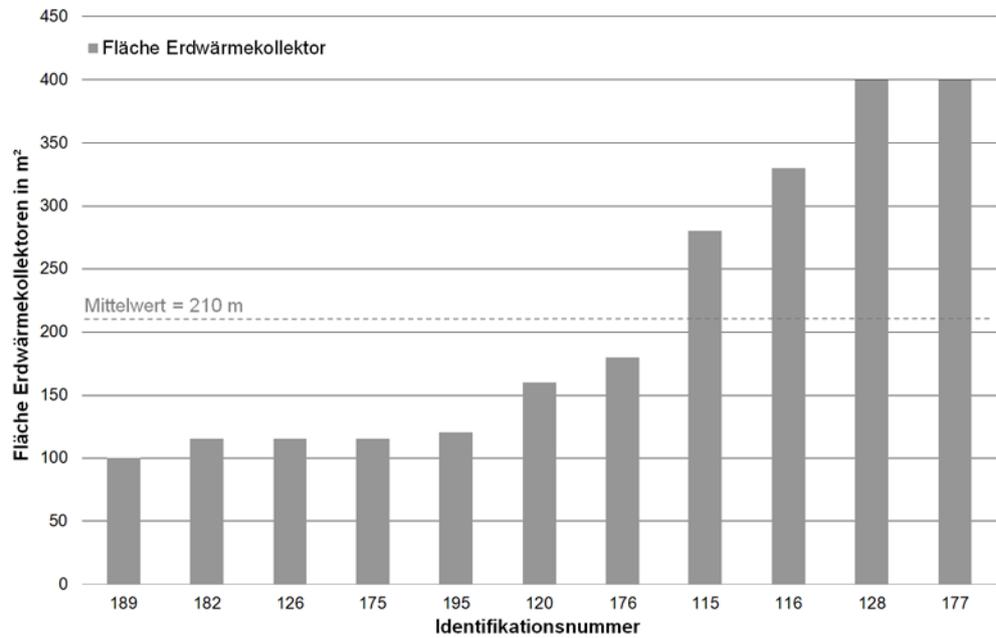


Abb. 11: Gesamtlänge und Anzahl von 27 Erdreichsonden

Von den 12 Wärmepumpen mit Erdwärmekollektoren sind die Dimensionen der Wärmequellenanlage von 11 Anlagen bekannt und in der Abb. 12 dargestellt. Auch hier gibt es große Unterschiede. Die Werte reichen von 100 m² bis 400 m² bei einem Mittelwert von 210 m².

Abb. 12: Verlegefläche von 11 Erdreichkollektoren

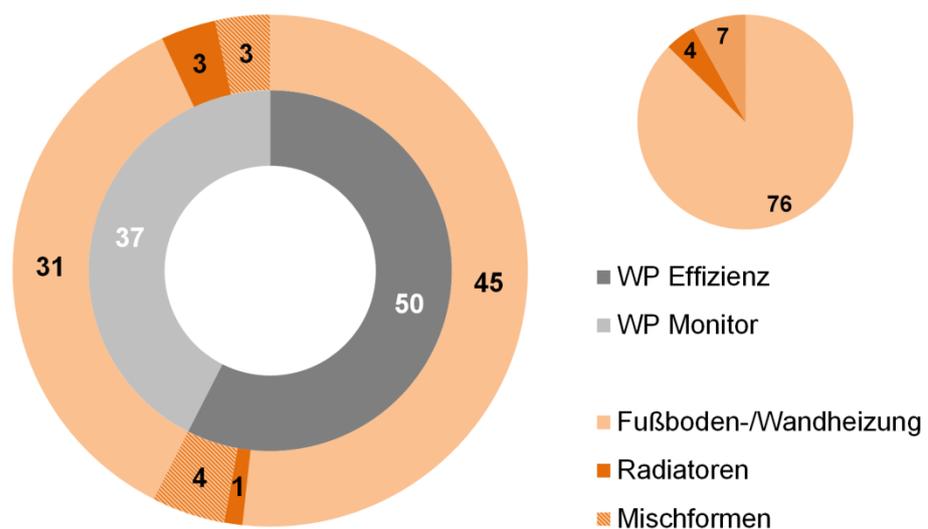


4.4 Wärmenutzungsanlage

Dieses Kapitel widmet sich der Charakterisierung der verwendeten Heizwärmeübertrager sowie der ausgeführten Speicherkonzepte.

Wie die Abb. 13 zeigt, dominieren mit einem Anteil von 87 % die für die Wärmepumpeneffizienz günstigen großflächigen Wärmeübertrager, wobei fast ausschließlich Fußbodenheizungen installiert wurden. Vier Wärmepumpen heizen über Radiatoren und sieben Anlagen verfügen über Mischsysteme. Beim Vergleich alter und neuer Systeme fallen keine nennenswerten Unterschiede auf.

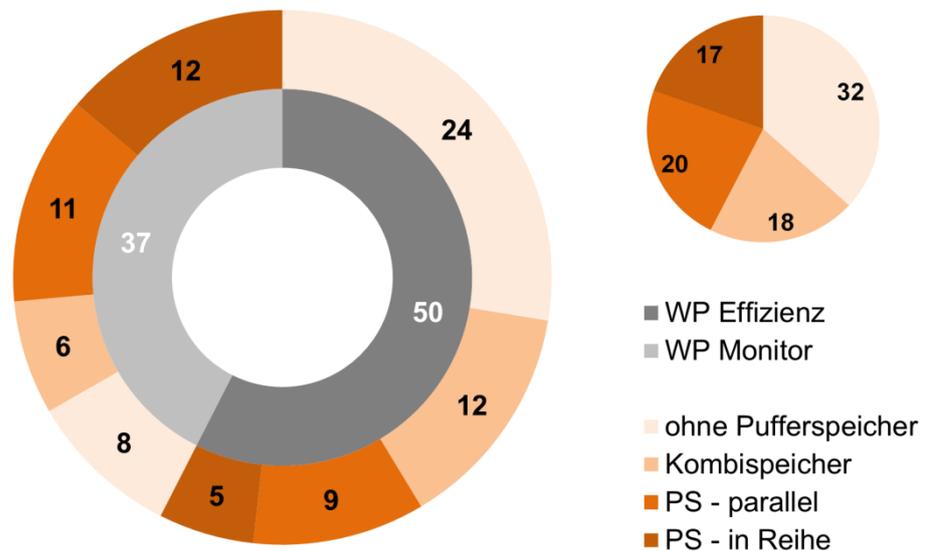
Abb. 13: Spezifizierung der Wärmeübertragungssysteme



Eine weitere Charakterisierungsmöglichkeit im Bereich der Wärmenutzungsanlage besteht im gewählten Speicherkonzept. Einen entsprechenden Über-

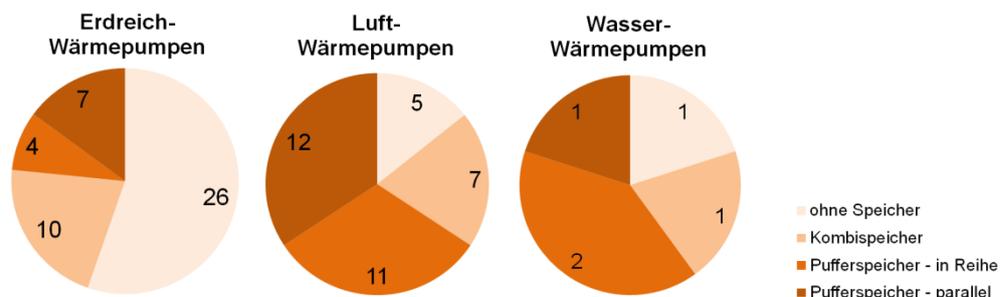
blick gibt die Abb. 14. Demnach wird bei etwa einem Drittel aller Anlagen (32) der Heizkreis direkt, das heißt ohne zusätzlichen Pufferspeicher, versorgt. Eine kombinierte Wärmespeicherung für die Betriebsmodi Trinkwassererwärmung und Raumheizung wurde bei 18 Anlagen realisiert. Den bei der gewählten Unterscheidung mit 43 % größten Anteil machen Anlagen mit Heizungspufferspeicher aus. Diese Anlagen teilen sich etwa zu gleichen Teilen in Systeme, die ausschließlich das Volumen des Heizkreises erhöhen (in Reihe installiert, 17 Anlagen) sowie in Systeme, die Heizkreis und Wärmeerzeuger zusätzlich hydraulisch entkoppeln (parallel installiert, 20 Anlagen).

Abb. 14: Verteilung der Speicherkonzepte



Die Abb. 15 zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen Wärmequelle und gewähltem Speicherkonzept. Bei Erdreich-Anlagen beheizen 55 % der 47 Wärmepumpen den Heizkreis direkt, bei Luft-Wärmepumpen sind es hingegen nur 5 von 35 (14 %). Kombispeicher nehmen sowohl bei Erdreich- (21 %) als auch bei Luft-Wärmepumpen (20 %) einen ähnlichen Anteil ein. Als Heizungspufferspeicher (66 %) wurden bei Luft-Wärmepumpen etwa zu gleichen Teilen Parallel- und Reihenspeicher installiert. Bei Erdreich-Wärmepumpen wurde die Mehrzahl der Heizungspufferspeicher parallel installiert. Für die Wasser-Wärmepumpen wird die Statistik der Vollständigkeit halber dargestellt. Fundierte Rückschlüsse lassen sich aufgrund der geringen Anzahl nicht ziehen.

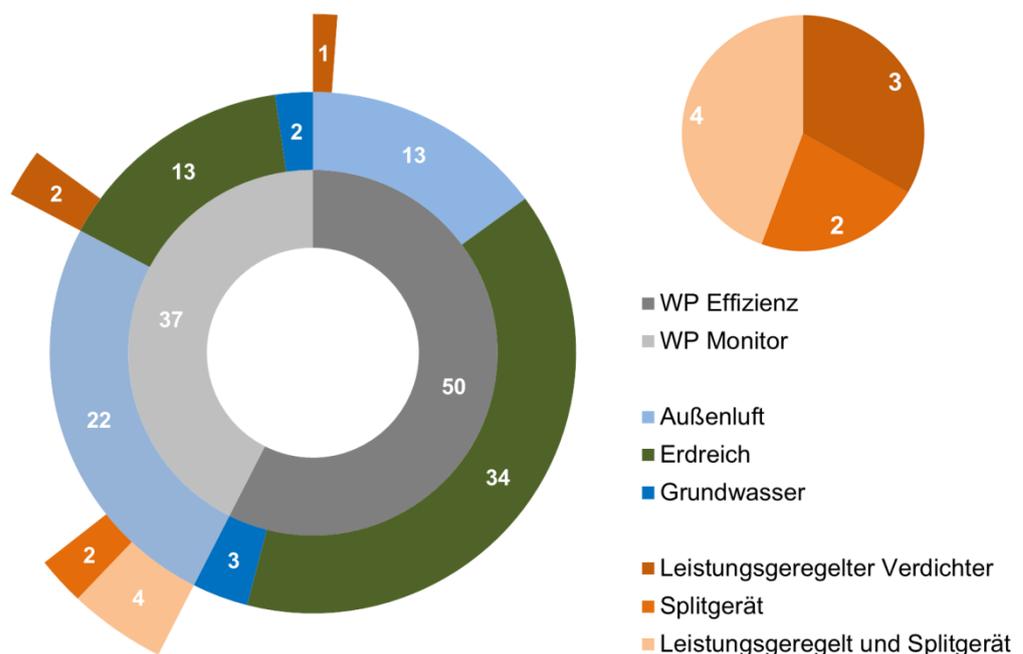
Abb. 15: Verteilung der Speicherkonzepte unter Berücksichtigung der Wärmequelle



4.5 Splitgeräte und leistungsgeregelte Verdichter

In der Abb. 16 werden die Merkmale Splitgerät sowie Wärmepumpe mit leistungsgeregeltem Verdichter den Wärmequellen sowie der Projektzugehörigkeit zugeordnet. Insgesamt wurden drei Wärmepumpen mit leistungsgeregeltem Verdichter, zwei Wärmepumpen als Splitgerät sowie vier Wärmepumpen mit beiden Eigenschaften installiert. Ein Großteil (sechs) dieser Wärmepumpen zählen zu den neuen Anlagen mit der Wärmequelle Außenluft. Unter Wärmepumpen aus „WP-Effizienz“ befand sich nur eine Anlage mit leistungsgeregeltem Verdichter. Hinsichtlich der Splitgeräte ist zu beachten, dass diese Darstellung nur Anlagen mit Teilen des Kältekreis inner- und außerhalb des Gebäudes umfasst. Wärmepumpen mit Außen- und Inneneinheit, deren Inneneinheit den kompletten Kältekreis umfasst, werden nicht aufgeführt.

Abb. 16: Verteilung der Merkmale Splitgerät und leistungsgeregelter Verdichter

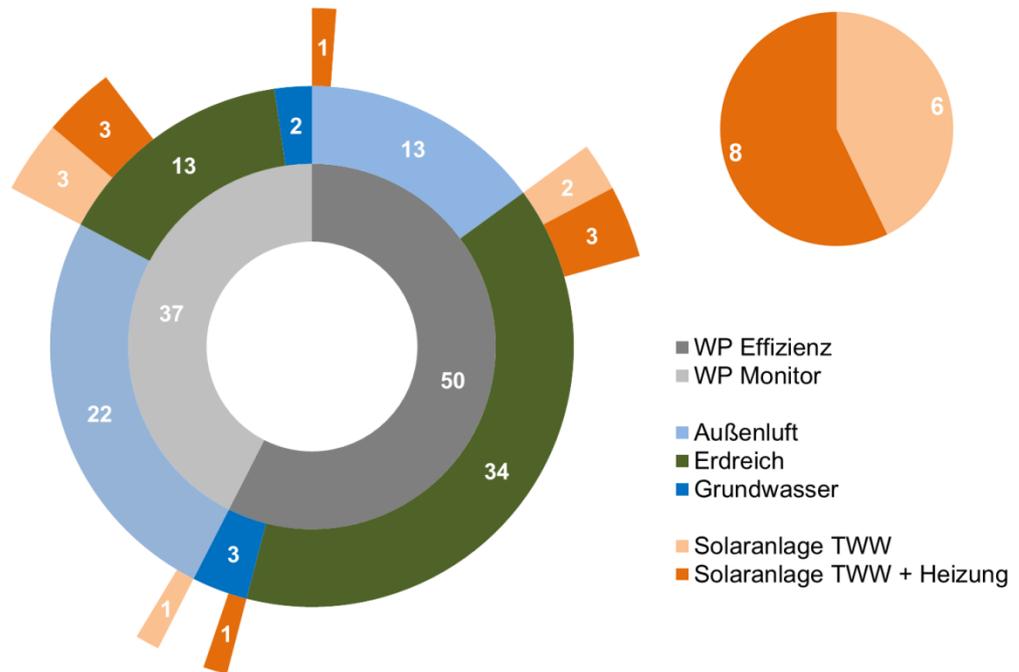


4.6 Einbindung von Solarthermieanlagen

Im Projektrahmen wurde auch eine größere Anzahl an Wärmepumpen untersucht, die mit Solarthermieanlagen über zusätzliche Wärmeerzeuger, teils zur Trinkwassererwärmung teils auch zusätzlich zur Heizungsunterstützung, verfügen. Eine entsprechende Statistik veranschaulicht Abb. 17. Von den insgesamt 14 kombinierten Heizungssystemen dienen bei sechs die Solaranlagen ausschließlich der Trinkwassererwärmung und bei acht zusätzlich der Heizungsunterstützung. Die Aufteilung wurde durch die hydraulische Einbindung der Solaranlage und unabhängig von der Dimensionierung vorgenommen. Die Kollektorflächen bestätigen jedoch diese Aufteilung: Anlagen zur Trinkwassererwärmung verfügen im Schnitt über 4,9 m², Anlagen für beide Betriebsmodi über durchschnittlich 10,1 m² Kollektorfläche.

Bemerkenswert ist, dass überwiegend Erdreich-Wärmepumpen als kombinierte Systeme ausgeführt sind. Lediglich zwei Anlagen entsprechen der Kombination aus Luft-Wärmepumpe und Solarthermieanlage.

Abb. 17: Verteilung des Merkmals Wärmepumpen mit zusätzlicher Solarthermieanlage

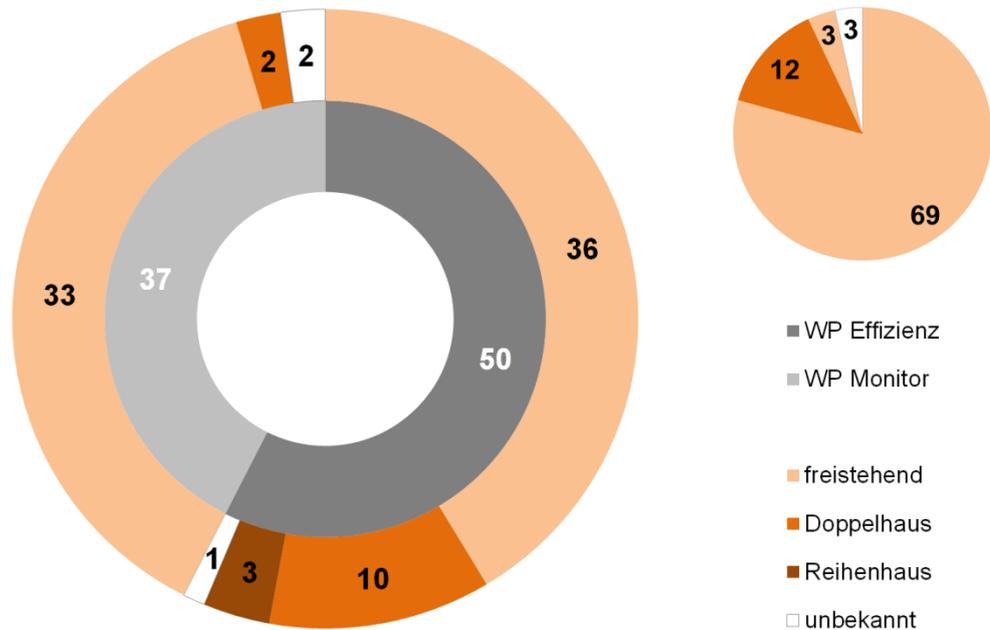


4.7 Gebäudetypen und Gebäudeflächen

Alle untersuchten Gebäude sind Einfamilienhäuser. Hinsichtlich der Gebäudetypen können diese zwischen freistehenden Gebäuden, Doppelhaushälften sowie Reihenhäusern unterschieden werden. Bei drei untersuchten Objekten fehlt diese Information.

Wie die Abb. 18 verdeutlicht, wurden die Wärmepumpen zum Großteil (82 %) in freistehenden Gebäuden untersucht. Die Doppelhaushälften kommen mit 12 Objekten auf einen Anteil von 14 %. Die drei Reihenhäuser machen den kleinsten Anteil aus. In der Aufteilung nach alten und neuen Anlagen fällt einzig der große Anteil an Doppelhaushälften bei den bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ untersuchten Wärmepumpen auf.

Abb. 18: Verteilung der Gebäudetypen



Die laut Angaben der Bewohner beheizten Wohnflächen (nicht Gebäudenutzflächen nach EnEV [EnEV 2009]) sind von 85 der 87 untersuchten Gebäude bekannt, wobei sich große Unterschiede zeigen. Während die geringste beheizte Fläche nur 100 m² beträgt, werden auch Wärmepumpen in Gebäuden mit bis zu 320 m² vermessen. Die durchschnittliche Fläche beträgt rund 188 m².

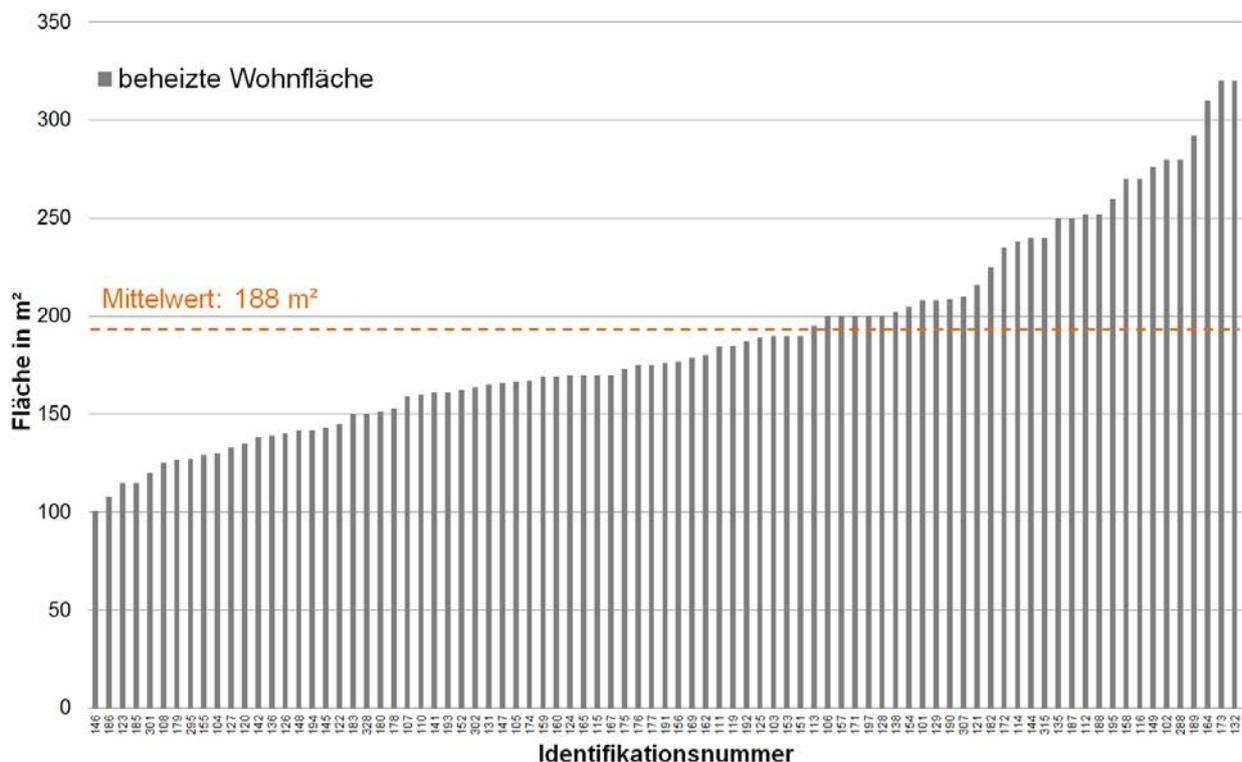


Abb. 19: beheizte Wohnflächen von 85 der 87 untersuchten Objekte

4.8 Energiebedarf für Heizung und Trinkwassererwärmung

Im Rahmen der Stammdatenerhebung gab es hinsichtlich der Auslegungswerte für Heizwärmebedarf bzw. Heizlast nur geringen Rücklauf. Daher wurden die Gebäude diesbezüglich anhand der im Projekt gemessenen Werte charakterisiert. Aufgrund der langsam anwachsenden Datenbasis (vgl. 4.1) wurden die Ergebnisse der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013 zugrunde gelegt. Zur Einschätzung des Einflusses der Wetterbedingungen dieses speziellen Heizjahres wurden die Gradtagzahlen im Betrachtungszeitraum den langjährigen Mittelwerten gegenübergestellt. Hierfür wurde ein Excel-basiertes Tool des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) herangezogen, welches die Wetterdaten unterschiedlicher Stationen des Deutschen Wetterdienstes nutzt um u.a. die Gradtagzahlen sowie die Heiztage pro Monat und im Jahr errechnet [DWD 2014]. Um die Wetterbedingungen möglichst vieler Wärmepumpenstandorte abzudecken, wurden Durchschnitte der Messwerte von den Stationen Hamburg, Berlin, Düsseldorf, Frankfurt und München gebildet. Die Einzelwerte dieser Stationen sind im Anhang 7 dokumentiert. Die identischen Wetterstationen dienen weiteren Auswertungen rund um die Wetterbedingungen in Kapitel 5.2.

Die Ergebnisse zur Einschätzung der Wetterbedingungen werden in der Abb. 20 dargestellt. Die grünen Säulen zeigen die Gradtagzahlen, die orangefarbenen die Heiztage. Durch verschiedene Helligkeitsstufen werden die beiden Betrachtungszeiträume (Messperiode 2012/13 und langjähriges Mittel) unterschieden. Beiden Größen, Gradtagzahl und Heiztage, liegen eine Heizgrenztemperatur von 15 °C (Tagesmittelwert) und eine Raumtemperatur von 20 °C zugrunde.

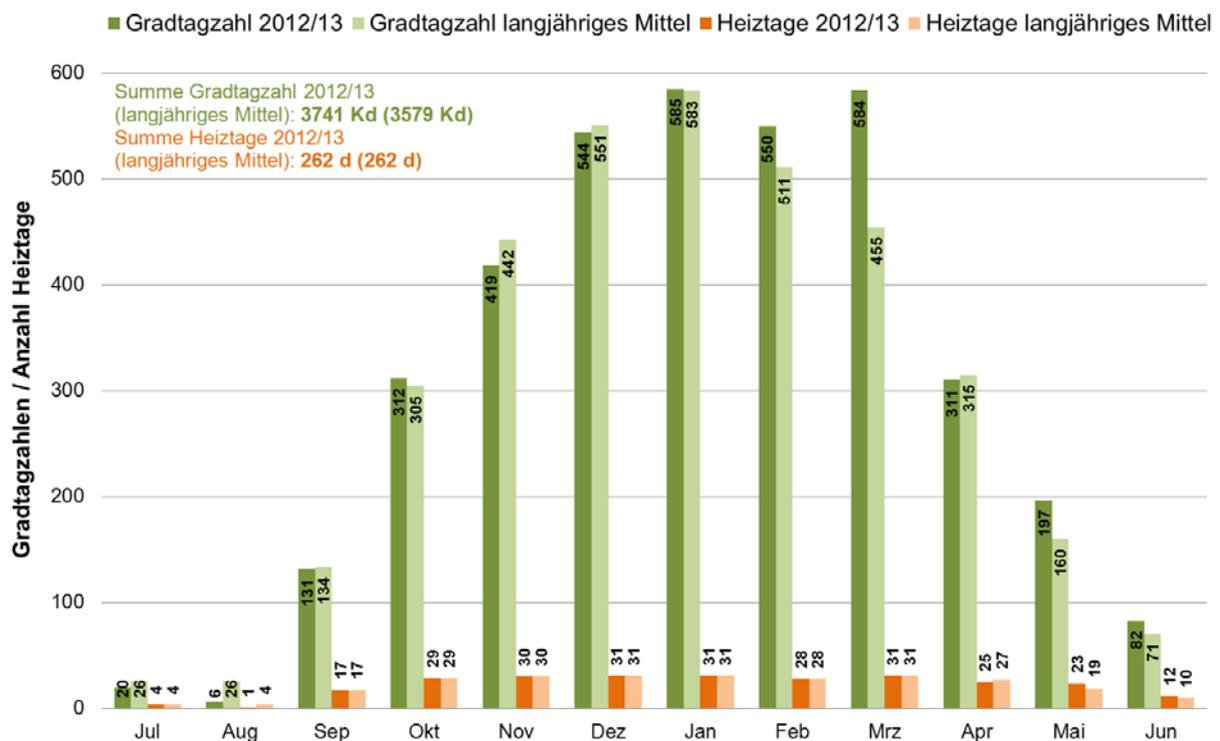


Abb. 20: Gradtagzahlen und Heiztage als Mittelwerte von fünf Standorten für den Zeitraum 2012/13 und als langjährige Mittelwerte [IWU]

Hinsichtlich der Heiztage zeigen sich im Auswertungszeitraum kaum Unterschiede zum langjährigen Mittel. In beiden Fällen gibt es jeweils 262 Heiztage pro Jahr, wobei auch die jährlichen Verteilungen kaum differieren. Unterschiede beim Heizwärmebedarf werden jedoch genauer mittels Gradtagzahlen wiedergegeben. Diese differieren vor allem in der zweiten Jahreshälfte, zwischen Januar und Juni, deutlich. Besonders bemerkenswert sind die Unterschiede im Monat März, aber auch der Februar und der Mai tragen entscheidend zu einer Gradtagzahl im Auswertungszeitraum von 3741 Kd. Damit liegt diese ca. 4,5 % oberhalb des langjährigen Mittelwertes. Die im Auswertungszeitraum gemessenen Heizwärmebedarfe liegen demnach oberhalb des langjährigen Mittels. Eine weitere Herausforderung bei der Charakterisierung der Untersuchungsobjekte hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs stellen Lücken in den Messdaten dar. Vor allem fehlende Messdaten an Heiztagen beeinflussen das Ergebnis negativ. Wie die Abb. 20 zeigt, liegen durchschnittlich 257 der 262 Heiztage in den Monaten September bis Juni.

Die Ergebnisdarstellung in der Abb. 21 ist in zwei Gruppen unterteilt. Auf der linken Seite werden die spezifischen Heizwärmeverbräuche jener Anlagen gezeigt, die zwischen September und Juni an 95 % der Tage (290 von 303) über Messdaten verfügen. Dies ist für 70 (von 68 ist die Gebäudefläche bekannt) der 87 untersuchten Anlagen der Fall, wobei für 43 Wärmepumpen der Datensatz in diesem Zeitraum vollständig ist. Im Mittel verfügen die 68 Anlagen für 99,4 % der Tage über Messdaten. Die Ergebnisse der übrigen 17 Anlagen sind im rechten Teil des Diagramms dargestellt. Vor allem für diese Anlagen ist das Wissen über die vorhandene Datenbasis von Interesse. Entsprechende Informationen geben die farbigen Säulen wieder. Die Gesamtlänge eines Balkens gibt an, für welchen Anteil des gesamten Jahres Messdaten vorliegen. Gleiches gilt für die einzelnen Monate des Jahres, die jeweils durch die Abschnitte des Balkens dargestellt werden. Hierbei wurden die Monatslängen normiert, d.h. jeder Monat mit vollständigem Datensatz wird gleich groß dargestellt. Zur schnelleren Identifizierung der für den Heizwärmebedarf wichtigeren Monate sind die zentralen Monate in Rottönen dargestellt.

Die Ergebnisse der Anlagen mit nahezu vollständigen Datensätzen in den Monaten September bis Juni streuen vor allem im oberen Bereich stark: während für 90 % der Anlagen Werte zwischen 29 und 127 kWh/(m²a) bei einem Mittel von 69 kWh/(m²a) ermittelt wurden, benötigen die übrigen Objekte bis zu 202 kWh pro Quadratmeter beheizter Wohnfläche und Jahr. Hinsichtlich diesen Ergebnissen gilt jedoch zu beachten, dass bei Anlagen mit Kombispeichern die vor dem Speicher gemessene thermische Energie in einigen Fällen stark vom tatsächlichen Heizwärmeverbrauch abweicht. Dies ist auf eine fehlerhafte Beladung des Speichers zurückzuführen, was eine Verschiebung der Heizungs- und Trinkwasseranteile nach sich zieht, worauf in Teilen in den Kapiteln 5.4.1.1 (Außenluft), 5.4.2.1 (Erdreich) und 5.4.3.1 (Grundwasser) eingegangen wird.

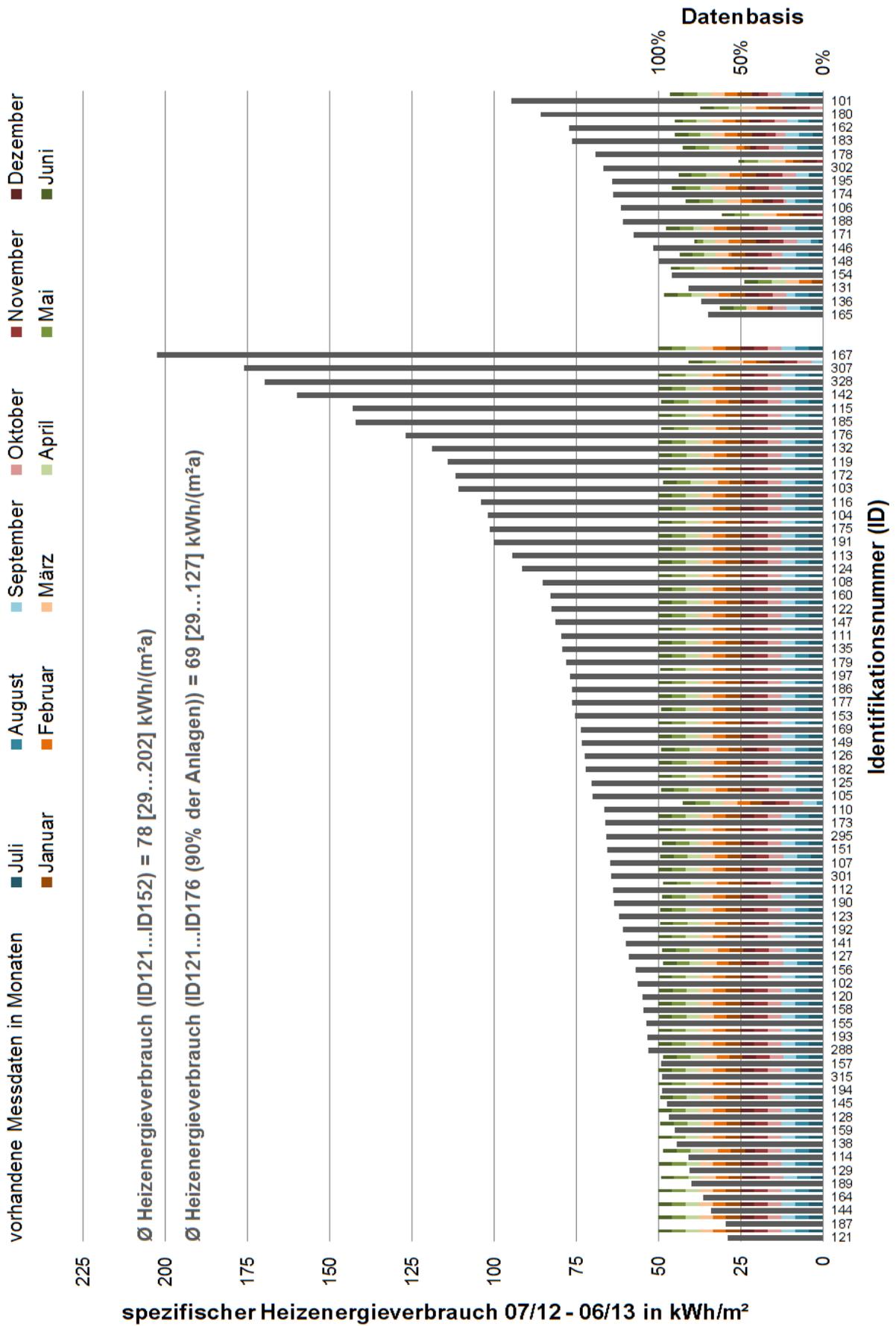


Abb. 21: Heizenergieverbrauch pro m² beheizter Wohnfläche im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 und zugrundeliegende Datenbasis

Um die Datenlücken zu schließen, wurde bei der Ermittlung der Trinkwasserwärmeverbräuche der tägliche Bedarf als konstant angenommen. Der aus den Messdaten ermittelte tägliche Durchschnittswert wurde für Tage mit Messdatenlücke angesetzt. Die Ergebnisse werden in der Abb. 22 dargestellt. Auf der linken Achse können die als hellblaue Säulen dargestellten absoluten Jahreswerte abgelesen werden. Diese liegen im betrachteten Jahr bei durchschnittlich 3069 kWh. Bei zwei Anlagen (**ID 149** und **ID 171**) muss die Wärmepumpe kein Trinkwasser erwärmen, da dies von der Solarthermieanlage abgedeckt wird (jeweils mit Kombispeicher: Wärmepumpe belädt zumindest nicht die obere Schicht zur Trinkwassererwärmung). Das Maximum wird mit 10466 kWh für die Wärmepumpenanlage **ID 166** ermittelt. Zur Bildung spezifischer Werte böte sich bspw. der Bezug auf die Anzahl der Bewohner an. Diese Information ist jedoch einerseits im Rahmen der Stammdatenerhebung nur unzureichend in Erfahrung gebracht worden und andererseits handelt es sich hierbei nicht um eine zeitlich konstante Größe. Daher wird, ähnlich wie bei der Ermittlung des Trinkwasserwärmebedarfs nach EnEV [EnEV 2009], der Bezug zur Gebäudefläche hergestellt. Im Unterschied zur EnEV handelt es sich jedoch um die beheizte Wohnfläche und nicht um die in der EnEV definierte Gebäudenutzfläche. Der diesbezüglich ansetzbare Energiebedarf, der zur Erwärmung des Trinkwassers zugeführt werden muss, beträgt 12,5 kWh/(m²a). Im Feldtest reichen die Werte von 0 kWh/(m²a), für die beiden Systeme mit Solaranlage, bis hin zu 53 kWh/(m²a) der Anlage **ID 136**, bei einem Mittelwert von 17 kWh/(m²a). Für die Anlagen **ID 140** und **ID 166** fehlt die Information zur Gebäudefläche. Auch bei diesen Ergebnissen sind die potentiellen Einflüsse einer Verschiebung der Heiz- und Trinkwasserwärmeanteile bei Anlagen mit Kombispeichern zu berücksichtigen.

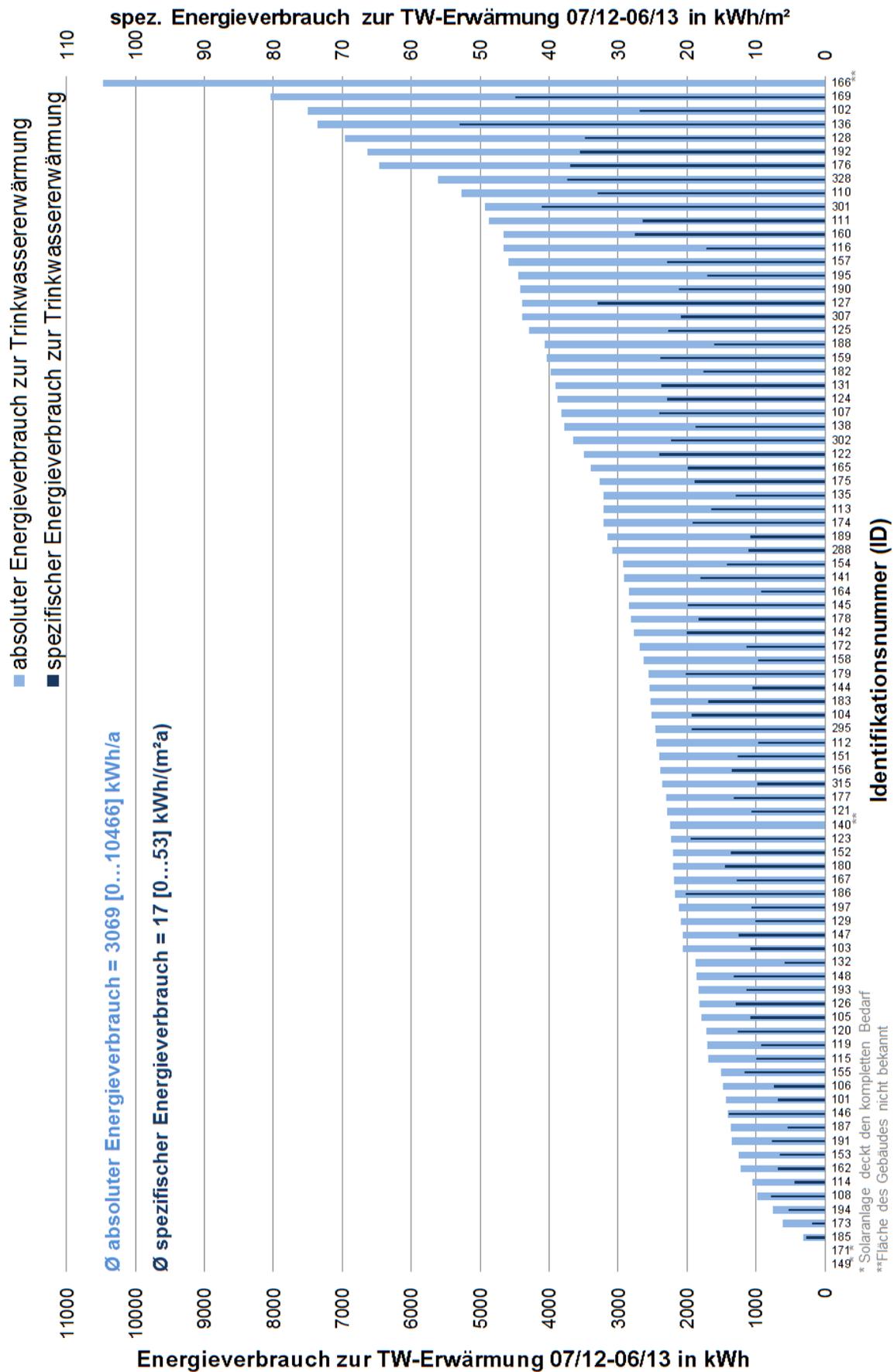


Abb. 22: Energiedarf zur Trinkwassererwärmung als absolute sowie spezifische Werte für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

5 Ergebnisse

Die notwendigen Grundlagen zur Einordnung der Ergebnisse liefern die Kapitel 5.1 und 5.2 mit den Definitionen unterschiedlicher Bilanzgrenzen zur Arbeitszahlermittlung sowie der Beschreibung der Wetterbedingungen im Auswertungszeitraum. Anschließend werden im Kapitel 5.3 die JAZ der Bilanzgrenze 2 (JAZ 2) hinsichtlich ihrer Verteilungen und Bandbreiten in den drei Auswertungsjahren mittels statistischer Methoden untersucht. Die Vorstellung der Hauptergebnisse mit den JAZ aller Wärmepumpen sowie den quantifizierbaren Effizienzeinflüssen erfolgt im Kapitel 5.4. Dieses Kapitel umfasst die Ergebnisse aus dem letzten Jahr der Auswertungsperiode (Juli 2012 bis Juni 2013), um für alle untersuchten Wärmepumpen Resultate für einen identischen Zeitraum darstellen zu können (vgl. Kapitel 4.1, kontinuierlich zunehmende Datenbasis). Das Hauptziel dieser Auswertung ist die vergleichende Darstellung der JAZ 2. Zur Untersuchung der Effizienzeinflüsse werden zudem Korrelationsanalysen zum Temperaturhub vorgenommen sowie die effizienz-mindernden Beiträge durch den Energieverbrauch von Steuerung, Wärmequellenantrieb sowie dem Heizstab quantifiziert. Die Kapitel 5.5 und 5.6 enthalten ebenfalls Ergebnisse für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013. Im erstgenannten werden die Betriebszeiten und Takthäufigkeiten, im letzteren die Systemarbeitszahlen von Wärmepumpen mit solarthermischer Unterstützung vorgestellt. Der Änderung von Wärmepumpeneffizienz im Jahresverlauf widmet sich das Kapitel 0. Mit Fokus auf den Heizstabbetrieb sowie dem Vergleich alter und neuer Anlagen werden für den Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2013 u.a. die Monats- sowie die Jahresarbeitszahlen vorgestellt.

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 sowie aufgewendeter elektrischer Energie beschrieben. Grundsätzlich sind sowohl für die Input- als auch für die Output-Energie verschiedene Bilanzgrenzen denkbar. Der Fokus kann bspw. auf die Effizienzwerte definierter Teilsysteme oder der Vergleichbarkeit mit anderen Technologien gelegt werden. Im Rahmen dieses Projektes werden drei Bilanzgrenzen für die Wärmepumpenanlage definiert, die nachfolgende anhand der Abb. 23 beschrieben werden.

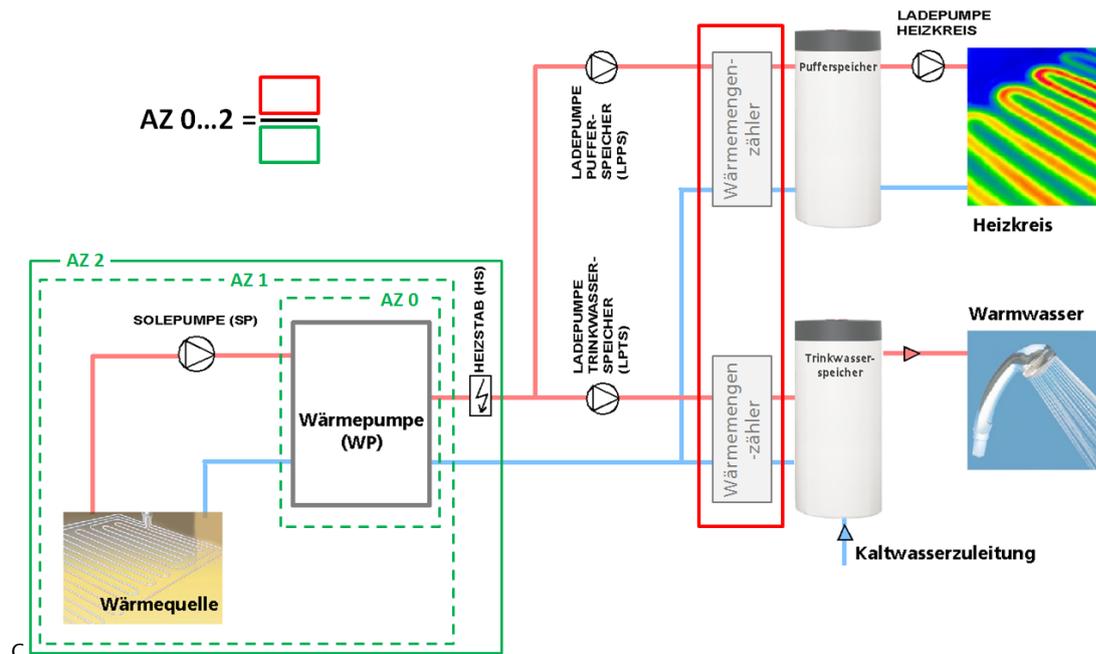


Abb. 23: Schematische Darstellung einer Wärmepumpenanlage mit den Bilanzgrenzen für die Ermittlung der Arbeitszahl

Die Erläuterung der Bilanzgrenzen erfolgt an einem Standard-Hydraulikschema einer Erdreich-Wärmepumpe mit Erdwärmekollektor. Der Output der Wärmepumpenanlage wird durch Wärmemengenzähler erfasst, die im Schema durch einen roten Rahmen gekennzeichnet sind. In der Regel wird die thermische Energie, getrennt für Trinkwassererwärmung und Raumheizung, unmittelbar nach der Wärmepumpe gemessen. Eine Ausnahme erforderten zum Teil Kompaktgeräte mit integriertem Trinkwasserspeicher. Aufgrund von Platzmangel konnte eine Installation des Wärmemengenzählers vor dem Speicher nicht realisiert werden. Ebenso wurde bei Anlagen mit Direktkondensation im Trinkwasserspeicher kein Wärmemengenzähler installiert. Um in diesen Fällen dennoch die Bilanzgrenzen (vor etwaiger Speicher) zu wahren, kamen zwei Möglichkeiten in Frage. Bei Anlagen mit zuverlässiger Vermessung der Wärmequelle (Erdreich oder Grundwasser) wurde während der Beladung des Trinkwasserspeichers durch die Wärmepumpe nach folgender Formel die dazugehörige bereitgestellte Energie berechnet:

$$Q_{TWW,WP} = Q_{WQ} + (W_{Verd} * 0,95) \quad (8)$$

$Q_{TWW,WP}$	Trinkwarmwasserenergie von der Wärmepumpe
Q_{WQ}	aus Wärmequelle entzogene Energie
W_{Verd}	Elektroenergieverbrauch durch Verdichter
0,95	angenommene 95 % Gesamtwirkungsgrad des Verdichters

Die bei Luft-Wärmepumpen aus der Wärmequelle entzogene Energie wurde aufgrund des unverhältnismäßig hohen Aufwandes nicht vermessen. In der Regel kann jedoch zumindest auf die Außenlufttemperaturen zurückgegriffen werden. Tritt bei diesen Anlagen der oben beschriebene Fall auf oder arbeiten die Wärmemengenzähler bei Erdreich- oder Grundwasserwärmepumpen nicht

zuverlässig, wird der bei Zapfung gemessenen thermischen Energie ein berechneter Wärmeverlust des Trinkwasserspeichers hinzuaddiert. Bei bekannter Speichergröße werden Verlustwerte² (ggf. interpoliert) gemäß [Jagnow et al. 2010] verwendet. Bei unbekannter Speichergröße wurde ein Jahresverlust von 645 kWh angenommen.³ Ferner kann bei Luft-Wärmepumpen die erzeugte thermische Energie infolge des Abtauprozesses wieder verringert werden. Dies geschieht bei der sogenannten Prozessumkehr, wobei im Abtaumodus der Kondensator als Verdampfer und der Verdampfer als Kondensator eingesetzt werden. Die hierfür aufgewendete thermische Energie steht nicht mehr zur eigentlichen Nutzung zur Verfügung und muss entsprechend abgezogen werden (Q_{Abtau}).

Wie die Grafik in Abb. 23 zeigt, variieren die Bilanzgrenzen der Wärmepumpenanlage mit unterschiedlicher Berücksichtigung elektrischer Verbraucher. Die Formeln 9 bis 11 geben diese Bilanzgrenzen wieder. Alle später ohne nähere Bezeichnung genannten Arbeitszahlen (AZ) beziehen auf die äußere Bilanzgrenze und entsprechen somit der in Abb. 23 dargestellten AZ 2. Diese Bilanzgrenze dient am ehesten dem Vergleich der Effizienz (und daraus resultierende Größen) mit anderen Technologien, wie bspw. Gas-Brennwertkesseln.

$$AZ0 = \frac{Q_{\text{Heiz,WP}} + Q_{\text{TWW,WP}}(-Q_{\text{Abtau}})}{W_{\text{Verd+St}}} \quad (9)$$

$$AZ1 = \frac{Q_{\text{Heiz,WP}} + Q_{\text{TWW,WP}}(-Q_{\text{Abtau}})}{W_{\text{Verd+St}} + W_{\text{SP/Vent/BP}}} \quad (10)$$

$$AZ2 = \frac{Q_{\text{Heiz,WP}} + Q_{\text{TWW,WP}} + Q_{\text{Heiz/TWW,HS}}(-Q_{\text{Abtau}})}{W_{\text{Verd+St}} + W_{\text{SP/Vent/BP}} + W_{\text{HS}}} \quad (11)$$

AZ	Arbeitszahl
$Q_{\text{Heiz,WP}}$	Heizenergie von der Wärmepumpe
$Q_{\text{TWW,WP}}$	Trinkwarmwasserenergie von der Wärmepumpe
$Q_{\text{Heiz/TWW,HS}}$	Heiz- und Trinkwarmwasserenergie vom Heizstab
Q_{Abtau}	Abtauenergie bei Prozessumkehr
$W_{\text{Verd+St}}$	Elektroenergieverbrauch durch Verdichter und Steuerung
$W_{\text{SP/Vent/BP}}$	Elektroenergieverbrauch durch Solepumpe oder Ventilator oder Brunnenpumpe
W_{HS}	Elektroenergieverbrauch durch Heizstab

Die Arbeitszahl 0 (AZ 0) berücksichtigt einzig den Verdichter und die Steuerung der Wärmepumpe. Sie dient vor allem dem Vergleich mit der Arbeits-

² Verlustleistungen in Abhängigkeit von der Speichergröße: 100l, 0,43W/l; 200l, 0,34W/l; 500l, 0,25W/l

³ üblicher Ansatz für 300l-Speicher bei Simulationen

zahl 1 (AZ 1), um den Einfluss des Antriebes in der Wärmequellenanlage einschätzen zu können. Wie bereits erwähnt, wird im Rahmen dieser Arbeit meist die Arbeitszahl 2 (AZ 2) bilanziert und kommentiert. Deren Differenz zur AZ 1 liegt in der Berücksichtigung der elektrischen Zusatzheizung. In der Regel muss hierfür einzig dessen elektrischer Energieverbrauch als Aufwand hinzuaddiert werden. Wird die durch den Heizstab bereitgestellte thermische Energie jedoch nicht über die Wärmemengenzähler erfasst (bspw. bei Heizstab im Speicher), wird diese äquivalent zum elektrischen Energieverbrauch des Heizstabs (Annahme: Wirkungsgrad 100 %) angesetzt. Bei AZ 2 bezieht sich der Elektroenergiebedarf im Nenner der Formel auf den Verdichter, die Steuerung, den Antrieb im Wärmequellenkreis (Solepumpe, Ventilator oder Brunnenpumpe) sowie auf die elektrische Zusatzheizung. 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 Elektroenergieverbrauch der Ladepumpe im Sekundärkreis stellvertretend für den anteiligen Druckverlust im Kondensator. Gleiches gilt laut Norm auch auf der Wärmequellenseite bei Sole- und Wasser-Wärmepumpen für den Druckverlust im Verdampfer. Die hier angesetzte AZ 2 berücksichtigt in der Wärmequelle den kompletten Energieverbrauch der Pumpen.

Wie erwähnt, umfasst die AZ 0 den Verdichter und die Steuerung. Die Bilanzgrenzen werden mit der zusätzlichen Berücksichtigung der Komponenten Primärkreis Antrieb (AZ 1) und Heizstab (AZ 2) erweitert. Der Heizstab wird bei allen Wärmepumpen separat vermessen, der Primärkreis Antrieb jedoch nicht immer. Einige Auswertungen im Kapitel 5.4 erfordern die Wahl der kleinstmöglichen Bilanzgrenze. Entsprechend der installierten Messtechnik wären dies entweder AZ 0 oder AZ 1. Um beide Bilanzgrenzen dennoch zu verkleinern, können diese in vielen Fällen exklusive des Energieverbrauches der Steuerung berechnet werden. Die Bezeichnung ändert sich dann durch die zusätzliche Endung „_oSt“ (ohne Steuerung).

Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge beim Kreisprozess von Kraftwärmemaschinen nimmt die Effizienz einer Wärmepumpe mit geringerem Temperaturhub zu. Inwiefern sich der Temperaturhub auf die Effizienz der untersuchten Wärmepumpen auswirkt, ist ebenfalls Teil dieser Studie. Der im Kapitel 5.4 herangezogene Temperaturhub entspricht gemäß Formel 12 der Differenz aus den Jahresmittelwerten von Wärmquellen- und Wärmesenktemperatur, die ebenfalls nachfolgend definiert sind.

$$T_{hub} = T_{ws} - T_{wq} \quad (12)$$

T_{ws} Energetisch gewichteter Mittelwert der Jahresmitteltemperaturen für Raumheizung und Trinkwassererwärmung, beide entsprechen dem Mittelwert aus energetisch gewichteten Jahreswerten der jeweiligen Vor- und Rücklauftemp.

T_{wq} Bei Erdreich-Wärmepumpen der Mittelwert aus den energetisch gewichteten Jahresmittelwerten der Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmequelle, bei Luft-Wärmepumpen

die während des Anlagenbetriebs geloggte mittlere Außenlufttemperatur

Die beschriebene Methodik zur Ermittlung des durchschnittlichen, jährlichen Temperaturhubs entspricht einer stark vereinfachten Herangehensweise. Zum einen müssen die Genauigkeiten der verwendeten Messtechnik im Hinblick auf die Absoluttemperaturen (vgl. Kapitel 3.3) berücksichtigt werden, zum anderen werden Jahresmittelwerte verwendet, d.h. ein breites Spektrum unterschiedlicher Betriebsbedingungen (bspw. unterschiedlicher Senktemperaturen für Trinkwassererwärmung und Raumheizung) wird in den Ergebnissen gemittelt.

5.2 Wetterbedingungen im Messzeitraum

Zur besseren Einordnung der nachfolgenden Ergebnisse werden mit den Diagrammen in Abb. 24 und Abb. 25 die Wetterbedingungen in der gesamten Auswertungsperiode erläutert. Hierbei beschränkt sich die Betrachtung auf die Außenlufttemperaturen, ermittelt an fünf in Deutschland verteilten Messstationen des Deutschen Wetterdienstes; Hamburg, Berlin, Düsseldorf, Frankfurt und München [DWD 2014]. Auf die solare Einstrahlung und die Windverhältnisse, die ebenso Einfluss auf den Heizwärmebedarf haben, wird nicht eingegangen. Eine Betrachtung von Gradtagzahlen und Heiztagen erfolgt gemeinsam mit der Einordnung des messtechnisch erfassten Heizwärmeverbrauchs separat im Kapitel 4.8.

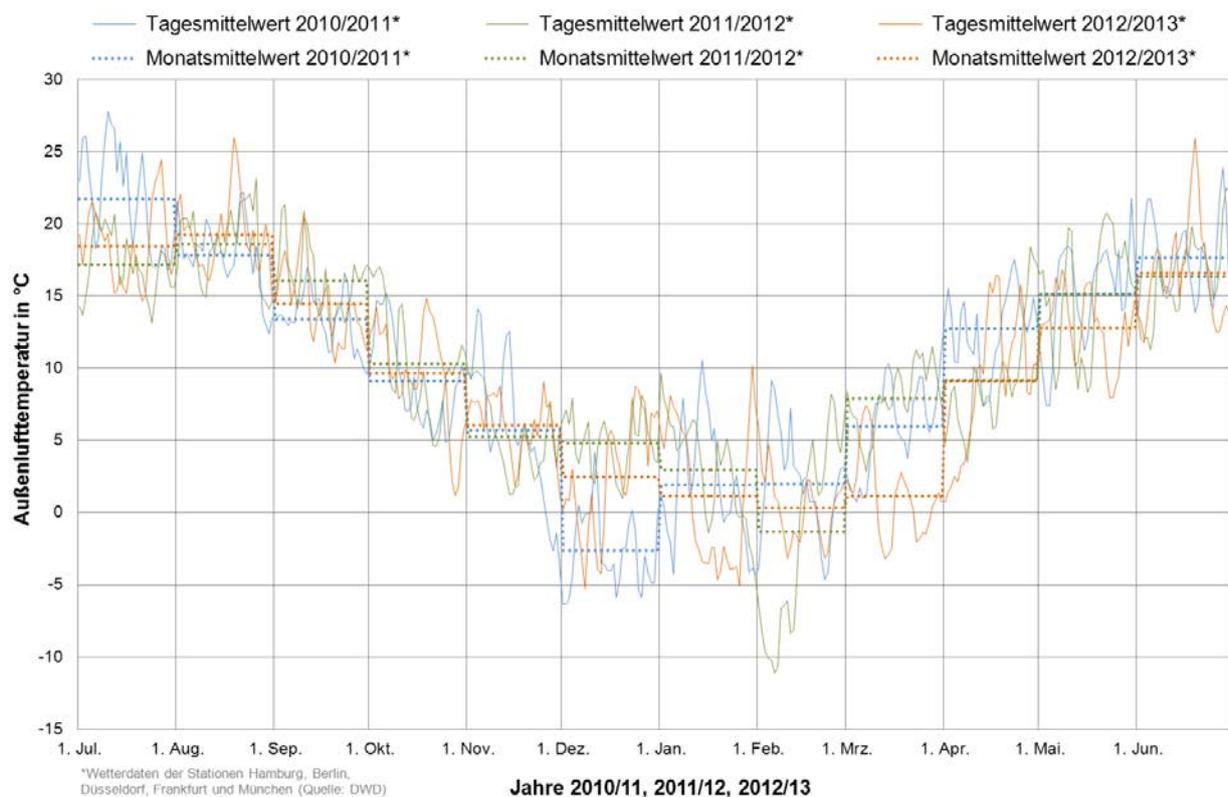
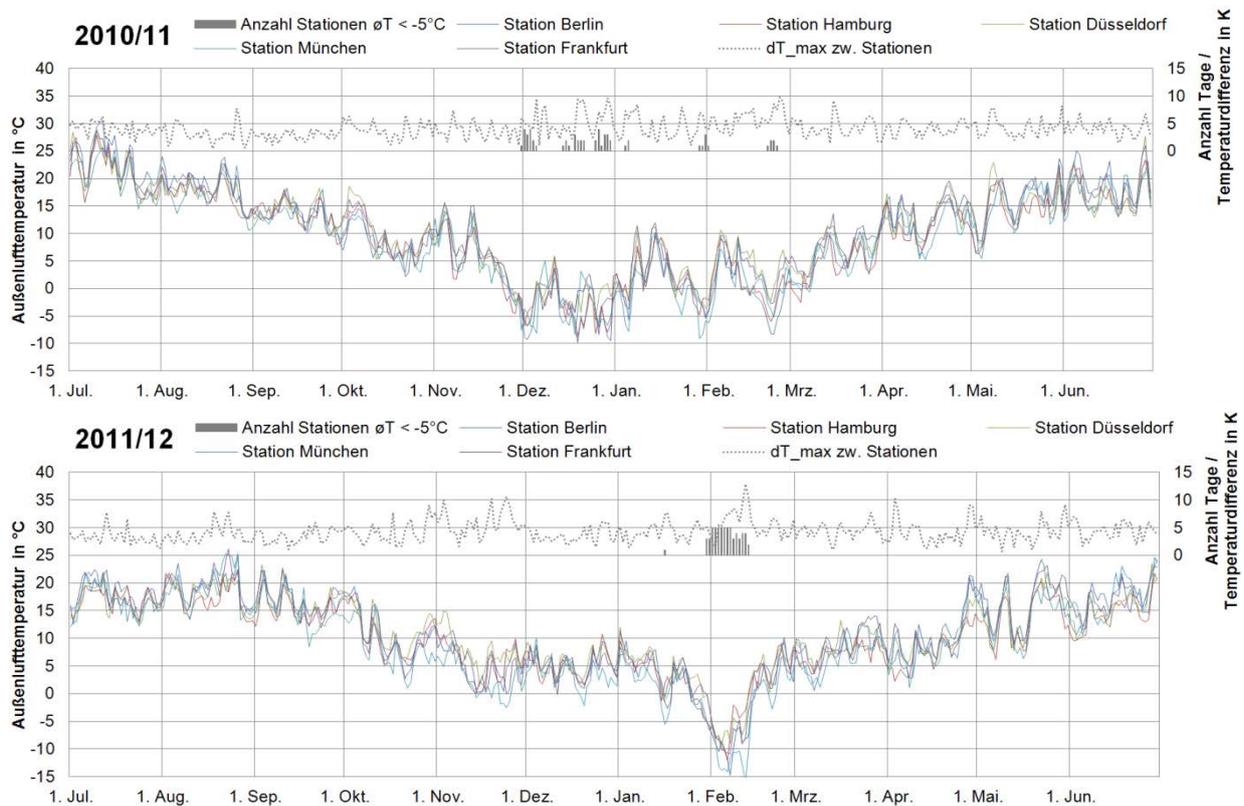


Abb. 24: Darstellung der Wetterbedingungen in Form von täglichen und monatlichen Außenlufttemperaturen (Mittelwerte der Wetterstationen Hamburg, Berlin, Düsseldorf, Frankfurt und München) in den Jahren 2010/11, 2011/12 und 2012/13

Die Abb. 24 veranschaulicht die täglichen und monatlichen Mittelwerte der Außenlufttemperatur (der fünf genannten Wetterstationen) in den drei Jah-

resabschnitten Juli bis Juni der gesamten Auswertungsperiode von Juli 2010 bis Juni 2013. Bezogen auf die Heizperiode zeigen sich zum Teil erhebliche Unterschiede bei den Monatsmittelwerten. Während sich die Monate Oktober, Dezember und Januar im Jahresvergleich recht ähnlich sind, zeigen sich erhebliche Unterschiede in den Monaten Dezember und März. Beim Vergleich der einzelnen Jahre fällt auf, dass im dritten Auswertungsjahr 2012/13 die Monatsmittelwerte auf konstantem Niveau lagen, während jene der ersten beiden Jahren relativ große Unterschiede aufweisen: Im ersten Jahr sticht mit unterdurchschnittlichen Temperaturen der Dezember, im zweiten Jahr der Februar hervor. Gleichzeitig lässt sich anhand dieser beiden Monate sehr gut aufzeigen, wie unterschiedlich die Verläufe der darin eingehenden Tagesmittelwerte sein können. Während der Dezember 2010 von einem relativ konstantem Temperaturniveau geprägt ist, zeigt sich für den Februar eine Zweiteilung. In den ersten beiden Wochen wurden die geringsten Temperaturen der gesamten Auswertungsperiode gemessen, während die übrigen zwei Wochen, verglichen mit den beiden anderen Jahren, die höchsten Werte zu verzeichnen haben.



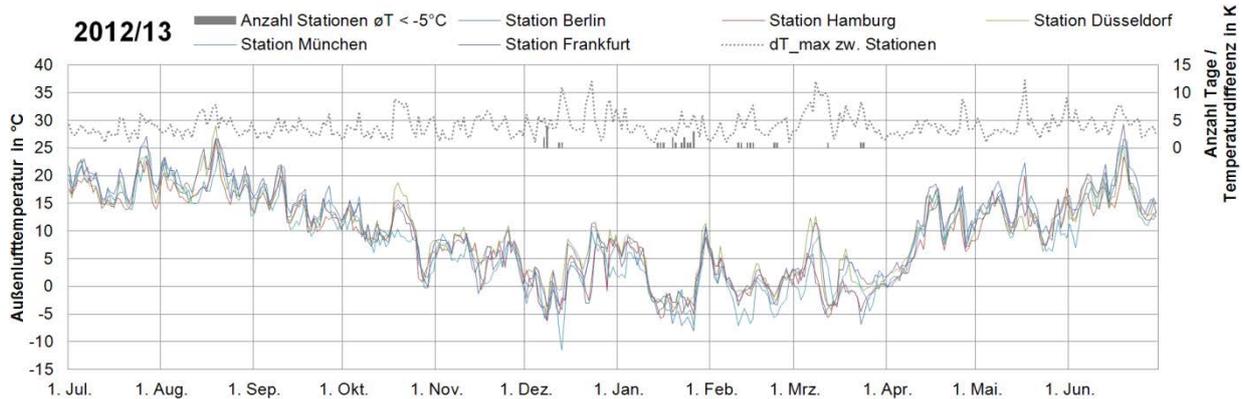


Abb. 25: Darstellung der Wetterbedingungen an fünf unterschiedlichen Standorten in Deutschland anhand der Tagesmittelwerte der Außenlufttemperaturen, der täglich maximalen Temperaturunterschiede zwischen den Stationen sowie der täglichen Anzahl der Stationen mit Tagesmittelwerten kleiner $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Die Diagramme der Abb. 25 sollen einerseits die Temperaturunterschiede innerhalb Deutschlands sowie andererseits das Ausmaß und die Dauer negativer Temperaturspitzen in den einzelnen Jahren der gesamten Auswerteperiode aufzeigen. Letzteres ist vor allem für die Beurteilung des Heizstabeinsatzes wichtig. Die grauen Säulen geben für jeden Tag die Anzahl der hier berücksichtigten fünf Stationen wieder, an denen eine Durchschnittstemperatur von kleiner $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen wurde. Diese Temperatur entspricht in vielen Fällen jenem Grenzwert, unterhalb dessen, beim Einsatz einer Luft-Wärmepumpe, zusätzlich ein Heizstab zur Deckung der verbleibenden Heizlast eingesetzt wird. Die farbigen Linien veranschaulichen die Temperaturverläufe, aufgezeichnet an den fünf genannten Wetterstationen. Die graue gestrichelte Linie zeigt die täglich im Vergleich aller Stationen maximal auftretenden Unterschiede in der Außenlufttemperatur.

Bezogen auf die einzelnen Jahre liegen die an den gewählten Stationen täglich ermittelten Temperaturunterschiede (zwischen Stationen mit höchster und niedrigster Temperatur) im Schnitt zwischen 4,1 und 4,3 K. Die Minima liegen zwischen 0,4 und 1,0 K, die Maxima zwischen 9,8 und 12,9 K. Ein Temperaturunterschied von über 7 K wird beispielsweise an mindestens 29 und maximal 33 Tagen gemessen. Diese Werte zeigen deutlich, dass landesweite Temperaturmittelwerte zur Einschätzung der Performance einer Wärmepumpenanlage an einem individuellen Standort nur bedingt in Frage kommen. Die Betrachtung extrem geringer Temperaturen führt für die drei Messjahre zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Im ersten Auswertungsjahr wurde an 29 Tagen an mindestens einem Standort eine Temperatur von unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Im zweiten Jahr war dies nur an 16 Tagen der Fall, im dritten Jahr an 24 Tagen. Neben der Anzahl der Tage differiert auch die Anzahl der Messstationen, an denen diese geringen Temperaturen auftreten. An den oben beschriebenen 29 Tagen im ersten Jahr wurde an durchschnittlich 2,0 Stationen eine Temperatur unterhalb von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. An den 16 Tagen im zweiten Jahr waren es durchschnittlich 3,9 Stationen, die eine Temperatur unterhalb von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ notierten. Im letzten Jahr waren es durchschnittlich 1,3 Stationen an 24 Tagen. Gemeinsam mit den Grafiken zeigen diese Werte, dass im zweiten Auswertungsjahr zeitlich konzentriert und geografisch weit verbreitet Temperaturen unterhalb von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftraten. Im ersten und vor allem im dritten Jahr traten solche Werte über die gesamte Heizperiode selten gleichzeitig im kompletten Bundesgebiet auf.

5.3 Mittelwerte und Verteilungen aller Jahresarbeitszahlen 2 - Juli 2010 bis Juni 2013

Im aktuellen Kapitel werden die im gesamten Projekt ermittelten JAZ mit der Bilanzgrenze 2 vorgestellt und unter verschiedenen Aspekten betrachtet. Hierbei stehen deren Mittelwerte ebenso im Fokus wie deren Bandbreiten und Verteilungen. Um den Einfluss der Randwerte festzustellen, werden die folgenden Mittelwerte und Bandbreiten parallel auch in zwei JAZ-Gruppen aufgeteilt dargestellt. Die erste Gruppe umfasst die Wertemenge (JAZ) zwischen dem 25 %- und dem 75 %-Quartil (die „mittleren 50 %“ der Werte) und die zweite Gruppe die außerhalb dieses Bereiches liegenden JAZ. Diese Aufteilung entspricht dem Prinzip einer Kastengraphik (engl. boxplot). Die Darstellung erfolgt jedoch abweichend über Punkte um auch die Streuung innerhalb der Gruppen zu zeigen.

Diese Betrachtung erfolgt anschließend nur für Luft- und Erdreich-Wärmepumpen. Auf die fünf ausgewerteten Wasser-Wärmepumpen wird aufgrund der geringen Anzahl nicht eingegangen.

5.3.1 Wärmequelle Außenluft

Für die Luft-Wärmepumpen sind alle ermittelten Jahresarbeitszahlen als blaue Punkte in einem eindimensionalen Streudiagramm in der Abb. 26 dargestellt. Die Werte sind nach den drei einjährigen Auswertungsperioden unterteilt, die sich aus dem Messzeitraum Juli 2010 bis Juni 2013 ergeben. Die Heizperiode liegt somit jeweils im Zentrum der einzelnen Perioden, die auf der linken Seite des Diagramms aufgetragen sind. In Klammern wird jeweils die Anzahl der auswertbaren Anlagen und somit der dargestellten Jahresarbeitszahl angegeben. Die blauen Striche geben den arithmetischen Mittelwert (folgend vereinfacht als „Mittelwert“ bezeichnet) der oben beschriebenen „mittleren 50 %“-Datengruppe (dunkelblaue Punkte). Der schwarze Strich kennzeichnet jeweils den Mittelwert aller Jahresarbeitszahlen.

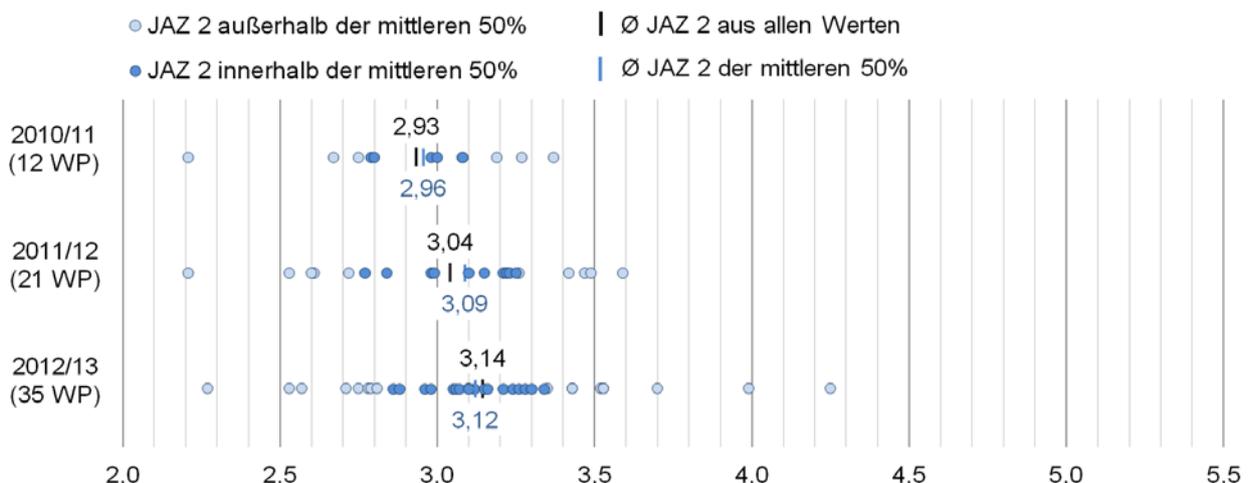


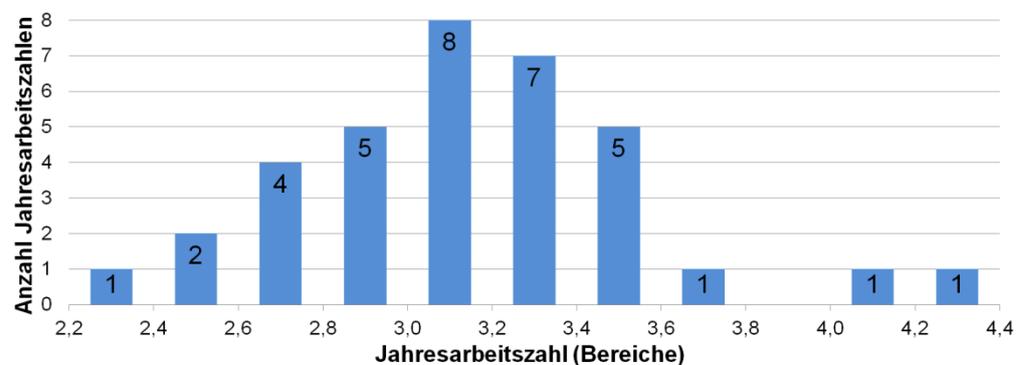
Abb. 26: Jahresarbeitszahlen inklusive Mittelwerte und Bandbreiten, bezogen auf alle JAZ bzw. auf die mittleren 50 % der JAZ, aller auswertbaren Luft-Wärmepumpen in drei Auswertungsperioden

In der ersten Auswertungsperiode reichen die Jahresarbeitszahlen der 12 Anlagen von 2,21 bis 3,37. Das dazugehörige Mittel liegt bei 2,93. Abgesehen

von der niedrigsten Jahresarbeitszahl (dem „negativen Ausreißer“), dessen Entfernung zum zweitniedrigsten Wert fast 0,5 beträgt, sind die Jahresarbeitszahlen relativ gleichmäßig verteilt. Dementsprechend ist der Mittelwert der mittleren 50 % (2,79 bis 3,10) der Jahresarbeitszahlen mit 2,96 etwas höher. In der Auswertungsperiode 2011/12 wird die Bandbreite nach oben durch mehrere Jahresarbeitszahlen auf 3,59 erweitert. Ebenso wie im Vorjahr sind hier die Jahresarbeitszahlen, abgesehen von der niedrigsten Jahresarbeitszahl (erneut 2,21), relativ gleichmäßig verteilt. Dies spiegelt sich auch in den beiden Mittelwerten von 3,04 (alle JAZ) sowie 3,09 (mittlere 50% der JAZ) wider. In der letzten Auswertungsperiode 2012/13 kam es nur am oberen Ende der Bandbreite zu einer nennenswerten Erweiterung durch zwei Anlagen, während die Jahresarbeitszahlen am unteren Ende nahezu unverändert blieben. Die gesamte Bandbreite reicht von 2,27 bis 4,25 und ist somit um 70 % größer als die der ersten Auswertungsperiode. Die beiden Mittelwerte sind mit 3,12 und 3,14 fast identisch.

Eine andere Darstellung der Ergebnisse für die letzte Auswertungsperiode ist das Histogramm in Abb. 27, welches die Häufigkeitsverteilung von Jahresarbeitszahlen darstellt. Bei der gewählten Klassenbreite von 0,2 treten Jahresarbeitszahlen zwischen 3,0 und 3,2 am häufigsten auf (acht Anlagen, 23 %), gefolgt von dem Bereich 3,2 – 3,4 mit sieben Anlagen und den beiden Bereichen von 2,8 – 3,0 und 3,4 – 3,6 mit jeweils fünf. Damit sind zwischen 2,8 und 3,6 bereits die Jahresarbeitszahlen von 25 (72 %) Anlagen vertreten. Die Werte außerhalb dieses Bereiches zeigen keine Symmetrie.

Abb. 27: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeiten einzelner JAZ von 35 Luft-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode 2012/13



Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich in jeder Auswertungsperiode die mittlere Jahresarbeitszahl um etwa 0,1 verbessert. Als Gründe kommen einerseits eine Vergrößerung der Datenbasis mit durchschnittlich besseren Anlagen, günstigere klimatische Bedingungen oder bessere Performance der bestehenden Wärmepumpen in Frage. Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Bandbreiten durch die Ausreißer nach oben zunehmend größer werden, diese Extremwerte jedoch keinen gravierenden Einfluss auf den Mittelwert haben. Im betrachteten Fall kann daher das Mittel der Jahresarbeitszahlen über alle Anlagen als repräsentativ betrachtet werden.

5.3.2 Wärmequelle Erdreich

In der gleichen Darstellungsweise wie für die Luft-Wärmepumpen werden in Abb. 28 die Jahresarbeitszahlen der Erdreich-Wärmepumpen (grüne Punkte) mit den beiden Bandbreiten und Mittelwerten dargestellt.

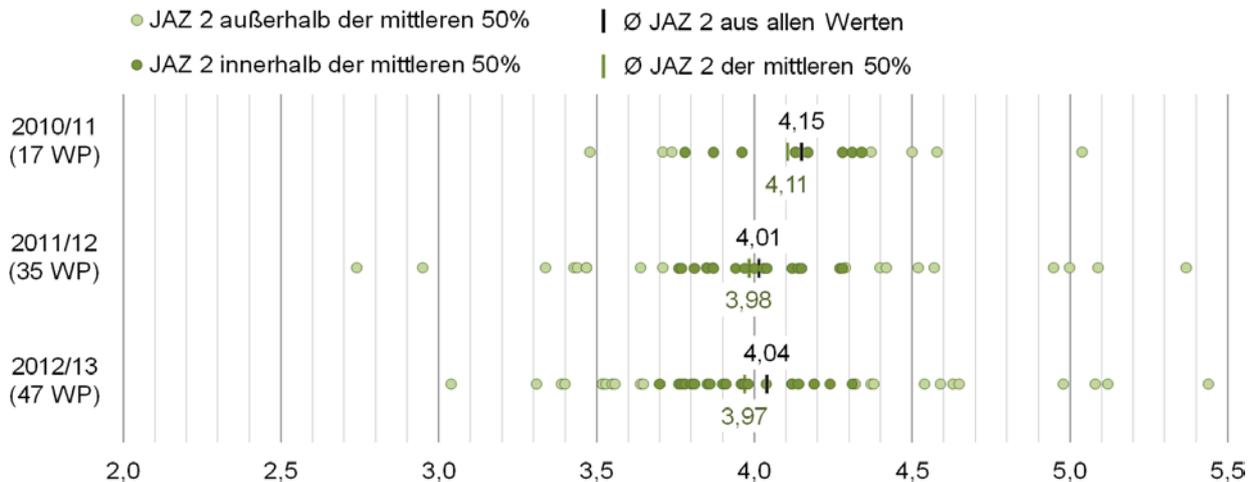
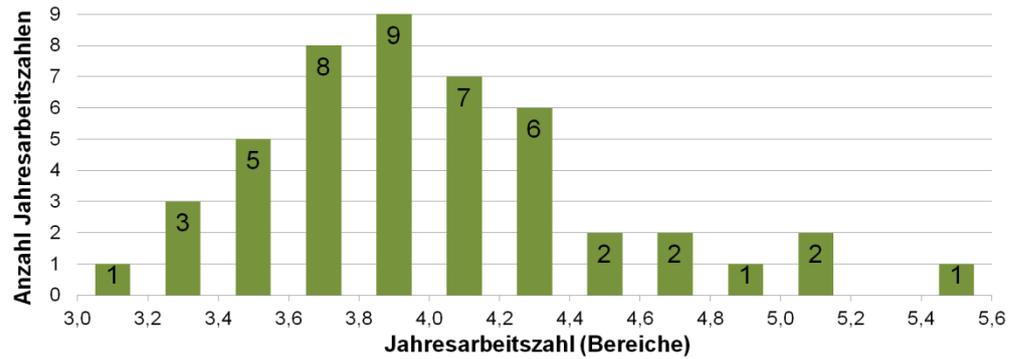


Abb. 28: JAZ inklusive arithmetische Mittelwerte und Bandbreiten, bezogen auf alle JAZ bzw. auf die mittleren 50 % der JAZ, aller auswertbaren Erdreich-Wärmepumpen in drei Auswertungsperioden

In der ersten Periode 2010/11 erreichen die 17 auswertbaren Anlagen im Mittel eine JAZ von 4,15, bei einem Minimalwert von 3,48 und einem Maximalwert von 5,04. Aufgrund des positiven Ausreißers liegt die mittlere Jahresarbeitszahl der zentralen 50 % der JAZ mit 4,11 leicht unter dem Gesamtdurchschnitt. In der zweiten Auswertungsperiode 2011/12 nimmt die Bandbreite der Jahresarbeitszahlen deutlich zu. Ein Mindestwert von 2,74 und ein Höchstwert von 5,37 sorgen für eine Zunahme von 70 %, was überwiegend auf den kleineren Extremwert zurückzuführen ist. Mit Vergrößerung der Datenbasis verringern sich beide Mittelwerte und liegen mit 3,98 und 4,01 auf gleichem Niveau. Ähnliche Mittelwerte ergeben sich für die Jahresarbeitszahlen der 46 Wärmepumpen in der Auswertungsperiode 2012/13. Die Bandbreite der Jahresarbeitszahlen ist leicht geringer als im zweiten Auswertungsjahr. Jahresarbeitszahlen unterhalb von 3,0 wurden nicht mehr ermittelt. Mit 5,44 wurde in der dritten Heizperiode die höchste Jahresarbeitszahl aller Anlagen im Projekt erzielt.

Zur deutlicheren Darstellung der JAZ-Verteilung im Jahr mit der größten Datenbasis zeigt die Abb. 29 das entsprechende Histogramm. Wie schon bei den Luft-Wärmepumpen zeigt sich eine relativ unsymmetrisch Verteilung. Die Klasse mit der größten Anzahl an Anlagen ist die von 3,8 bis 4,0 mit 9 Anlagen bzw. 19 %. In einem Bereich von 3,4 bis 4,4 liegen bereits 74 % der Werte. Dieser Bereich umfasst jedoch einerseits weniger als die Hälfte der gesamten Bandbreite und liegt zudem überwiegend in deren unteren Hälfte.

Abb. 29: Histogramm zur Darstellung der Häufigkeiten einzelner JAZ von 46 Erdreich-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode 2012/13



Ähnlich wie bei den Luft-Wärmepumpen führen Ausreißer zu einer sehr großen Bandbreite an Ergebnissen. Für das Auswertungsjahr 2012/13 gilt dies in beiden Fällen vor allem für positive Ausreißer. Die gesamte Verteilung führt wiederum dazu, dass der Mittelwert der mittleren 50 % kaum vom Gesamtmittelwert differiert. Somit ist die Angabe des Gesamtmittelwertes auch für die Erdreich-Wärmepumpen zulässig.

5.4 Effizienz und Einflussgrößen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

Als zentrale Ergebnisse des Projektes werden im aktuellen Kapitel die Effizienzwerte sowie die verantwortlichen Einflussgrößen untersucht. Die Ergebnisse beziehen sich auf den Auswertungszeitraum Juli 2012 bis Juni 2013. Die nur einjährige Auswertungsperiode ist auf die im Projektzeitraum langsam zunehmende Datenbasis zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.1). Längere Auswertungsperioden würden die Datenbasis erheblich schmälern. Die Auswertung erfolgt getrennt nach den Wärmequellen Luft, Erdreich und Grundwasser.

Jeweils zu Beginn werden die Jahresarbeitszahlen mit der Bilanzgrenze 2 (vgl. Kapitel 5.1) vorgestellt. Diese Auswertung wird begleitet von der Vorstellung nennenswerter Eigenschaften der Wärmepumpenanlagen (bspw. leistungsregelter Verdichter, Solarthermieanlage), der Kennzeichnung einer etwaigen Zugehörigkeit zum Vorgängerprojekt „WP-Effizienz“ sowie dem Aufzeigen der individuellen Betriebsbedingungen.

Im sich jeweils anschließenden Unterkapitel werden die Effizienzwerte dem Temperaturhub gegenübergestellt. Da sich der Zusammenhang zwischen Effizienz und Temperaturhub auf die thermodynamischen Vorgänge im Kältekreis bezieht, erfolgt diese Untersuchung mit Jahresarbeitszahlen, deren Bilanzgrenze, neben dem Verdichter, so wenige zusätzliche elektrische Verbraucher wie möglich umfasst. Im Optimalfall werden weder die Steuerung noch der Antrieb im Wärmquellenkreis oder der Heizstab berücksichtigt. Da es bei den Anlagen Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der vermessenen Komponenten gibt, werden Arbeitszahlen mit unterschiedlichen Bilanzgrenzen angesetzt.

Die weiteren Unterkapitel befassen sich mit dem Einfluss der zusätzlichen Elektroenergieverbraucher auf die Effizienz. Je nach dem, welche Komponenten messtechnisch untersucht werden, können dabei die Effizienzminderungen durch die Steuerung, durch den Antrieb auf der Wärmequellenseite (Ventilator oder Solepumpe) sowie durch den Heizstab berechnet werden. Bei diesen Untersuchungen ist darauf zu achten, dass jeweils der Anteil der elektrischen Arbeit an der Gesamtarbeit dargestellt wird und dieser sich auf die jeweils betrachtete Bilanzgrenze bezieht. Es müssen somit auch Beiträge der

übrigen Komponenten im Blick behalten werden. Bei extra erwähnten Anlagen mit extremen Ergebnissen sind diese Beiträge weiterer Komponenten geprüft und bei entsprechendem Einfluss benannt. Abgeschlossen wird die Betrachtung durch eine gemeinsame Darstellung der jeweils erzielten höchsten Arbeitszahl im jeweils letzten Unterkapitel. Wenn immer es möglich ist, (bei entsprechendem Messkonzept) wird die Arbeitszahl 0_oSt (Bilanzgrenze 0 ohne Steuerung) der Arbeitszahl 2 gegenübergestellt und jeweils die Einflüsse durch Steuerung, Wärmequellenantrieb und Heizstab dargestellt. Im Vergleich zu den vorangegangenen Unterkapiteln werden die Anteile der elektrischen Arbeit einzelner Komponenten jeweils auf die Verdichterarbeit bezogen.

Die Ergebnisse jeder Anlage sind mit einer individuellen ID-Nummer versehen. Dies ermöglicht einerseits die Verknüpfung unterschiedlicher Ergebnisse bzw. Eigenschaften einer Anlage, andererseits können die Projektpartner ihre eigenen Anlagen anhand dieser ID-Nummern identifizieren und die Ergebnisse dieser Anlagen vergleichend einordnen.

5.4.1 Wärmequelle Außenluft

5.4.1.1 Jahresarbeitszahl 2, Anlagencharakterisierung und Betriebsbedingungen

Jahresarbeitszahlen und Anlagencharakteristik: einzelne Anlagen

Die in der Abb. 30 dargestellten Säulen geben die Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenze 2 aller 35 Luft-Wärmepumpen der letzten Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013 wieder. Zur Identifikation sind die Säulen mit entsprechenden ID-Nummern versehen. Die Zahl im unteren Bereich eines Balkens entspricht der Anzahl der Monate, in denen die Anlage ausgewertet werden konnte. Hellgrüne Säulen kennzeichnen jene 13 Anlagen, die bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ (nachfolgend: alte Anlagen) messtechnisch untersucht wurden. Dunkelgrüne Säulen zeigen die Ergebnisse der erst im Rahmen von „WP Monitor“ (nachfolgend: neue Anlagen) installierten und messtechnisch untersuchten Wärmepumpen. Die farbigen Punkte stehen für ausgewählte Besonderheiten hinsichtlich zusätzlicher Wärmequellen, der Regelbarkeit des Verdichters, der Kompaktheit des Kältekreises (Splitgerät oder Monoblock) oder der Verwendung eines mit Sole gefüllten Zwischenkreises.

Im Mittel erzielen die 35 Luft-Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von 3,14. Auf die große Bandbreite der Ergebnisse von 2,24 bis 4,25 sowie der Verteilung der JAZ wird auch im Kapitel 5.3.1 eingegangen. Durch die farbliche Unterscheidung der Säulen lässt sich mit Abb. 30 feststellen, dass die darin beschriebene große Bandbreite auch auf die Mischung neuerer mit älteren Wärmepumpen zurückzuführen ist. Die Bestandsanlagen erreichen bei einem Mittelwert von 3,00 JAZ zwischen 2,27 und 3,53. Die neuen Wärmepumpen erzielen höhere Effizienzwerte: die durchschnittliche JAZ beträgt 3,23. Drei der 22 neuen Anlagen übertreffen nennenswert die höchste JAZ aus „WP-Effizienz“. Hierbei ist vor allem die JAZ-Differenz zur besten Anlage (4,25) von 0,72 hervorzuheben. Weniger deutlich heben sich die Effizienzwerte der neuen Wärmepumpen am unteren Ende ab. Mit 2,53 liegt diese JAZ nur um 0,26 oberhalb des niedrigsten Wertes aus „WP-Effizienz“. Bei dieser Wärmepumpe handelt es sich, ebenso wie den Anlagen mit den beiden höchsten JAZ, um ein Splitgerät. Diese beiden Wärmepumpen mit JAZ von 3,99 bzw. 4,25 verfügen zudem über einen leistungsgeregelten Verdichter. Die übrigen Splitgeräte erreichen JAZ zwischen 2,53 und 3,15. Bezüglich der zwei höchsten JAZ der alten Anlagen ist auffällig, dass beide Wärmepumpen über eine der erwähnten Besonderheiten verfügen. Die beste JAZ wurde bei einer WP-Anlage erzielt, die zusätzlich über einen Erdwärmekollektor verfügt, und deren Solekreis zur Einbindung der Außenluft genutzt wird. Die andere Anlage verfügt über einen leistungsgeregelten Verdichter. Generell lässt sich festhalten, dass aufgrund der Verteilung und der geringen Anzahl kein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen den Besonderheiten und den Effizienzwerten hergestellt werden kann.



Abb. 30: Jahresarbeitszahlen aller 35 Luft-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013, wobei Anlagen aus dem „WP-Effizienz“ Projekt unterschieden und charakteristische Eigenschaften aufgetragen werden.

Jahresarbeitszahlen und Betriebsbedingungen: Mittelwerte

Das Diagramm in Abb. 32 auf Seite 59 stellt eine Erweiterung des Diagrammes in Abb. 30 dar. Es enthält die identischen JAZ, sortiert, jedoch ohne nähere Charakterisierung der Anlagen. Die Erweiterung erfolgt durch Auftragen von Messergebnissen zur Beschreibung der Betriebsbedingungen. Um den Aufbau des Diagrammes zu verdeutlichen, werden in der Abb. 31 die einzelnen Größen als Mittelwerte aller jeweils auswertbaren Anlagen dargestellt. Die Temperaturen sind an der rechten vertikalen Achse abgetragen. In Form roter Punkte werden die mittleren Trinkwasserspeicherladetemperaturen dargestellt. Dabei handelt es sich um den Mittelwert der energetisch gewichteten⁴ Jahresmittelwerte von Vor- und Rücklauf. Im Durchschnitt werden die Trinkwarmwasserspeicher der hier auswertbaren 31 Luft-Wärmepumpen bei 46,9 °C und einer Spreizung von 5,2 K beladen. Die Darstellung roter Dreiecke kennzeichnet die mittlere Zapftemperatur von sechs Anlagen, die im Schnitt 46,7 °C beträgt. In den meisten Fällen wurde die Zapfung dann vermessen, wenn die Vermessung der Speicherbeladung (bspw. aufgrund von Direktkondensation) nicht möglich war. Die schwarzen Rauten geben die Temperaturen für die Beladung des Pufferspeicher bzw. – wenn nicht vorhanden – für die Beladung des Heizkreises wieder. Im Mittel betrug diese Temperatur 32,7 °C, bei einer Spreizung von durchschnittlich 5,6 K. Die grünen Vierecke zeigen den Wert der mittleren Außenlufttemperatur für die Zeiten an, in denen die Wärmepumpe in Betrieb war. Die dahingehend auswertbaren 24 Anlagen wurden im Schnitt bei einer Außenlufttemperatur von 3,2 °C betrieben. Dieser Wert wird nicht energetisch gewichtet, sondern entspricht der mittleren Außenlufttemperatur während die Wärmepumpe in Betrieb ist.

Neben den Temperaturen werden auch Anteile von bereitgestellten thermischen Energien als Säulen dargestellt. Die Anteile lassen sich an der linken vertikalen Achse ablesen, wobei der Wert 1,0 100 % und damit der gesamten bereitgestellten thermischen Energie entspricht. Die schwarz-grauen Säulen geben die Anteile der thermischen Energie für die Erwärmung von Trinkwasser (grau) und für die Raumheizung (schwarz) wieder. Es wurden 20 % der thermischen Energie zur Erwärmung des Trinkwassers eingesetzt. Mittels der mehrfarbigen Säule wird daneben die Energie zur Raumheizung auf drei gleichgroße Zeiträume eines Jahres verteilt. Demnach entfällt mit 62 % der größte Anteil auf den roten Bereich (Winter: November bis Februar), gefolgt vom gelben Bereich mit 32 % (Übergang: September, Oktober, März, April) sowie dem blauen Bereich (Sommer: Mai bis August) mit 6 %. Der Heizbetrieb im Sommer ist zum Großteil auf den vergleichsweise kühlen Mai 2013 zurückzuführen (vgl. Abb. 24 auf Seite 46). Die häufig beobachteten Phänomene, die zur Messung thermischer Energie im Sommer führen, können überwiegend ausgeschlossen werden, da hierfür eigens eine Nutzenergie definiert und entsprechend gefiltert wurde. Kontinuierlich laufende Pumpen oder die verbleibende Kondensatorenergie nach Trinkwarmwasserspeicherbeladung wird nicht berücksichtigt, wenn die Wärmepumpe nicht auch mindestens 10 Minuten am Tag tatsächlich im Heizbetrieb gearbeitet hat. Die mittlere Jahresarbeitszahl aller Luft-Wärmepumpen beträgt im Betrachtungszeitraum 3,14. An dieser Stelle sei noch daraufhin gewiesen, dass bei den ge-

⁴ Auf Minutenbasis werden Temperatur und Energie multipliziert. Die Produkte werden für den Betrachtungszeitraum addiert. Mittels Division durch die Energie im Betrachtungszeitraum wird die Temperatur berechnet.

nannten Mittelwerten die Ergebnisse aller auswertbaren Anlagen und somit auch von jenen mit Kombispeicher berücksichtigt wurden. Auf den möglichen Einfluss von Kombispeichern auf die einzelnen Anlagen wird nachfolgend anhand der Abb. 34 eingegangen.

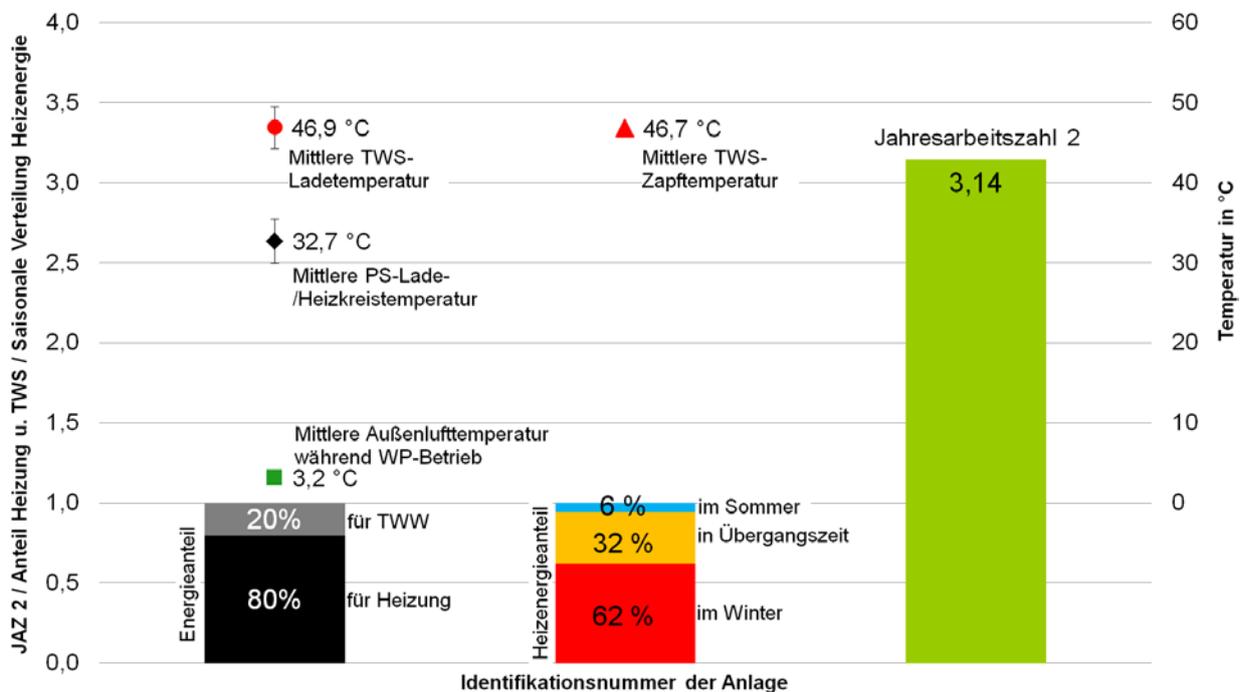


Abb. 31: Legende zur Abb. 32 sowie Mittelwerte der Jahresarbeitszahlen sowie der Betriebsbedingungen von Luft-Wärmepumpen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 (Bandbreiten entsprechen der Spreizungen)

Jahresarbeitszahlen und Betriebsbedingungen: einzelne Anlagen

In der Abb. 32 werden die jeweiligen Mittelwerte der Einzelanlagen gezeigt, die in die eben genannten Mittelwerte der einzelnen Größen eingehen. Anhand des Diagrammes soll im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Betriebsbedingungen eingegangen werden. Eine tiefergehende Untersuchung der Effizienzwerte erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln 5.4.1.2 bis 0. Dennoch lässt sich auf den ersten Blick feststellen, dass die jeweiligen Mittelwerte der Betriebsbedingungen stark variieren und entsprechend unterschiedliche Voraussetzungen für die Effizienz der Wärmepumpen bieten. So belädt bspw. die Wärmepumpe **ID 307** den Trinkwarmwasserspeicher im Durchschnitt mit der höchsten Temperatur von 53,2 °C, während bei der Anlage **ID 151** die im Mittel geringste Temperatur von 40,2 °C scheinbar ausreichend ist, um den Anforderungen der Nutzer zu genügen. Die Temperaturen des gezapften Trinkwarmwassers der dahingehend untersuchten sechs Anlagen nehmen Werte zwischen 42,2 °C (**ID 186**) und 49,9 °C (**ID 111**) an. Entsprechend des energetischen Anteils, hat die Raumheizung im Mittel einen höheren Einfluss auf die Jahresarbeitszahlen als die Trinkwassererwärmung. Auch bei der Raumheizung sind große Temperaturunterschiede zu verzeichnen: Die Werte bewegen sich zwischen sehr geringen 27,0 °C für die Anlage **ID 295** und 39,8 °C für die Wärmepumpe **ID 124**. Neben diesen Differenzen konnten auch große Unterschiede bei den mittleren Spreizungen zwischen Vor- und Rücklauf festgestellt werden. Die größte Spreizung im Heizbetrieb wurde, wie im Trinkwasserbetrieb, bei der Anlage **ID 307** festgestellt. Bei der mit Abstand höchsten Vorlauftemperatur von 61,5 °C beträgt die Spreizung 16,6 K. Demgegenüber wurde der Trinkwarmwasserspeicher bei der Anlage **ID 140** ledig-

lich mit einer Spreizung von 3,3 K beladen. Die entsprechenden Extremwerte bei der Beladung von Heizkreis bzw. Pufferspeicher wurden von den Anlagen **ID 167** mit 9,1 K (Pufferspeicher, parallel installiert) sowie **ID 301** mit 3,4 K (Pufferspeicher, in Reihe) erzielt. Die mittlere Wärmequellentemperatur wurde durch Filterung jener Außenlufttemperaturwerte (Temperatursensoren i.d.R. an der Nordseite der Gebäude positioniert) ermittelt, die während des Wärmepumpenbetriebs gemessen wurden. Die mittleren Außenlufttemperaturen schwanken zwischen 1,6 °C, ermittelt für den Standort der Anlage **ID 180** und 6,0 °C bei der Anlage **ID 179**.

Eine weitere Ergebnisdarstellung betrifft die Aufteilung der thermischen Energie nach dem Betriebszweck in Form der schwarz-grauen Säulen. Besonders auffällig sind hierbei vor allem zwei Anlagen. Bei der Anlage **ID 136** werden 58 % der thermischen Energie zur Erwärmung des Trinkwassers verwendet, bei der Wärmepumpe **ID 185** hingegen nur 2 %. Bei erstgenannter Anlage ist der hohe Anteil der Trinkwassererwärmung auf fehlerhaftes Management bei der Beladung des Kombispeichers zurückzuführen. Die zweite Anlage deckt einen Teil des Energiebedarfs zur Trinkwassererwärmung durch eine Solaranlage und ggf. auch zusätzlich durch ein Gasgerät. Aber auch ungeachtet dieser Extremwerte treten sehr unterschiedliche Verteilungen auf.

Die Verteilung der Heizenergie auf unterschiedliche Zeiträume des Jahres zeigt ebenfalls differenzierte Ergebnisse. Hinsichtlich der Anlagen mit Messdaten aus weniger als zwölf Monaten muss berücksichtigt werden, dass die Verteilung der Energie ungeachtet der auftretenden Lücken vorgenommen wurde. Lässt man diese Anlagen außer Acht, so treten die Extremwerte für Heizbetrieb im Sommer bei der Wärmepumpe **ID 169** (11 % Heizbetrieb im Sommer) und der **ID 146** (kein Heizbetrieb im Sommer) auf.

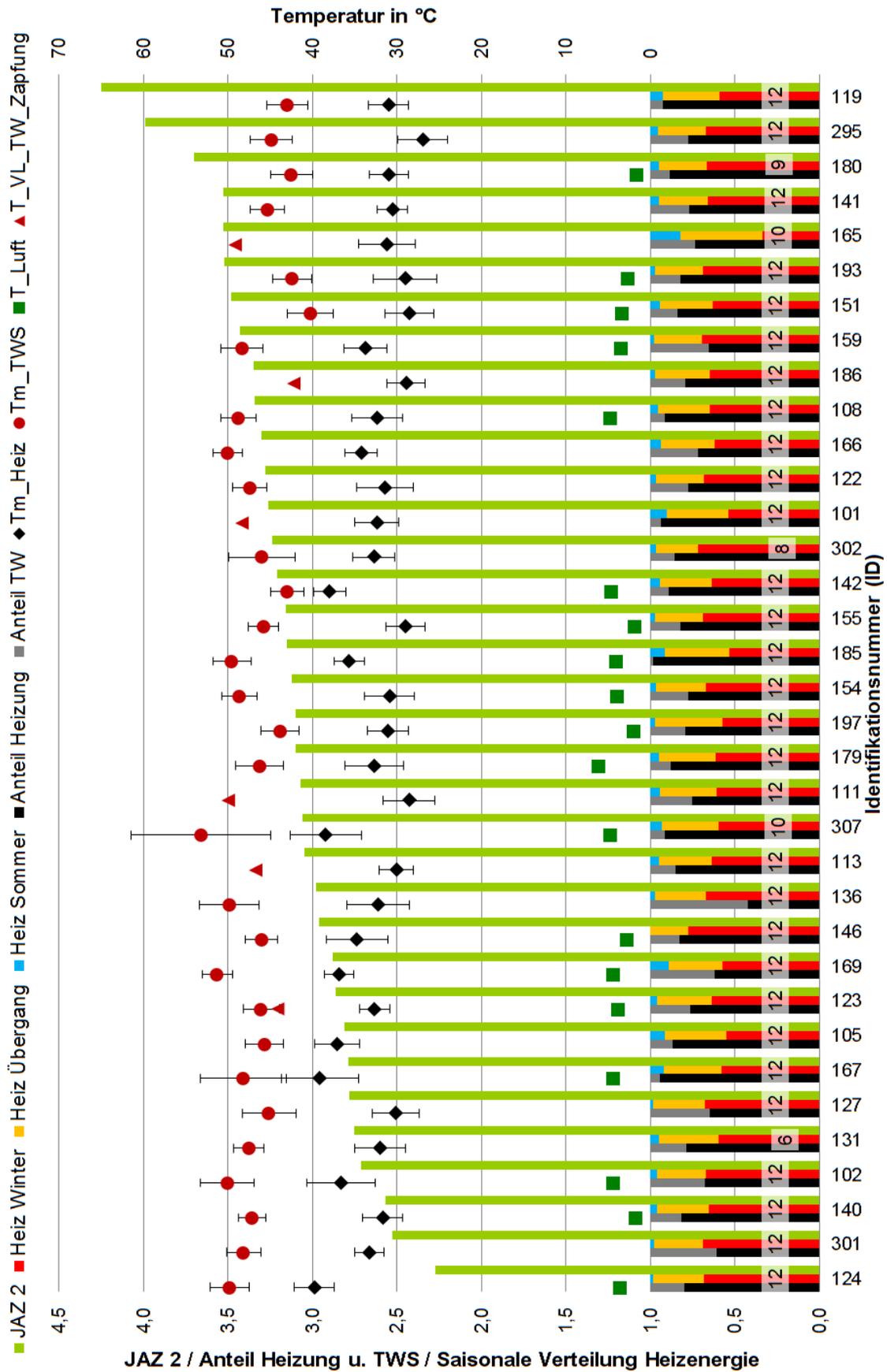


Abb. 32: Jahresarbeitszahlen aller 35 Luft-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013 und die entsprechenden Betriebsbedingungen.

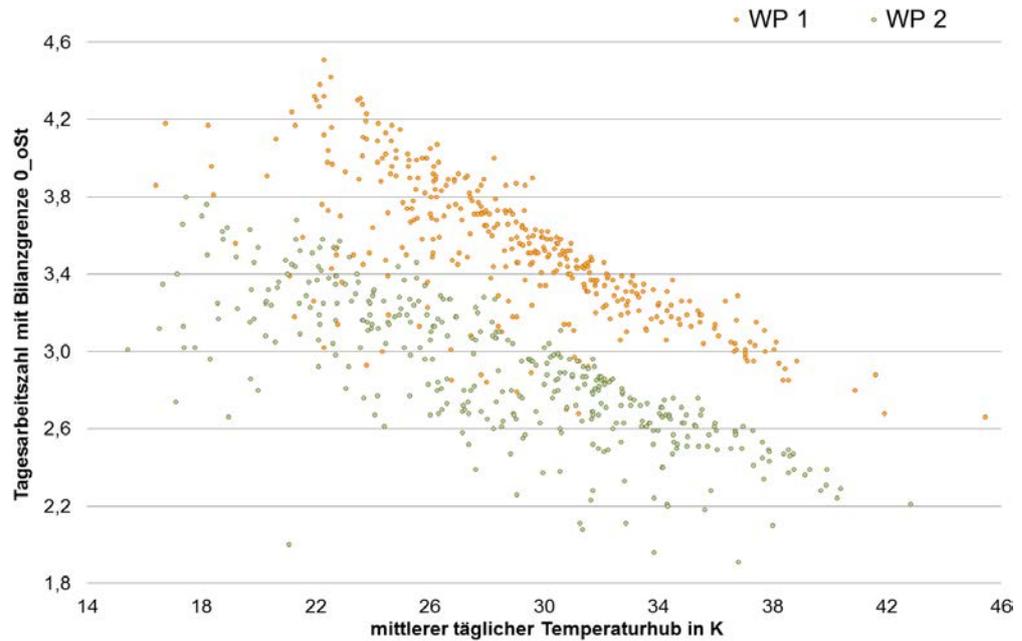
5.4.1.2 Effizienz und Temperaturhub

Entsprechend den Eigenschaften des thermodynamischen Kreisprozesses von Kraftwärmemaschinen ist die Effizienz einer Wärmepumpe zum Großteil von der Differenz zwischen den Temperaturen von Wärmequelle und Wärmesenke - dem Temperaturhub - sowie dem Temperaturniveau abhängig. Im aktuellen Kapitel soll herausgestellt werden, welche Temperaturhübe die Wärmepumpen im Jahresmittel überwinden mussten und welche Effizienz sie dabei erzielten. Da sich die geschilderten Zusammenhänge zwischen Effizienz und Temperaturhub auf die Vorgänge im Kältekreis beziehen und zusätzliche Einflüsse wie der Energieverbrauch von Steuerung (Kapitel 5.4.1.3), Ventilator (Kapitel 5.4.1.4) oder Heizstab (Kapitel 0) ausgeschlossen werden sollen, wird als Effizienzwert eine Jahresarbeitszahl mit möglichst kleiner Bilanzgrenze herangezogen. Im Optimalfall - wenn alle Komponenten separat messtechnisch erfasst wurden - kann die AZ 0 nach Abzug des Energieverbrauches für die Steuerung angesetzt werden (kurz AZ 0_oSt).

Da der Fokus dieser Auswertung auf mittlere Jahreswerte gerichtet ist, sollen einleitend die Zusammenhänge zwischen Effizienz und Temperaturhub für unterschiedliche Betriebspunkte innerhalb eines kompletten Jahres (Juli 2012 bis Juni 2013) dargestellt werden. Hierfür zeigt die Abb. 33 beispielhaft für zwei Luft-Wärmepumpen die ermittelten Tagesarbeitszahlen, aufgetragen über den mittleren täglichen Temperaturhub. Die Effizienzwerte wurden entsprechend AZ 0_oSt berechnet und umfassen sowohl die Raumheizung als auch die Trinkwassererwärmung. Die Temperaturen entsprechen den energetisch gewichteten Mittelwerten aus dem Durchschnitt der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Heiz- bzw. Trinkwasserkreis.

Die Wärmepumpe 1 erzielt bei Temperaturhüben zwischen 15 und 43 K Tagesarbeitszahlen (TAZ) von 2,7 bis 4,5. Bei der Wärmepumpe 2 liegen die Effizienzwerte im Mittel auf geringerem Niveau. Bei Temperaturhüben zwischen 16 und 45 K liegen diese an den einzelnen Tagen zwischen 1,9 und 3,8. Deutlich zeigt sich für beide Wärmepumpen der angesprochene Zusammenhang zwischen höherer Effizienz bei geringerem Temperaturhub. Gleichzeitig ist jedoch auch eine relativ große Bandbreite an TAZ sichtbar. Dies ist vor allem auf die bei Luft-Wärmepumpen mit Niedertemperaturheizsystemen mögliche, große Variabilität der Betriebspunkte zurückzuführen. Bei hohen Wärmequellentemperaturen in den Sommermonaten ergeben sich bei der Trinkwassererwärmung ähnliche Temperaturhübe wie in der Übergangszeit für die Raumheizung. Da sich der Temperaturhub im Sommer auf wesentlich höherem Niveau, und damit weit vom Auslegungspunkt entfernt befindet, werden jedoch geringere TAZ erreicht. Bemerkenswert für beide Wärmepumpen sind die sich letztlich relativ klar abzeichnenden Oberkanten für die TAZ, während sich im unteren Bereich ein äußerst diffuses Bild abzeichnet.

Abb. 33: Tagesarbeitszahlen mit Bilanzgrenze 0_oSt über mittleren täglichen Temperaturhub zweier Luft-Wärmepumpen



Wie bereits erwähnt, erfolgt die Gegenüberstellung von Temperaturhub und Effizienz für alle dahingehend auswertbaren Anlagen auf Basis von Jahreswerten. Aufgrund von fehlenden Außenlufttemperatursensoren sowie adäquaten Temperatursensoren auf der Senkenseite (fehlende Wärmemengenzähler bei Kombigeräten bzw. Direktkondensation) konnte diese Auswertung nur für 19 von 35 Luft-Wärmepumpen durchgeführt werden. In der Abb. 34 sind die Ergebnisse, aufsteigend nach dem Temperaturhub (blaue Raute) sortiert, dargestellt. Die grünen Säulen zeigen die tatsächlich erzielten Effizienzwerte. Die mit jeweils dunklerem grün dargestellten Ergebnisse beruhen auf der für diese Anlagen ermittelbaren Jahresarbeitszahl 0 ohne Berücksichtigung der Steuerung (JAZ 0_oSt). Da für alle Luft-Wärmepumpen der Energieverbrauch der Steuerung, jedoch nicht immer jener der Ventilatoren, separat ermittelt wurde, wird als nächst höhere Bilanzgrenze die Bilanzgrenze 1 ohne Steuerung angesetzt (JAZ 1_oSt). Die Ergebnisse sind jeweils im helleren grün dargestellt. Der Temperaturhub wird aus der Differenz der Jahreswerte von Wärmequellen- und Wärmesenkentemperatur errechnet. Die Temperatur der Wärmequelle entspricht der mittleren Außenlufttemperatur, gefiltert über die Betriebszeit der Wärmepumpe. Die Temperatur der Wärmesenke entspricht dem Mittelwert der energetisch gewichteten Jahresmittelwerte von Vor- und Rücklauftemperatur von Heiz-/Pufferspeicher- sowie Trinkwasserspeicherladekreis.

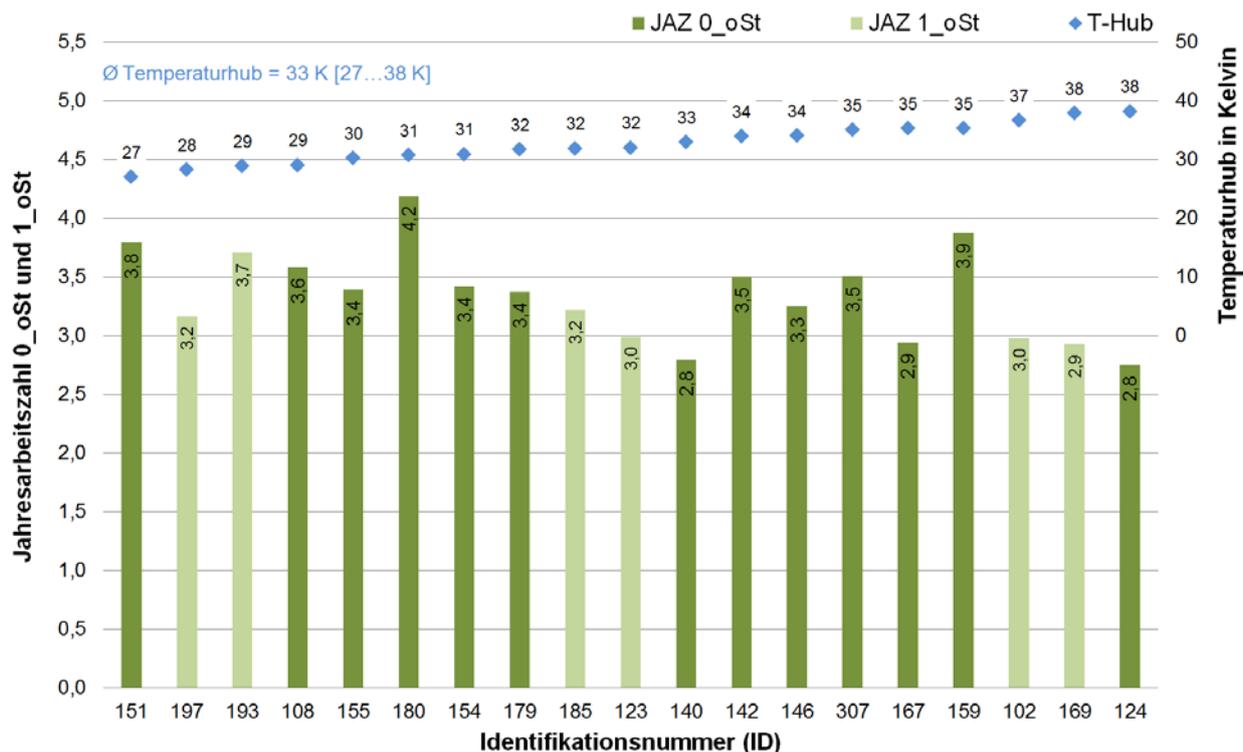
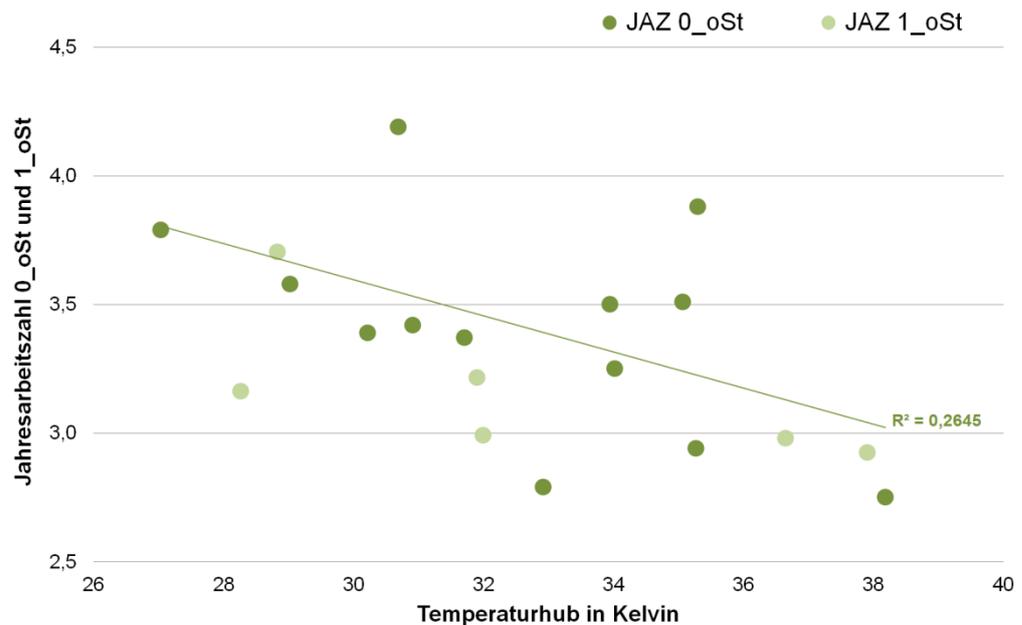


Abb. 34: Für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 werden für 19 Luft-Wärmepumpen die mittleren Temperaturhübe sowie die Jahresarbeitszahlen 0_oSt und 1_oSt dargestellt

Im Mittel überwinden die Luft-Wärmepumpen im Jahresdurchschnitt einen Temperaturhub von 33 K, wobei die Bandbreite von 27 K (**ID 151**) bis 38 K (**ID 124** und **ID 169**) reicht. Wie die Ausführungen zur Abb. 32 auf Seite 59 zeigen, liegen die Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen mehr auf Seiten der Wärmesenke als auf Seiten der Wärmequelle. Wie die Effizienz einer Anlage vom Temperaturhub abhängt, wurde beispielhaft anhand der Abb. 33 dargestellt. Um zu prüfen, ob sich auch im Vergleich entsprechender Jahreswerte von unterschiedlichen Anlagen Korrelationen ergeben, stellt die Abb. 35 die Jahresarbeitszahlen direkt über die Temperaturhüben dar. Hinsichtlich der Anlagen, die nur über Werte für die JAZ 1_oSt verfügen, ist zu berücksichtigen, dass deren Werte für JAZ 0_oSt entsprechend größer sein würden (vgl. Auswertung zur Ventilatorenergie in Kapitel 5.4.1.4). Auch unter Berücksichtigung dieser Verzerrung der Ergebnisse lässt sich nur eine geringe Korrelation zwischen Effizienz und Temperaturhub erkennen. Die auf JAZ 0_oSt bezogene Trendlinie fällt zwar mit zunehmendem Temperaturhub leicht ab, die Einzelwerte um diese Linie streuen jedoch stark (sehr geringes Bestimmtheitsmaß von 0,2645). Unter der Annahme einer Korrektur der Werte für JAZ 1_oSt würde sich vielmehr ein Band an Effizienzwerten ergeben, das sich symmetrisch um einen Wert von 3,5 über fast den kompletten Temperaturhubbereich erstreckt.

Abb. 35: Darstellung der Jahresarbeitszahlen über den mittlerem Temperaturhub



Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich ein Zusammenhang zwischen Temperaturhub und Effizienzwerte nur leicht abbilden lässt, werden die Jahreswerte verschiedener Anlagen miteinander verglichen. Hierbei werden die Unterschiede zwischen den Anlagen deutlich. Jede Anlage verfügt über eine individuelle Leistungsfähigkeit, die mittels ihrer Leistungszahl (COP) ausgedrückt wird. Diese unterscheiden sich bei den untersuchten Anlagen, was u.a. dadurch begünstigt wird, dass Wärmepumpen unterschiedlicher Baujahre untersucht wurden (vgl. Kapitel 4.2 und 5.7.2). Aber auch wenn alle Wärmepumpen identische Teststandergebnisse aufweisen würden, müsste sich nicht zwangsläufig eine klare Korrelation der Ergebnisse ergeben. Dies liegt am stark variierenden Betriebsverhalten der Anlagen (vgl. u.a. Anschalthäufigkeit Kapitel 5.5) und somit bspw. an der unterschiedlichen Häufigkeit quasistationären Betriebs wie auf dem Teststand.

5.4.1.3 Einfluss der Steuerung

Um den Effizienzeinfluss des Energieverbrauches der Steuerung zu quantifizieren, werden Arbeitszahlen mit zwei Bilanzgrenzen herangezogen. Die Ergebnisse sind in der Abb. 36 dargestellt. Für 27 Anlagen, deren Ventilatoren separat vermessen werden, kann der Einfluss der Steuerung auf die Jahresarbeitszahl 0 (orangene Säulen) ermittelt werden. Für die übrigen acht Anlagen wird der Einfluss auf die JAZ 1 (grüne Säulen) berechnet. Der Anteil des Elektroenergieverbrauches der Steuerung an der Summe des Verbrauchs von Steuerung, Verdichter und (bei Ermittlung über JAZ 1) der Ventilatoren wird jeweils in Form grauer Säulen dargestellt. Obwohl die Messergebnisse aller 35 Luft-Wärmepumpen dargestellt sind, können nicht alle in der Mittelwertbildung berücksichtigt werden. Die Energieverbräuche der Anlagen **ID 166** und **ID 193** umfassen neben der Steuerung auch die der Zirkulationspumpe, da diese nicht separat erfasst wurde. Die gemessenen Energieverbräuche der Steuerung von den Anlagen **ID 124** und der **ID 159** sind sowohl in der Höhe als auch im Jahresverlauf unplausibel. Vermutlich werden mit der Steuerung weitere Verbraucher erfasst. Die Ergebnisse der genannten Anlagen werden dargestellt, jedoch in der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

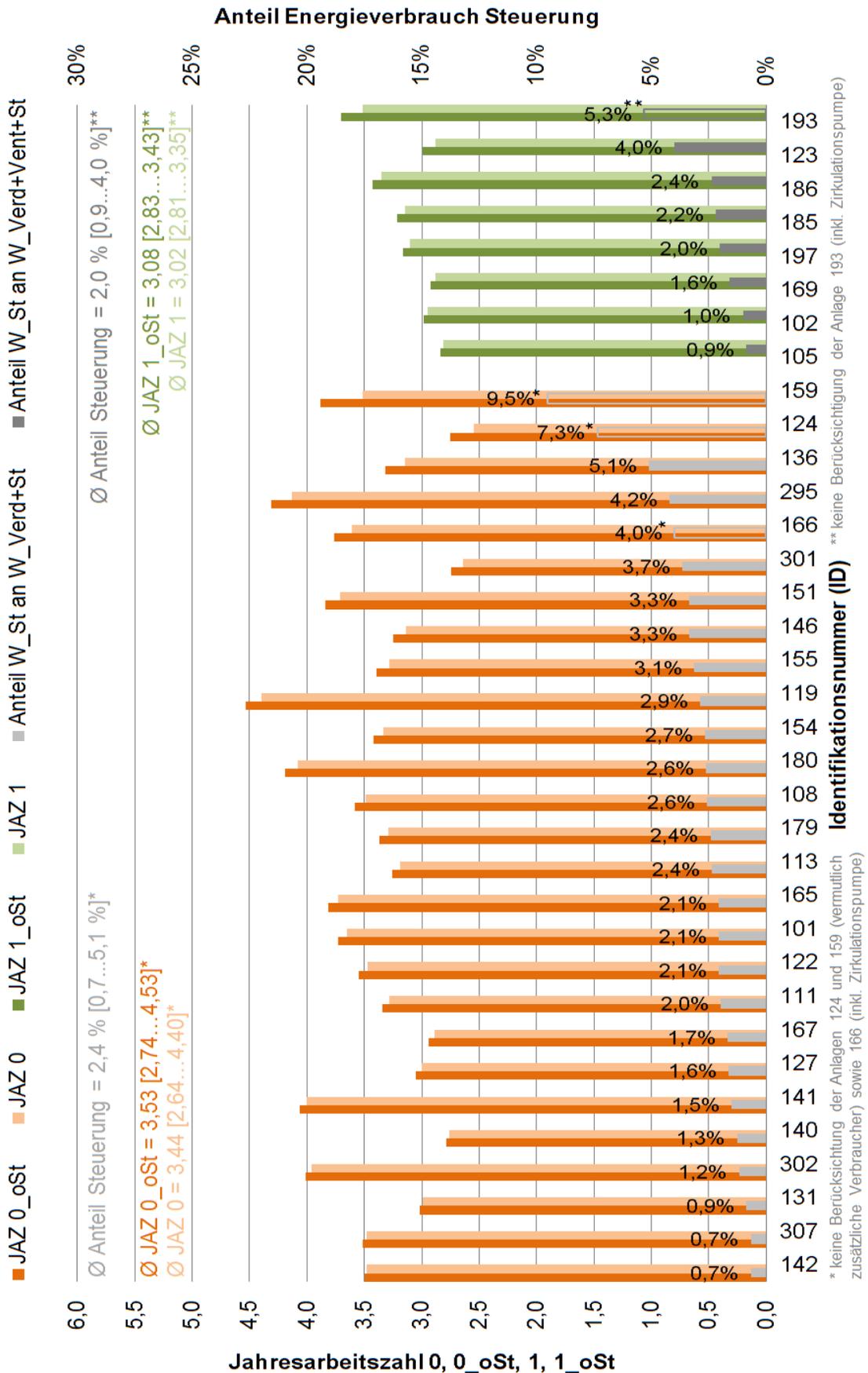


Abb. 36: Darstellung des Effizienzeinflusses der Steuerung in Form des anteiligen Energieverbrauchs sowie der Arbeitszahldifferenzen für die Bilanzgrenzen 0 und 1 für alle 35 Luft-Wärmepumpen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

Bezogen auf die Auswertung zur JAZ 0 liegen die Anteile der Steuerung im Mittel bei 2,4 %. Die Bandbreite reicht von 0,7 bis 5,1 %. Für die auswertbaren Wärmepumpen bedeutet diese eine Verringerung der durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 3,53 auf 3,44. Die Ergebnisse mit Bezug zur Jahresarbeitszahl 1 bewegen sich unter Berücksichtigung der anderen Bilanzgrenze auf ähnlichem Niveau. Der Anteil des Energieverbrauchs der Steuerung reicht von 0,9 bis 4,0 %, wobei der Mittelwert bei 2,0 % liegt. Im Durchschnitt verringert der Energieverbrauch der Steuerung die Jahresarbeitszahl von 3,08 auf 3,02.

Um den Anteil des Energieverbrauchs der Steuerung besser einordnen zu können, werden in der Abb. 37 zusätzlich die Gesamtverbräuche (W) dargestellt. Darüber hinaus umfasst die Grafik die mittlere Leistung der Steuerung. Die Anlagen mit zusätzlichen (nicht separat vermessenen) Verbrauchern auf dem Elektrozähler der Steuerung (vgl. Abb. 36) werden dabei nicht berücksichtigt. Im Mittel liegt die Leistung der Steuerung bei 12 W wobei sich die Werte zwischen 5 und 24 W bewegen. Die Vermutung, dass der Anteil der Steuerung vor allem aufgrund eines abnehmenden Gesamtenergiebedarfs zunimmt, bestätigt sich kaum. Vielmehr nimmt die Leistung der Steuerung in einem relativ breiten Band mit steigendem Anteil der Steuerung zu.

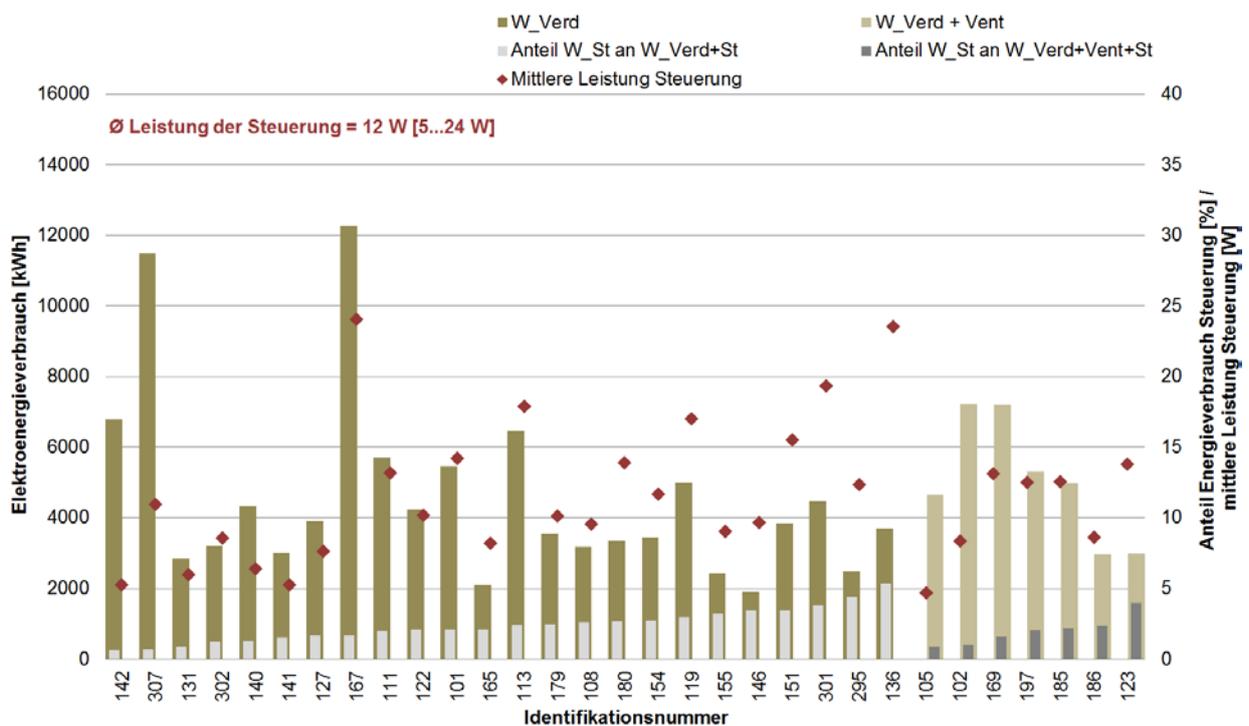


Abb. 37: Gesamtelektroenergieverbrauch und Anteil sowie Leistung der Steuerung für alle 31 auswertbaren Luft-Wärmepumpen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

5.4.1.4 Einfluss Wärmequellenantrieb

Für 27 von 35 Luft-Wärmepumpen wurde der Energieverbrauch der Ventilatoren separat vermessen. Dessen Ausmaß und der Einfluss auf die Effizienz wird in der Abb. 38 dargestellt. Die grünen Säulen stellen die Jahresarbeitszahlen 0 und 1 dar, die grauen Säulen geben den Anteil des Elektroenergieverbrauchs für den Antrieb im Wärmequellenkreis wieder. Mit größer werdender grauer Säule nehmen die Unterschiede der Jahresarbeitszahlen folglich zu.

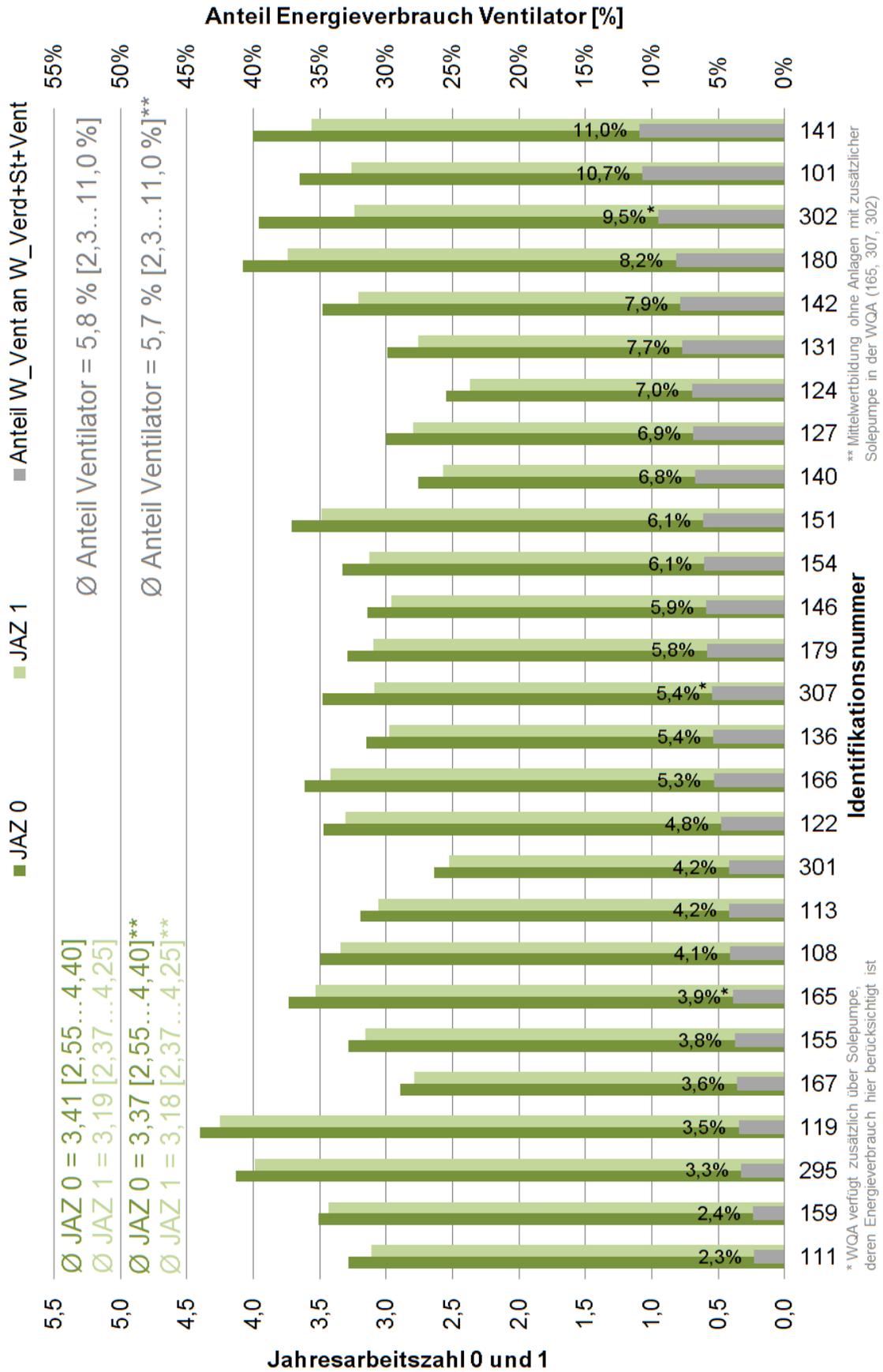


Abb. 38: Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 0 und 1 sowie der Anteil des Elektroenergiebezugs für die Wärmequelle von 27 dahingehend auswertbaren Luft-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

Bei dieser Auswertung gilt zu berücksichtigen, dass die gekennzeichneten Anlagen neben dem Ventilator auch über eine Solepumpe verfügen. Beide Komponenten gehen gleichermaßen als Antrieb in der Wärmequellenanlage in die JAZ 1 ein. Die Statistik zum Thema in Form von Mittelwerten und Bandbreiten wird für beide Anlagengruppen - alle Anlagen sowie jene nur mit Ventilator – angegeben.

Da die Ergebnisse für Anlagen mit Solepumpe keine Extremwerte aufweisen, sind die Bandbreiten für beide Gruppen identisch. Der anteilige Energieverbrauch der Wärmequelle liegt zwischen 2,3 % für **ID 111** und 11,0 % für **ID 141**. Die Jahresarbeitszahlen 0 liegen zwischen 2,55 und 4,40. Verringert durch den Energieverbrauch in der Wärmequellenanlage liegen die Jahresarbeitszahlen 1 zwischen 2,37 und 4,25. Bezogen auf alle Wärmepumpen benötigt die Wärmequellenanlage im Schnitt 5,8 %, hinsichtlich der Anlagen nur mit Ventilator im Mittel 5,7 %, der gesamten Elektroenergie. Die mittlere JAZ wird von 3,41 (JAZ 0) auf 3,19 (JAZ 1) bzw. von 3,37 (JAZ 0) auf 3,18 (JAZ 1) verringert. Die unterschiedlichen Ergebnisse zeigen deutlich das Energieeinsparpotenzial in diesem Bereich.

5.4.1.5 Einfluss Heizstab

Der Heizstabeinsatz wird, abgesehen von Fehlbetrieben oder speziellen Aufheizprogrammen (bspw. Legionellenvermeidung), von der Anlagendimensionierung und den äußeren Bedingungen bestimmt. Auslegung bzw. tatsächlicher Einsatzzweck der Heizstäbe sind unbekannt. Eine gängige Dimensionierungspraxis für Luft-Wärmepumpen ist jedoch die monoenergetisch parallele Betriebsweise eines Heizstabes unterhalb einer Außentemperatur von ca. -5 °C. Um den Heizstabeinsatz des hier betrachteten Auswertungsjahres besser einschätzen zu können, hilft eine entsprechende Auswertung der Wetterdaten im Kapitel 5.2. In dieser werden anhand der Tagesmittelwerte der Außenlufttemperaturen an fünf in Deutschland verteilten Wetterstationen die zeitlichen und territorialen Häufigkeiten des Auftretens von Temperaturen unter -5 °C untersucht. Die Ergebnisse lassen sich dahingehend interpretieren, dass die Witterungsbedingungen im letzten Auswertungsjahr im Mittel unterdurchschnittlich viel Heizstabarbeit erfordern. Dies wird durch die Ergebnisse im Kapitel 5.7.1.1 untermauert. Hier werden die Messwerte einer anders definierten Gruppe von Wärmepumpen über zwei Jahre hin ausgewertet. Die dabei untersuchten Anlagen kamen in der Periode 2011/12 auf einen Anteil für die Heizstabarbeit am Gesamtelektroenergieverbrauch von 4,3 % und somit fast auf den doppelten Wert, verglichen mit einem Anteil von 2,2 % für den Zeitraum 2012/13.

Die Abb. 39 zeigt den Heizstabeinsatz als Anteil des Elektroenergieverbrauches der Heizstäbe am Gesamtverbrauch in Form von grauen Säulen (gleichzeitig Sortiergröße). Der Einfluss auf die Effizienz wird durch die Darstellung der Jahresarbeitszahlen mit den Bilanzgrenzen 1 (ohne) und 2 (inkl. Heizstab) gezeigt. Für 16 der 35 untersuchten Luft-Wärmepumpen wurde Heizstabeinsatz detektiert, wobei nur bei 3 Anlagen der Anteil am Gesamtelektroenergiebedarf einen Wert von 2 % übersteigt. Im Mittel liegt der Heizstabanteil bei 1,0 %, das Maximum bei 12,5 %. Zum Vergleich: der Anteil der Steuerung liegt im Mittel bei 2,4 % (vgl. Abb. 36 auf Seite 64). Letzteres tritt bei der Anlage **ID 102** auf. Bemerkenswert ist hierbei die starke Korrelation der Heizstabarbeit mit der vor Ort gemessenen Außenlufttemperatur. Wie die Abb. 32 zeigt, lagen letztere bei dieser Anlage auch nicht auf einem ver-

gleichsweise geringen Niveau. Überdurchschnittliche Verdichterlaufzeiten (Durchschnitt: 2242 h/a; vgl. Kapitel 0) sind eher ein Indiz für eine Unterdimensionierung der Wärmepumpe. Bei der Anlage mit der **ID 124** korreliert der Heizstabbetrieb ebenfalls mit der Außenlufttemperatur, bei gleichzeitig jedoch leicht unterdurchschnittlicher Auslastung (2061 h/a) der Anlage. Die Wärmepumpen **ID 166** verfügt über zwei Heizstäbe, wobei jener im Heizungspufferspeicher im Auswertungszeitraum nicht aktiv war. Der Heizstabbetrieb fand im wöchentlichen Rhythmus im Trinkwarmwasserspeicher statt, was auf ein Aufheizen zur Legionellenvermeidung schließen lässt. Der mittlere Effizienzeinfluss bezogen auf alle Anlagen war mit einer Absenkung von 3,17 auf 3,15 äußerst gering.

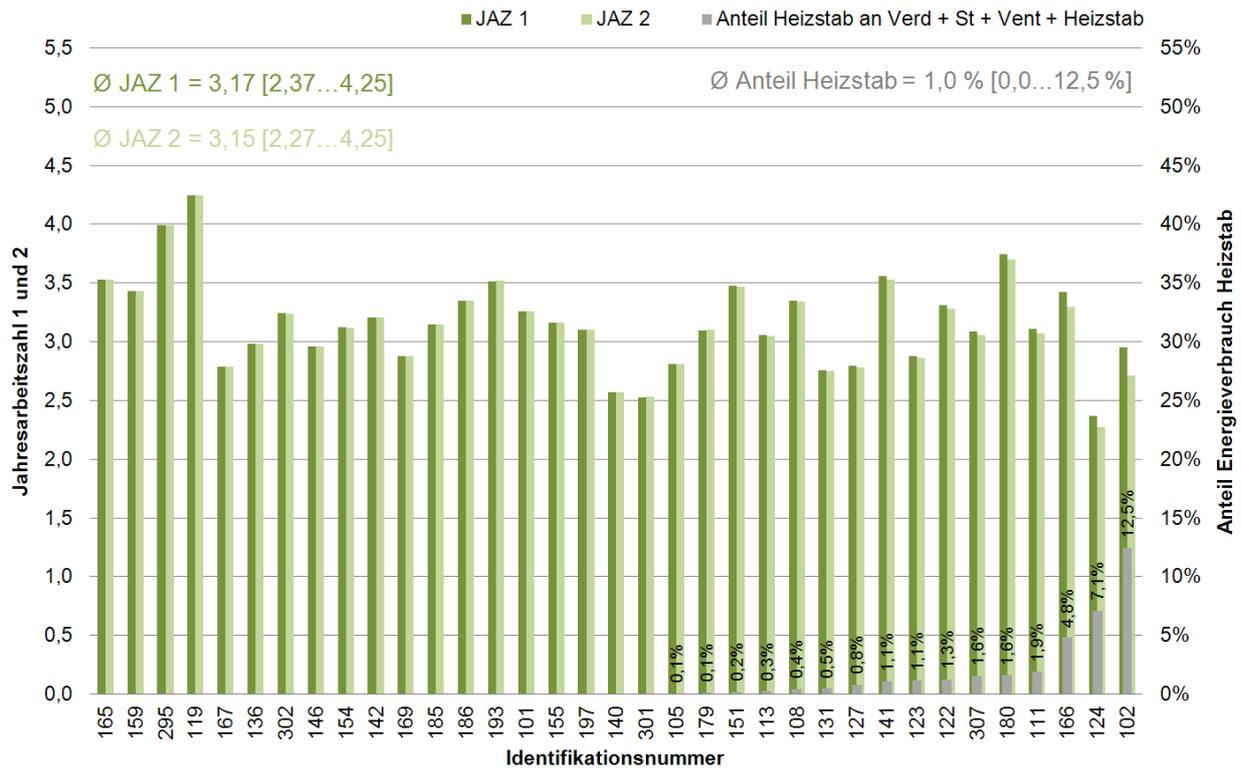


Abb. 39: Einfluss von Heizstabbetrieb auf die Effizienz durch Darstellung der Jahresarbeitszahlen 1 und 2 sowie die Anteile des Elektroenergieverbrauches der Heizstäbe verglichen mit dem Gesamtverbrauch für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

5.4.1.6 Zusammenstellung der Effizienz und ihrer quantifizierbaren Einflussparameter

In der Abb. 40 werden die in den vorherigen Kapiteln im Einzelnen vorgestellten Effizienzeinflüsse, sofern ermittelbar, für alle 35 Luft-Wärmepumpen zusammenfassend dargestellt. Die grauen Rauten zeigen den Temperaturhub, die geteilten Säulen geben den anteiligen Energieverbrauch des Heizstabes (lila), des Wärmequellenantriebs (blau) sowie der Steuerung (orange) wieder. Wie bereits in früheren Kapiteln erwähnt, können nicht alle Anlagen identisch ausgewertet werden. Daher ergibt sich im Diagramm eine Zweiteilung. Bei den Anlagen auf der linken Seite wurden alle elektrischen Verbraucher messtechnisch erfasst. Daher können für diese Wärmepumpen auch die Jahresarbeitszahl 0_oSt und Jahresarbeitszahl 2 dargestellt werden, deren Differenz im Energieverbrauch der genannten Komponenten liegt. Für die Anlagen auf der rechten Seite werden die Jahresarbeitszahlen mit den Bilanzgrenzen 1_oSt und 2 veranschaulicht, da bei diesen Wärmepumpen der Wärmequellenantrieb nicht vermessen wurde. Eine Erweiterung verglichen mit den bisherigen Betrachtungen besteht darin, dass die dargestellten Anteile des Elektroenergieverbrauches einzelner Komponenten jeweils nur im Verhältnis zum Energieverbrauch des Verdichters dargestellt werden. In den vorherigen Kapiteln entsprach der anteilige Energieverbrauch einer Komponente dem Anteil am gesamten Verbrauch bezogen auf die jeweils betrachtete Bilanzgrenze. Dies bedeutet, dass sich vorher bspw. der Anteil des Ventilators auf den Gesamtverbrauch von Verdichter, Steuerung und Ventilator bezog. Die in der Grafik genannten Mittelwerte und Bandbreiten beziehen sich auf die umfassend vermessenen Wärmepumpen auf der linken Seite des Diagramms.

Hinsichtlich der Mittelwerte der einzelnen Einflussparameter auf die JAZ 2 ergeben sich bemerkenswerte Verhältnisse zueinander. Der Energieverbrauch des Heizstabes ist im betrachteten Zeitraum sehr gering (0,9 %). Allein die Steuerung verbraucht das Dreifache an Elektroenergie (2,7 %). Gleichzeitig benötigt diese fast halb soviel Energie wie die Ventilatoren (6,1 %). Insgesamt wird durch diese drei Komponenten der Energieverbrauch der Wärmepumpenanlage im Mittel um knapp 10 % (zum Verdichter) erhöht. Bei der Betrachtung der Einzelanlagen zeigen sich sehr unterschiedliche Verteilungen der Energieverbräuche von Steuerung, Ventilator und Heizstab. Bei mehreren Anlagen (**IDs 295, 301, 136**) liegt bspw. der Energieverbrauch der Steuerung auf ähnlichem Niveau wie der des Ventilators.

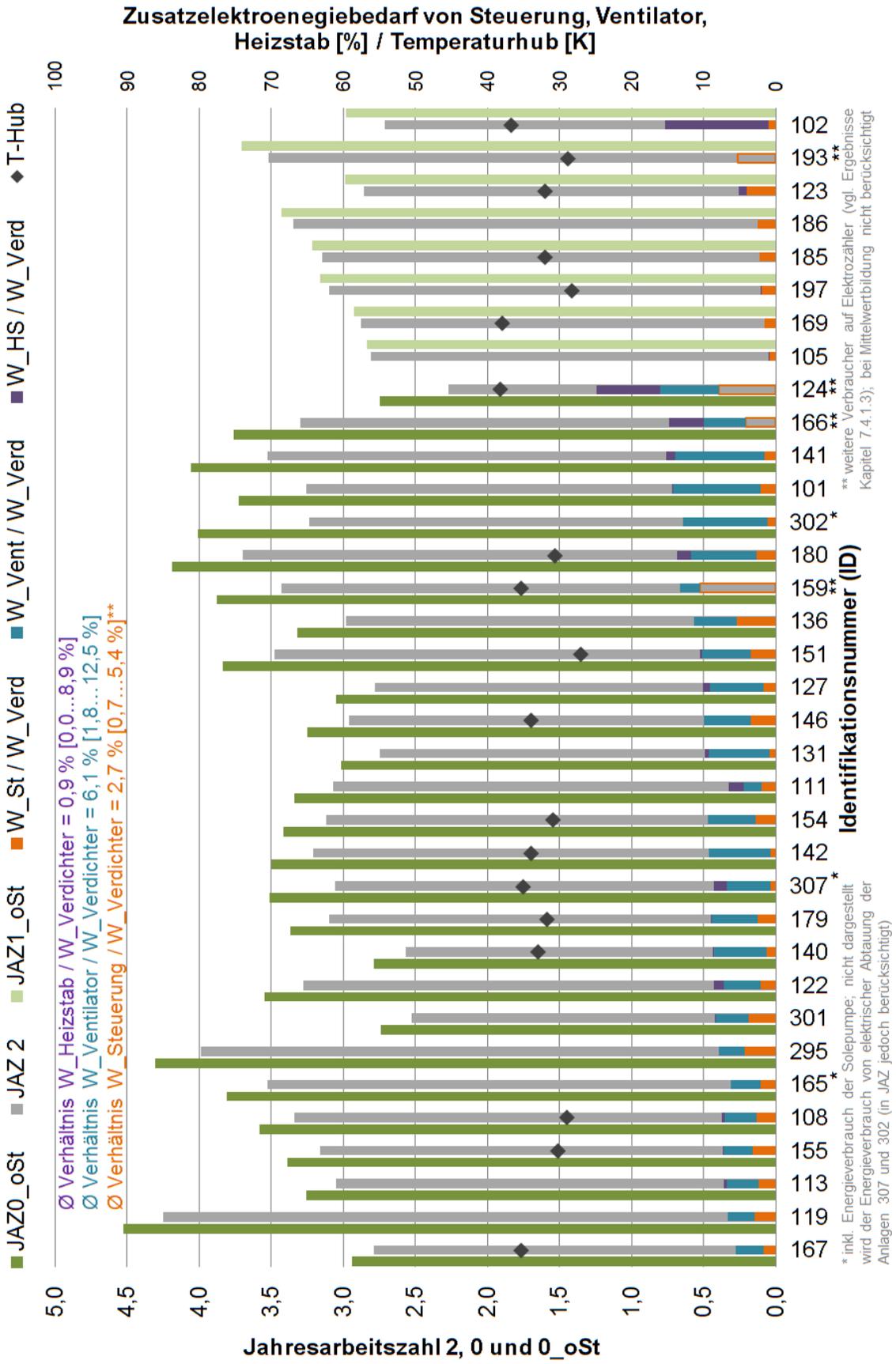


Abb. 40: Zusammenfassung der Ergebnisse für die 35 Luft-Wärmepumpen mittels Darstellung der quantifizierbaren Effizienzeinflüsse auf die Jahresarbeitszahl mit der Bilanzgrenze 2 sowie der im Mittel zu überwindenden Temperaturhübe

5.4.2 Wärmequelle Erdreich

5.4.2.1 Jahresarbeitszahl 2, Anlagencharakterisierung und Betriebsbedingungen

Jahresarbeitszahlen und Anlagencharakteristik: einzelne Anlagen

Analog zur Abb. 30 für die Luft-Wärmepumpen werden in der nachfolgenden Abb. 41 die JAZ der Erdreich-Wärmepumpen für die Auswertungsperiode 2012/13 vorgestellt. Auch hier sind die Säulen jener Anlagen, die nicht bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ vermessen wurden, dunkelgrün gekennzeichnet. Eventuelle Besonderheiten sind durch farbige Punkte auf den Säulen gekennzeichnet. Sie sind vielfältiger als bei den Luft-Wärmepumpen. Neben den Anlagen mit solarthermischer Unterstützung und zusätzlicher Wärmequellen auf der Primärseite (Abluft, Außenluft bei Energiezaun) werden Abweichungen von den üblicherweise installierten soleführenden Erdwärmesonden (Erdwärmekollektor, Energiezaun, CO₂-Sonde, Direktverdampfung, Wärmeträgermedium Wasser) sowie Anlagen mit leistungsgeregelten Verdichtern explizit gekennzeichnet.

Insgesamt konnten für die untersuchten 47 Erdreich-Wärmepumpen JAZ zwischen 3,04 und 5,44 ermittelt werden. Der Mittelwert für alle Anlagen beträgt 4,04. Auch bei den Erdreich-Wärmepumpen erzielen die neuen Anlagen im Schnitt höhere Effizienzwerte. So liegt deren Mittelwert bei 4,27, der sich aus Einzelwerten zwischen 3,40 und 5,44 ergibt. Für die bereits in „WP-Effizienz“ untersuchten Wärmepumpen wurden JAZ zwischen 3,04 und 5,12 und ein Durchschnitt von 3,94 ermittelt. Im Gegensatz zu den Luft-Wärmepumpen sind die Unterschiede zwischen den Arbeitszahlbandbreiten von neuen und alten Anlagen relativ ähnlich. Dennoch konzentriert sich die Verteilung der neuen Erdreich-Wärmepumpen im oberen Bereich, wobei jedoch nur die JAZ der Anlage **ID 116** das beste Ergebnis der alten Anlagen von 5,12, erzielt von **ID 132**, übersteigt. Diese Wärmepumpe hat zwar durch eine 300 m tiefe und mit Wasser gefüllte Erdwärmesonde besonders gute Voraussetzungen für diese hohe Effizienz, die zweithöchste und unwesentlich geringere JAZ der Altanlagen liegt jedoch bereits bei 4,98 und wird durch eine Anlage (**ID 153**) ohne die extra aufgeführten Besonderheiten erzielt. Eine weitere dargestellte Anlagencharakteristik betrifft die Nutzung von Erdwärmekollektoren, deren JAZ vor allem im unteren Mittelfeld anzutreffen sind. Die Arbeitszahlen von Wärmepumpen mit Solarthermieanlagen (Hinweis: Arbeitszahlen der Wärmepumpenanlage, kombinierten Arbeitszahlen in Kapitel 5.6) liegen im oberen und unteren Drittel der Bandbreite. Drei der neuen Anlagen weisen zusätzliche technische Besonderheiten auf, wobei zwei dieser Anlagen die besten Ergebnisse erzielen: beide Anlagen verfügen je über einen leistungsgeregelten Verdichter. Die Anlage mit CO₂-Sonde (**ID 160**) erzielt eine Jahresarbeitszahl von 5,08, die Anlage mit Direktverdampfung (**ID 116**) die höchste Jahresarbeitszahl mit einem Wert von 5,44. Es ist zu beachten, dass die Anlagen mit den besten Effizienzergebnissen eine relativ aufwendige und damit kostspielige Wärmequelleanschlusung erfordern. Die Wärmepumpe **ID 187** verfügt ebenso über eine Wärmequellenanlage mit Direktverdampfung, kommt aber nicht über einen Wert von 3,55 hinaus. Wichtige Anhaltspunkte für die Erklärung solcher Effizienzunterschiede liefert die Abb. 43 sowie die folgenden Kapitel 5.4.1.2 bis 5.4.2.6.

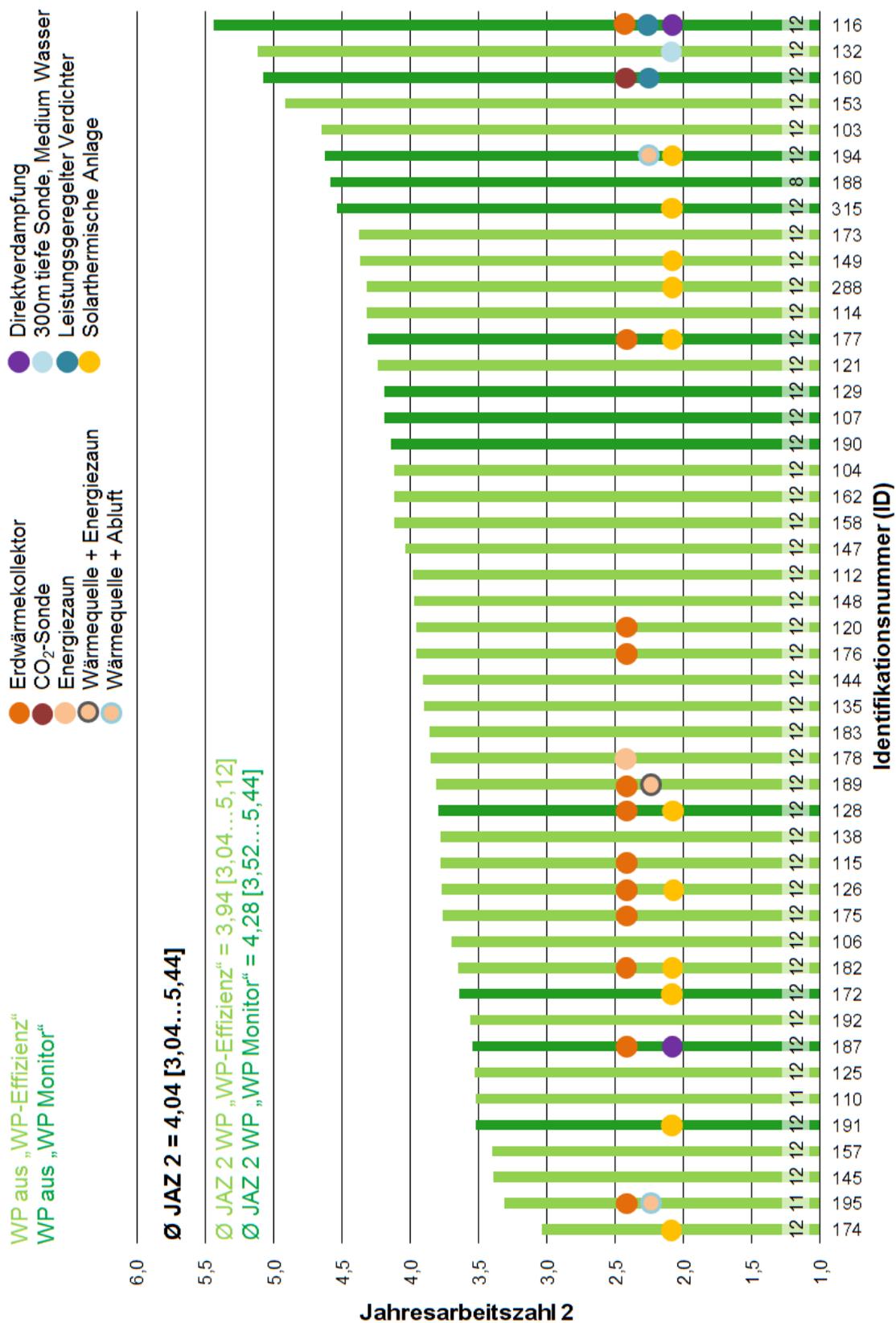


Abb. 41: Jahresarbeitszahlen aller 47 Erdreich-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013, wobei zwischen Jahresarbeitszahlen der Anlagen aus dem „WP-Effizienz“ Projekt unterschieden und charakteristische Eigenschaften aufgetragen werden.

Jahresarbeitszahlen und Betriebsbedingungen: Mittelwerte

Abb. 42 zeigt die Mittelwerte der Betriebsbedingungen, der JAZ und dient gleichzeitig als Legende für die nachfolgende Abb. 43, in der Messergebnisse für alle Einzelanlagen in gleicher Art und Weise dargestellt werden. Verglichen mit den Ergebnissen der Luft-Wärmepumpen sind die mittleren Temperaturen für die Trinkwarmwasserspeicherbeladung (48,3 °C, Spreizung 5,7 K) um 1,4 K sowie der Trinkwarmwasserzapfung (48,2 °C, 13 Anlagen) um 1,5 K höher, die der Heizkreis-/Pufferspeicherbeladung mit 32,0 °C (Spreizung 6,5 K) um 0,7 K geringer. Die mittlere Soletemperatur beträgt im Betrachtungszeitraum während des Wärmepumpenbetriebs 4,2 °C (Spreizung 3,9 K). Die Aufteilung der Heizenergie in Sommerperiode (6 %), Übergangszeit (32 %) und Winter (62 %) entspricht exakt den Ergebnissen der Luft-Wärmepumpen. Die Jahresarbeitszahl aller Erdreich-Wärmepumpen beträgt für den Betrachtungszeitraum im Mittel 4,04. Der Anteil der thermischen Energie zur Trinkwassererwärmung liegt im Mittel bei 18 % und ist somit 2 % geringer als bei den Luft-Wärmepumpen. Auch bei Erdreich-Wärmepumpen sei daraufhin gewiesen, dass bei der Mittelwertbildung auch Anlagen mit Kombispeicher berücksichtigt wurden. Auf Probleme, die beim Einsatz dieses Speichertyps auftreten können sowie deren Auswirkungen auf die Messergebnisse, wird anhand der Abb. 43 eingegangen.

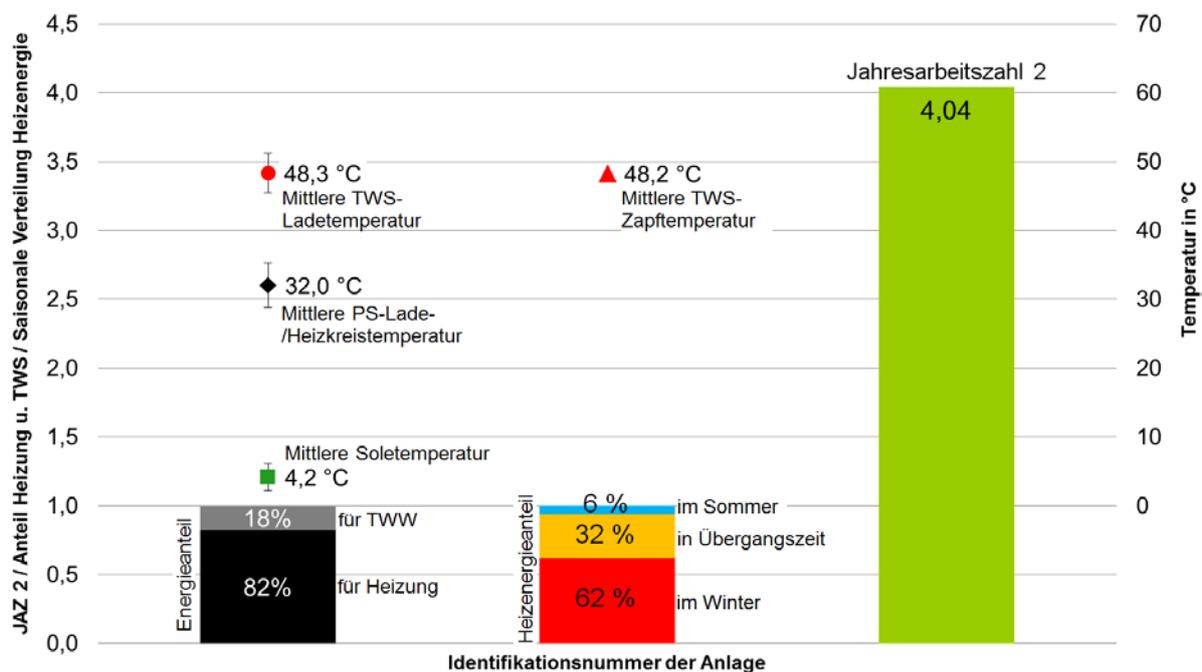


Abb. 42: Legende zur Abb. 43 sowie Mittelwerte der Jahresarbeitszahlen sowie der Betriebsbedingungen von Erdreich-Anlagen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 (Bandbreiten entsprechen der Spreizungen)

Jahresarbeitszahlen und Betriebsbedingungen: einzelne Anlagen

Die Abb. 43 stellt die AZ aller 47 im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 vermessenen Erdreich-Wärmepumpen sowie die Betriebsbedingungen, soweit sie jeweils erfasst wurden, dar. Das Diagramm hat, abgesehen von den Ergebnissen zur Wärmequelle, den identischen Aufbau wie jenes für Luft-Wärmepumpen in Abb. 32.

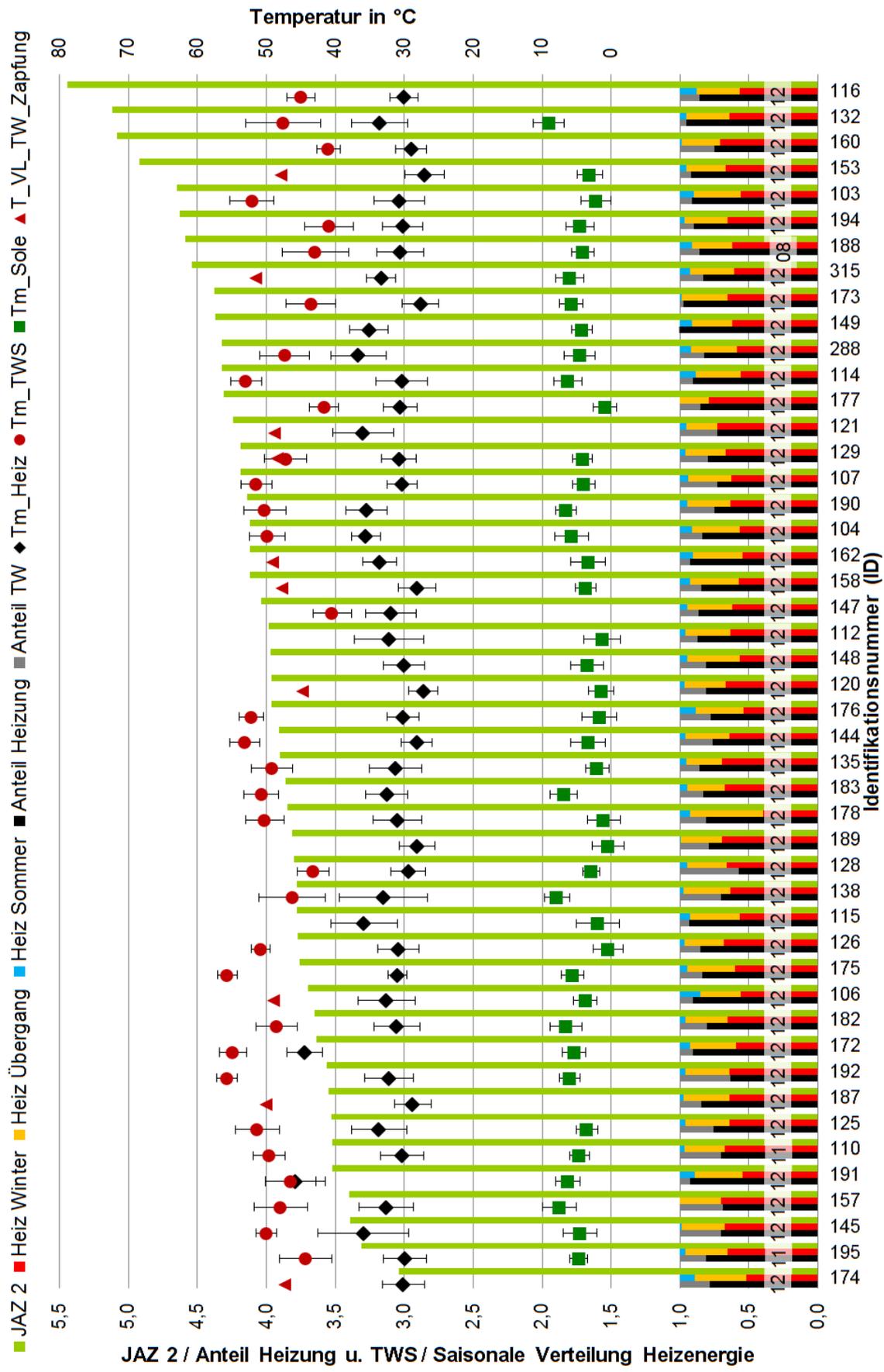


Abb. 43: Jahresarbeitszahlen aller 47 Erdreich-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013 und die entsprechenden Betriebsbedingungen.

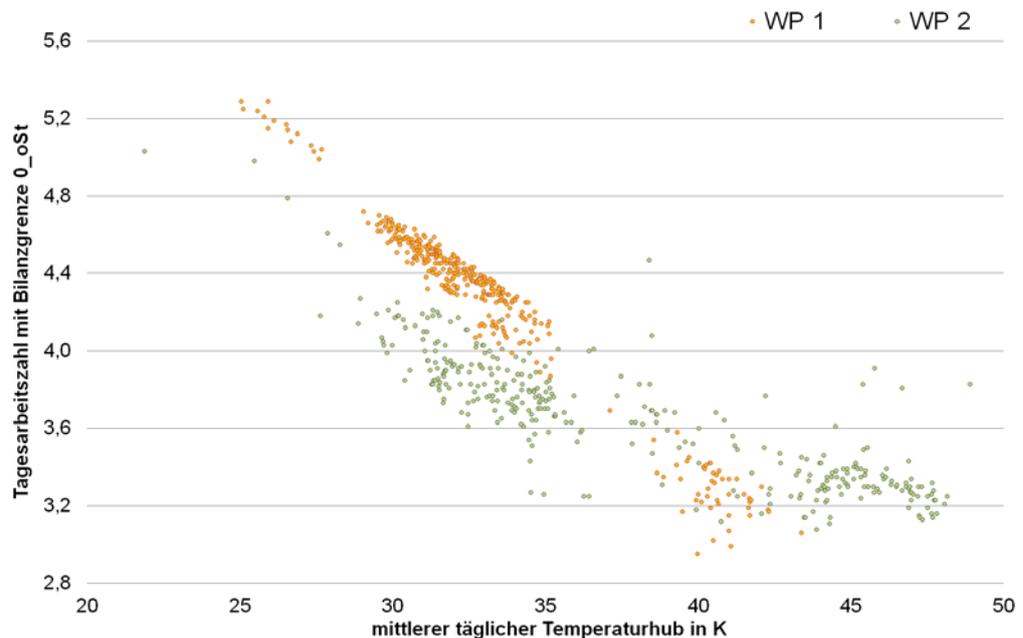
Bei den Erdreich-Anlagen wurde der Wärmequellenkreis mittels Wärmemengenzähler vermessen. Daher konnten die Temperaturen vor und nach dem Verdampfer sowie der entsprechende Durchschnittswert ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass auch die einzelnen Erdreich-Wärmepumpen sehr unterschiedliche Betriebsbedingungen aufweisen. Auf Seiten der Trinkwassererwärmung schwanken die mittleren Temperaturen bspw. zwischen 40,5 °C bei **ID 147** und 55,7 °C bei **ID 192**. Die extremsten Spreizungen sind mit 2,6 K bei **ID 126** sowie mit 10,6 K bei **ID 132** zu finden. Die Temperaturen des gezapften Trinkwarmwassers bewegen sich zwischen 44,7 °C (**ID 120**) und 51,6 °C (**ID 315**). Bei der Heizkreis-/Pufferspeicherbeladung sind hinsichtlich der mittleren Temperaturen zwei Ausreißer zu beobachten. Die Anlagen **ID 191** mit 46,5 °C und **ID 172** mit 44,4 °C verwenden Radiatoren bzw. Mischsysteme für die Heizwärmeverteilung. Die übrigen Wärmepumpen stellen im Heizmodus mittlere Temperaturen zwischen 27,1 °C (**ID 153**) und 36,7 °C (**ID 288**) zur Verfügung. Die geringste Spreizung wurde mit nur 2,7 K bei Anlage **ID 175**, die höchste mit 13,2 K bei Anlage **ID 145**, gemessen. Beide Wärmepumpen beladen, jeweils über eine hydraulische Weiche, Fußbodenheizungen. Auf der Wärmequellenseite wurden mittlere Temperaturen zwischen 0,4 °C (**ID 126**) und 9,0 °C (**ID 132**) erzielt. Die minimale Spreizung liegt bei 2,5 K (**ID 128**) und die maximale Spreizung bei 6,3 K (**ID 115**). Fehlende Temperaturangaben sind u.a. auf defekte oder aufgrund konstruktiver Einschränkungen fehlende Wärmemengenzähler zurückzuführen. Ähnlich wie die Temperaturen variieren auch die energetischen Anteile von Trinkwassererwärmung und Raumheizung zwischen den einzelnen Objekten stark. Der Extremwert von 44 % für das Trinkwarmwasser der Wärmepumpe mit der **ID 128** ist, wie bei den Luft-Wärmepumpen auch, auf eine Fehlbeladung des Kombispeichers zurückzuführen. Die Anlage mit dem nächstkleineren Wert in Höhe von 35 % verfügt über einen separaten Trinkwasserspeicher (**ID 192**). Im Gegensatz dazu wird die Wärmepumpe mit der **ID 149** fast gar nicht zur Trinkwassererwärmung benötigt. Der Grund hierfür ist die mit 14,5 m² sehr groß dimensionierte Solarthermieanlage, die durch Beladung eines Kombispeichers auch zur Heizungsunterstützung beiträgt. Die Wärmepumpe mit der **ID 173** versorgt ein Gebäude, das überwiegend als Büro genutzt wird, was zu einem energetischen Anteil für die Trinkwassererwärmung von lediglich 3 % führt. Der nächstgrößere Anteil wird mit 5 % von der Wärmepumpe **ID 132** erzielt, was auch dem relativ hohen Heizwärmeverbrauch von 119 kWh/m² geschuldet ist. Die Aufteilung der Heizenergie auf einzelne Jahresbereiche ergab u.a., dass nur zwei Anlagen in der definierten Sommerperiode Mai bis August nicht geheizt haben (**ID 157** und **ID 177**). Der mit 15 % größte Anteil an Heizenergie in den Sommermonaten wurde für die Wärmepumpenanlage **ID 106** ermittelt.

5.4.2.2 Effizienz und Temperaturhub

Mit äquivalenten Darstellungen wie für die Luft-Wärmepumpen in Kapitel 5.4.1.2 werden nachfolgend die Ergebnisse zur Korrelation von Effizienz und Temperaturhub für die Erdreich-Wärmepumpen vorgestellt.

Um die typischen Betriebspunkte bei Erdreich-Wärmepumpen sowie die dabei erreichten Effizienzwerte vorab zu erläutern, zeigt die Abb. 44 beispielhaft für zwei Erdreich-Wärmepumpen die entsprechenden Ergebnisse. Die Tagesarbeitszahlen der WP 1 zeigen eine vergleichsweise lineare Abhängigkeit zum Temperaturhub. Bei Temperaturhuben zwischen 25 und 43 K werden Tagesarbeitszahlen zwischen 3,0 und 5,3 erzielt. Relativ deutlich bilden sich drei Arbeitsbereiche aus. Im mittleren Bereich, zwischen 29 und 35 K, überwiegt der Betrieb für Raumheizung. Ein Temperaturhub um 41 K und die damit verbundenen geringen Tagesarbeitszahlen bilden sich bei der Trinkwassererwärmung im Sommer aus. Die höchsten Effizienzwerte um 5,0 werden an Tagen in der Übergangszeit erzielt, an denen die Wärmepumpe zwar heizen muss, jedoch kein Trinkwasser erwärmt. Dieser Bereich ist bei WP 2 weniger deutlich ausgeprägt. Ähnlich ist hingegen der Temperaturhubbereich für überwiegen den Raumheizbetrieb. Die Tagesarbeitszahlen liegen jedoch auf wesentlich geringerem Niveau. Für die alleinige Trinkwassererwärmung wird ein höherer Temperaturhub ermittelt, wobei die Effizienzwerte im Vergleich zur WP 1 höher sind. Dies führt auch dazu, dass die negative Steigung der Effizienzkurve mit zunehmendem Temperaturhub abnimmt.

Abb. 44: Tagesarbeitszahlen mit Bilanzgrenze 0_{oSt} über mittleren täglichen Temperaturhub zweier Erdreich-Wärmepumpen



In der Abb. 45 werden die mittleren Temperaturhübe sowie die Effizienzwerte der dahingehend 31 auswertbaren Erdreich-Wärmepumpen dargestellt. Der Unterschied zur äquivalenten Darstellung bei den Luft-Wärmepumpen besteht darin, dass bei den Erdreich-Wärmepumpen, um für jede Anlage neben dem Verdichter möglichst wenige Komponenten zu berücksichtigen, eine zusätzliche Bilanzgrenze berücksichtigt werden muss. Dies ist darauf zurückzuführen, das bei einigen nur die Solepumpe nicht, und bei anderen Anlagen nur die Steuerung nicht messtechnisch erfasst wird. Daher werden im Diagramm drei Jahresarbeitszahlen in Form verschieden grüner Säulen abgebildet. Die Helligkeitsstufen der Säulen geben jeweils die Bilanzgrenzen wieder. Das dunkle Grün entspricht der Bilanzgrenze mit den wenigsten zusätzlichen Komponenten (0_oSt), womit nur der Energieverbrauch des Verdichters berücksichtigt ist. Bei den Säulen in mittlerer Helligkeitsstufe wird zusätzlich die Steuerung (Bilanzgrenze 0) und bei hellgrünen Säulen zusätzlich die Solepumpe, jedoch nicht die Steuerung (Bilanzgrenze 1_oSt), berücksichtigt. Die Ergebnisse werden sortiert nach den Temperaturhüben (blaue Rauten) darstellt.

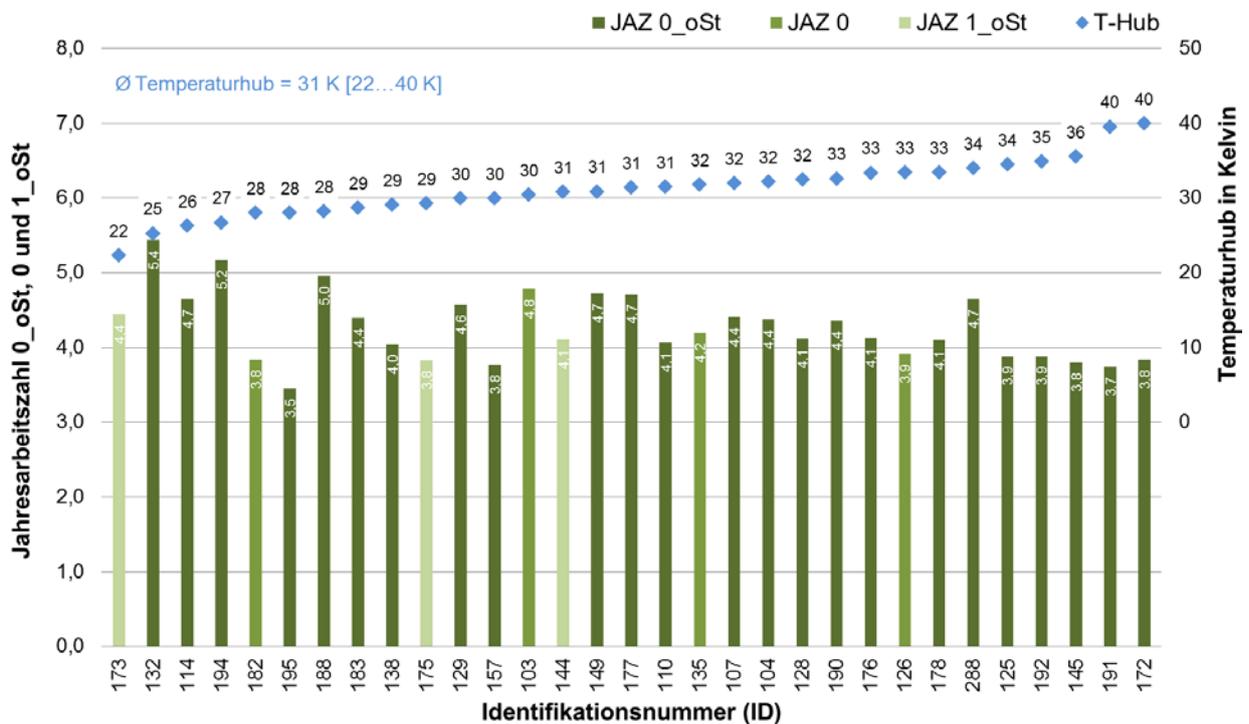
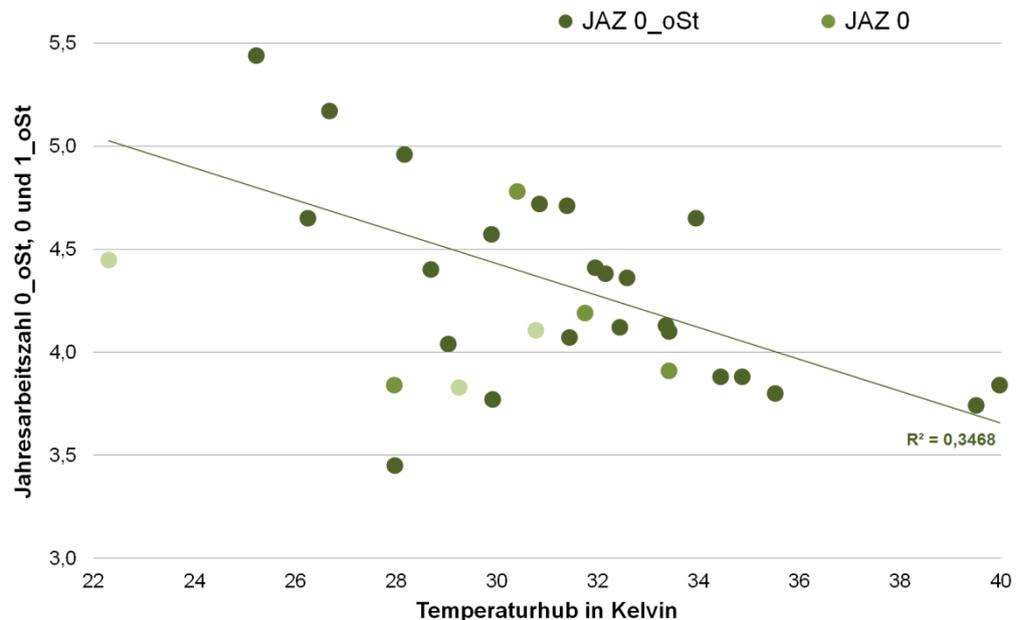


Abb. 45: Für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 werden für 31 Erdreich-Wärmepumpen die mittleren Temperaturhübe sowie die JAZ 0_oSt, JAZ 0 sowie JAZ 1_oSt dargestellt

Die Temperaturhübe liegen im Mittel bei 31 K, wobei sich die Werte zwischen 22 K (**ID 173**) und 40 K (**ID 172** und **ID°191**) bewegen. Damit ergibt sich im Vergleich mit den Luft-Wärmepumpen ein im Mittel um 2 K geringerer Temperaturhub bei insgesamt größerer Bandbreite (Luft: 27 bis 38 K). Wodurch sich diese stark unterschiedlichen Temperaturhübe ergeben, kann anhand der Abb. 43 auf Seite 74 nachvollzogen werden. Diese zeigt beispielsweise, dass der im Mittel geringste Temperaturhub der **ID 173** auf sehr geringe Heizkreistemperaturen und einer anteilig geringen Trinkwasserwärmemenge zurückzuführen ist. Die mittleren Soletemperaturen liegen oberhalb des Durchschnitts aller untersuchten Erdreich-Wärmepumpen.

Zur direkten Gegenüberstellung der Relationen von Effizienz und Temperaturhub einzelner Anlagen zeigt das Diagramm in Abb. 46 die entsprechenden Größen. Zusätzlich sind die JAZ 0_oSt mit einer Trendlinie unterlegt. Ähnlich wie bei den Luft-Wärmepumpen nehmen die Effizienzwerte mit steigendem Temperaturhub tendenziell ab, wobei die Streuung erheblich ist. Vor allem die maximalen JAZ nehmen oberhalb eines Temperaturhubes von 27 K relativ kontinuierlich ab. Demgegenüber liegen die minimalen JAZ bei Temperaturhüben zwischen 28 K und 40 K auf relativ konstantem Niveau.

Abb. 46: Darstellung der Jahresarbeitszahlen über den mittlerem Temperaturhub



Wie auch bei den Luft-Wärmepumpen ergibt sich nur eine leichte Korrelation beim Vergleich der Relationen von Effizienz und Temperaturhub unterschiedlicher Wärmepumpen. Die Gründe sind identisch und wieder in den Unterschieden der theoretischen Effizienz der Anlagen (COP) sowie der tatsächlichen Umsetzung dieser Effizienz im Feld zu suchen.

5.4.2.3 Einfluss der Steuerung

Der Effizienzeinfluss durch den Energieverbrauch der Steuerung wird in der Abb. 47 für 43 von 47 Erdreich-Wärmepumpen dargestellt. Für die übrigen vier Anlagen wird der Energieverbrauch der Steuerung nicht separat gemessen. Die Darstellung des Effizienzeinflusses der Steuerung wird auf zwei Bilanzgrenzen bezogen dargestellt. Da für sechs Wärmepumpen zwar die Steuerung, jedoch nicht die Solepumpe separat vermessen wurde, wird mit den grünen Säulen der Unterschied der Jahresarbeitszahlen 1 und 1_oSt dargestellt. Für die übrigen 37 Wärmepumpen kann der Effizienzunterschied der Jahresarbeitszahlen 0 und 0_oSt mittels der orangefarbenen Säulen dargestellt werden. Die grauen Säulen geben den energetischen Anteil der Steuerung bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch bei der jeweils zugrundeliegenden Bilanzgrenze an, welcher gleichzeitig die Sortiergröße darstellt.

Bezogen auf die Bilanzgrenze 0 reichen die Anteile der Steuerung von 1,0 bis 8,1 %, der Mittelwert liegt bei 2,7 %. Damit liegen die Werte auf ähnlichem Niveau wie jene der Luft-Wärmepumpen. Die Effizienz nimmt in Folge des Energieverbrauchs der Steuerung im Durchschnitt von 4,33 auf 4,21 ab. Der größte Einfluss ist bei der Anlage **ID 194** zu verzeichnen: die Steuerung verursachte eine Abnahme von 5,17 auf 4,75, was in erster Linie auf den geringen Gesamtenergieverbrauch zurückzuführen ist (vgl. Abb. 48). Bei der Anlage **ID 110** wurden Energieverbräuche gemessen, die einen weiteren Verbraucher vermuten lassen. Sie wird daher bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse bezogen auf die Bilanzgrenze 1 liegen für den Anteil des Energieverbrauches der Steuerung bei 2,2 %. Die Jahresarbeitszahl verringert sich im Mittel von 4,46 auf 4,37.

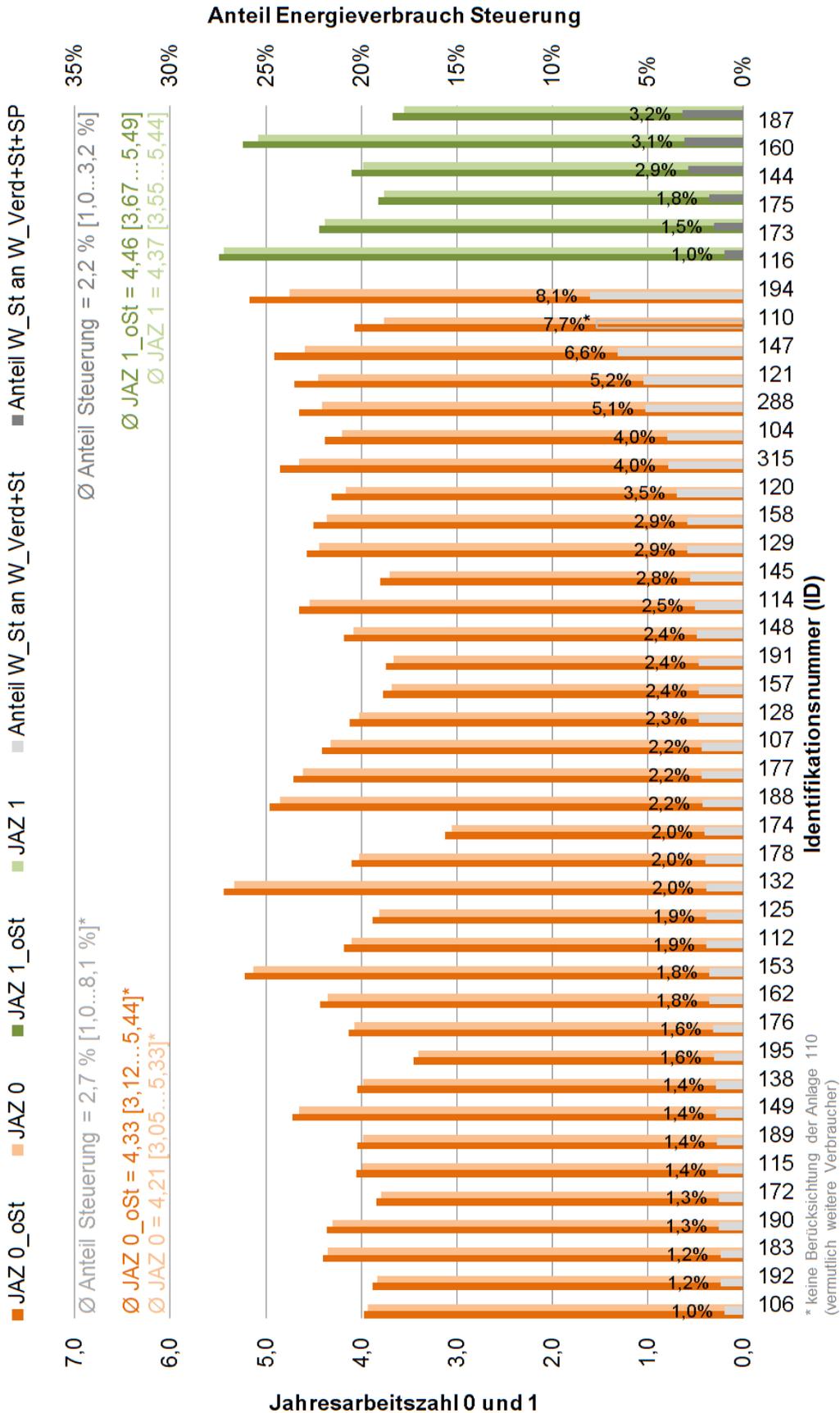


Abb. 47: Darstellung des Effizienzeinflusses der Steuerung in Form des anteiligen Energieverbrauchs sowie der Arbeitszahldifferenzen für die Bilanzgrenzen 0 und 1 für alle 43 Erdschicht-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

Da die Anteile der Steuerung auch vom Gesamtverbrauch abhängen, wird in der Abb. 48 der Energieverbrauch des Verdichters (bzw. des Verdichters und der Solepumpe) im Betrachtungszeitraum sowie die Leistung der Steuerung aufgetragen. Die Wärmepumpe **ID 110** wird nicht dargestellt. Im Unterschied zur den Ergebnisse bei den Luft-Wärmepumpen zeigt sich deutlicher der Zusammenhang zwischen abnehmenden Gesamtenergiebedarf und ansteigendem Anteil der Steuerung. Im Gegenzug ist die Korrelation zur Leistung der Steuerung weniger deutlich. Im Mittel beträgt diese 11 W bei Extremwerten von 5 und 25 W. Auch hier zeigen sich deutliche Parallelen zu den Ergebnissen der Luft-Wärmepumpen.

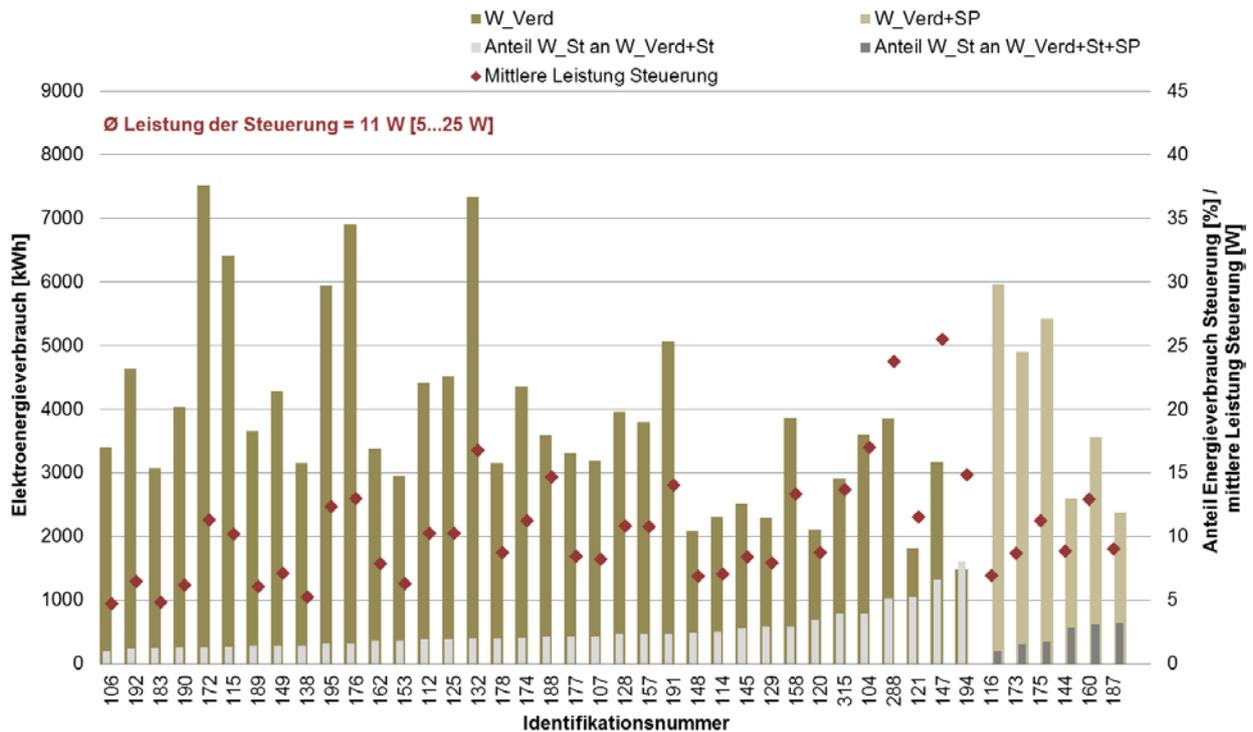


Abb. 48: Gesamtelektroenergieverbrauch und Anteil sowie Leistung der Steuerung für 42 auswertbare Erdreich-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

5.4.2.4 Einfluss Wärmequellenantrieb

Abb. 49 zeigt den Einfluss des Wärmequellenantriebs auf die Effizienz bei Erdreich-Anlagen. Hierbei gilt zu beachten, dass Anlagen mit Direktverdampfung sowie mit CO₂-Sonden aufgrund des nicht benötigten (bei Direktverdampfung nicht zusätzlich benötigten) Antriebs hier nicht berücksichtigt werden. Bei Wärmepumpen mit der Möglichkeit zur aktiven oder passiven Kühlung wurden die entsprechenden Elektroenergieverbräuche für diese Betrachtung abgezogen. An dieser Stelle sei jedoch erwähnt, dass nur geringfügig von den Kühlmöglichkeiten Gebrauch gemacht wurde. Die Ergebnisse der beiden Wärmepumpen **ID 174** und **ID 147** werden zwar dargestellt, in der Mittelwertbildung jedoch nicht berücksichtigt. In beiden Fällen musste festgestellt werden, dass die erzielten Ergebnisse für die installierten Pumpen nicht möglich und damit unplausibel sind.

Ähnlich wie bei den Luft-Wärmepumpen zeigt sich ein differenziertes Bild hinsichtlich des Effizienzeinflusses durch den Antrieb im Wärmequellenkreis. Die energetischen Anteile reichen von 2,0 % bei den Anlagen **ID 104** und **ID 103** bis zu 8,2 % bei der Wärmepumpe **ID 145**. Der mittlere Anteil liegt bei 4,5 %. Durch den Energieverbrauch der Solepumpe wird die Jahresarbeitszahl 0 von durchschnittlich 4,22 auf eine Jahresarbeitszahl 1 von 4,02 verringert. Für die bereits erwähnte Anlage mit der **ID 145** bedeutet der hohe Energieverbrauch der Solepumpe eine Minderung der Jahresarbeitszahl 0 von 4,59 auf eine Jahresarbeitszahl 1 von 4,04.

Deutlich ist der Trend hin zur Hocheffizienzpumpe erkennbar (nicht im Diagramm). Während der Energieanteil der Solepumpen alter Anlagen bei 4,7 % liegt, erreichen die neuen Anlagen einen Wert von durchschnittlich 3,9 %.

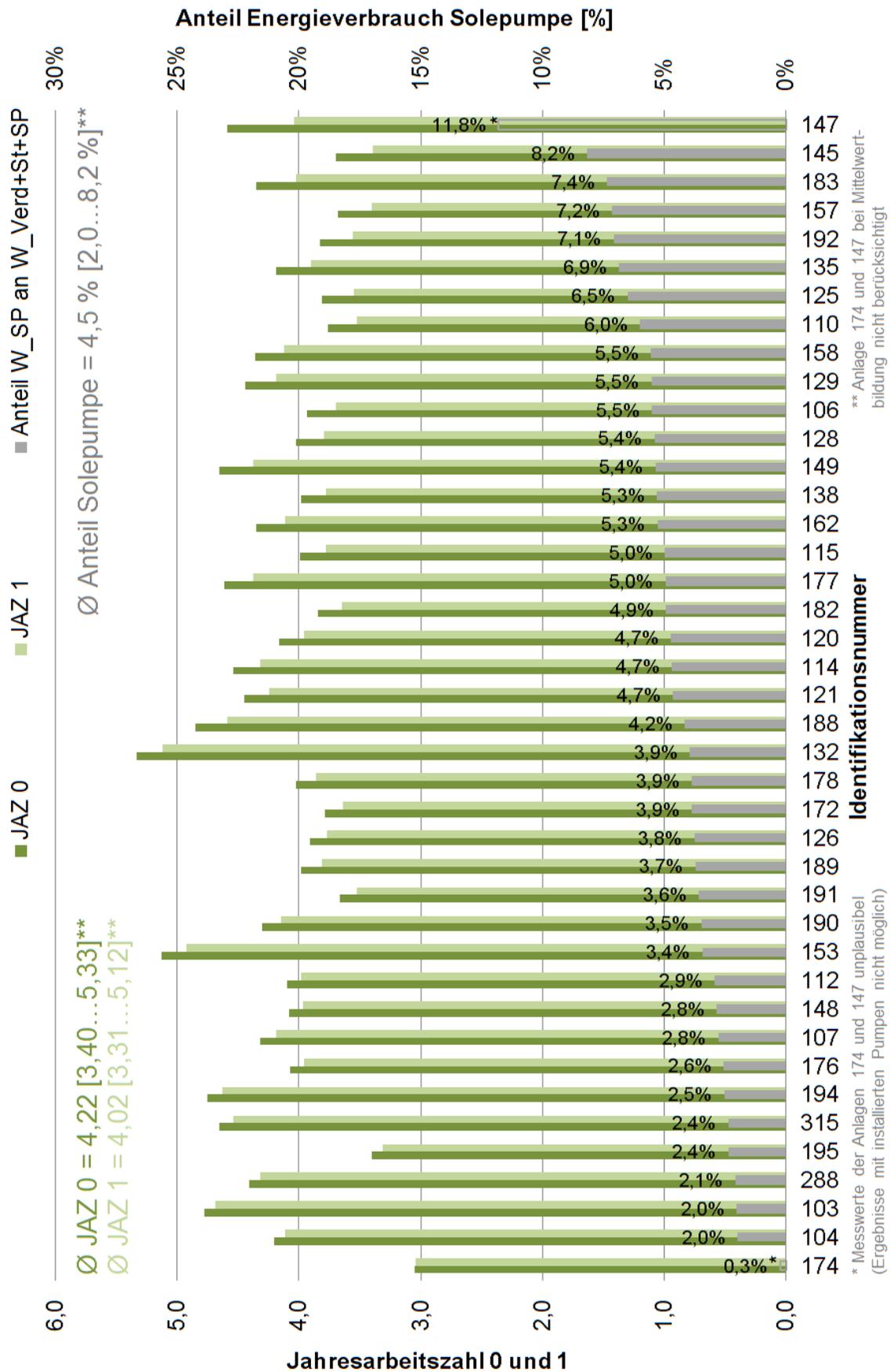


Abb. 49: Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 0 und 1 sowie der Anteil des Elektroenergiebezugs für die Solepumpe von 41 Erdreich-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

5.4.2.5 Einfluss Heizstab

Während bei Luft-Wärmepumpenanlagen der Heizstab ein fest eingeplanter Wärmeerzeuger für definierte Betriebspunkte ist, dient er bei Erdreich-Wärmepumpen in der Regel lediglich als Back-up für etwaige Ausfälle oder für die Bauaustrocknung zur Schonung der Wärmequelle. Zusammen mit den bereits im Zusammenhang mit den Heizstäben in Luft-Wärmepumpenanlagen (vgl. Kapitel 0) diskutierten Wetterbedingungen im Betrachtungszeitraum sind im Ergebnis kaum Betriebszeiten für die Heizstäbe bei den untersuchten Erdreich-Wärmepumpen zu erwarten.

In der Abb. 50 werden die Anteile des Energieverbrauches durch die Heizstäbe als graue Säulen (gleichzeitig Sortiergröße) sowie dessen Effizienzeinfluss durch die Jahresarbeitszahlen mit den Bilanzgrenzen 1 und 2 dargestellt. Für sieben der 47 untersuchten Erdreich-Wärmepumpen wurde Heizstabbetrieb detektiert. Der höchste Anteil wurde mit 5,2 % bei der Anlage **ID 183** gemessen. Bemerkenswert ist, dass der Heizstabbetrieb bei dieser Anlage deutlich mit den äußeren Bedingungen korreliert. Ein Dimensionierungsfehler ist hierfür vermutlich nicht der Grund, da die Verdichterlaufzeit der Anlage unter dem Schnitt der Erdreich-Wärmepumpen liegt. Bei dieser Anlage ist die Einschalttemperatur des Heizstabes (Bivalenzpunkt) zu hoch eingestellt. Den mit 2,7 % zweithöchsten Anteil hat die Anlage **ID 144** erzielt. Bei dieser Anlage fand der Heizstabbetrieb ausschließlich im 7-tägigen Rhythmus statt, was auf ein Programm zur Legionellenvermeidung schließen lässt. In der gesamten dreijährigen Messperiode wurde dieses Programm nur von Mai 2012 bis September 2013 aktiviert. Mit 1,9 % hat die Wärmepumpe **ID 177** den dritthöchsten Heizstabanteil. Auch bei dieser Anlage besteht eine klare Korrelation zwischen Heizstabbetrieb und Außenlufttemperatur bei unterdurchschnittlicher Auslastung der Wärmepumpe. Der durchschnittliche Anteil des Heizstabes beträgt für alle Erdreich-Wärmepumpen 0,3 % und wirkt sich daher im Mittel nur unwesentlich auf die Effizienz aus: Die Jahresarbeitszahl 1 verringert sich infolge der Heizstäbe von 4,05 auf die Jahresarbeitszahl 2 von 4,04.

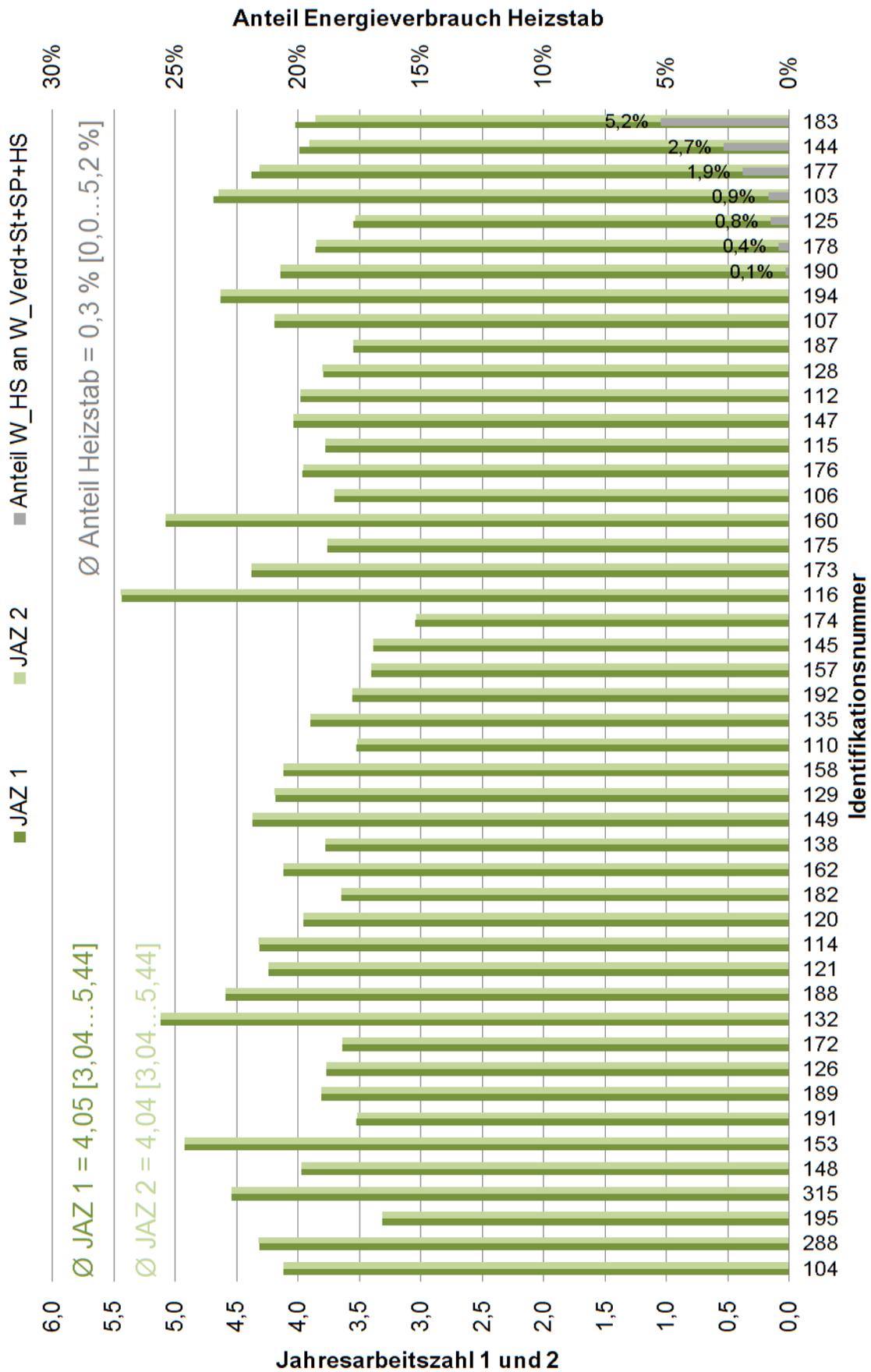


Abb. 50: Einfluss von Heizstabbetrieb auf die Effizienz durch Darstellung der Jahresarbeitszahlen 1 und 2 sowie die Anteile des Elektroenergieverbrauches der Heizstäbe verglichen mit dem Gesamtverbrauch für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013

5.4.2.6 Zusammenstellung der Effizienz und ihrer quantifizierbaren Einflussparameter

In der nachfolgenden Abb. 51 werden die vorher angestellten Betrachtungen zu den Einflüssen auf die Effizienz, genaugenommen der Jahresarbeitszahl 2, für jede der 47 Erdreich-Wärmepumpen zusammenfassend dargestellt. Diese Grafik verfolgt das Ziel, für jede Anlage die Jahresarbeitszahl mit der kleinstmöglichen Bilanzgrenze der Jahresarbeitszahl 2 gegenüberzustellen und die Differenz den verursachenden Elektroenergieverbrauchern zuzuordnen. Im Unterschied zur entsprechenden Grafik für die Luft-Wärmepumpen (Abb. 40) wird hier auf eine weitere Bilanzgrenze eingegangen, da bei den Erdreich-Anlagen nicht für alle Wärmepumpen der Anteil der Steuerung ausgewiesen werden kann. Daher wird die Jahresarbeitszahl 2 entweder der Jahresarbeitszahl 0_oSt, der Jahresarbeitszahl 0 oder Jahresarbeitszahl 1_oSt gegenübergestellt. Die grauen Rauten stellen den jeweils von den Wärmepumpen im Jahresmittel zu überwindenden Temperaturhub dar. Die auf der Grafik dargestellten Mittelwerte und Bandbreiten der anteiligen Energieverbräuche der Einzelkomponenten beziehen sich jeweils auf den Energieverbrauch des Verdichters und unterscheiden sich somit von den bislang genannten Ergebnissen.

Während die Luft-Wärmepumpen im Mittel zusätzlich zum Verdichter ca. 10 % Elektroenergie für Steuerung, Wärmequellenantrieb und Heizstab verbrauchen, ist dieser Wert bei den Erdreich-Anlagen mit knapp 8 % etwas geringer. Dieser Unterschied ist auf die geringeren zusätzlichen Energieverbräuche des Heizstabes (0,3 % zu 0,9 %) und des Wärmequellenantriebes (4,9 % zu 6,1 %) zurückzuführen. Letzteres führt dazu, dass der Energieverbrauch der Steuerung etwa den halben Wert des Energieverbrauchs der Solepumpe erreicht. Bei fünf Anlagen (**IDs 104, 315, 288, 121, 194**) übersteigt der Energieverbrauch der Steuerung jenen der Solepumpe.

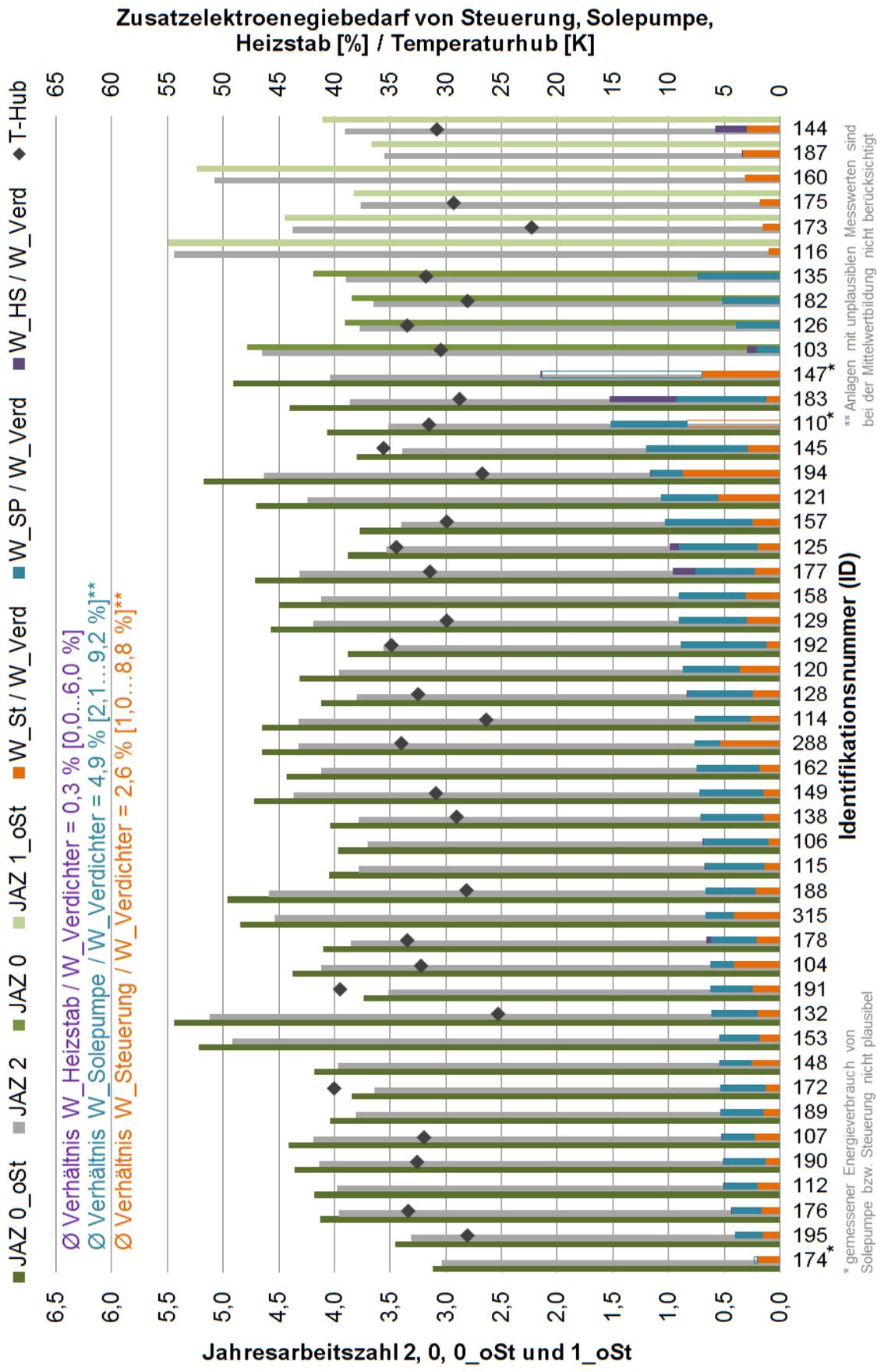


Abb. 51: Zusammenfassung der Ergebnisse für die 47 Erdreich-Wärmepumpen mittels Darstellung der quantifizierbaren Effizienzeinflüsse auf die Jahresarbeitszahl mit der Bilanzgrenze 2 sowie der im Mittel zu überwindenden Temperaturhübe

5.4.3 Wärmequelle Grundwasser

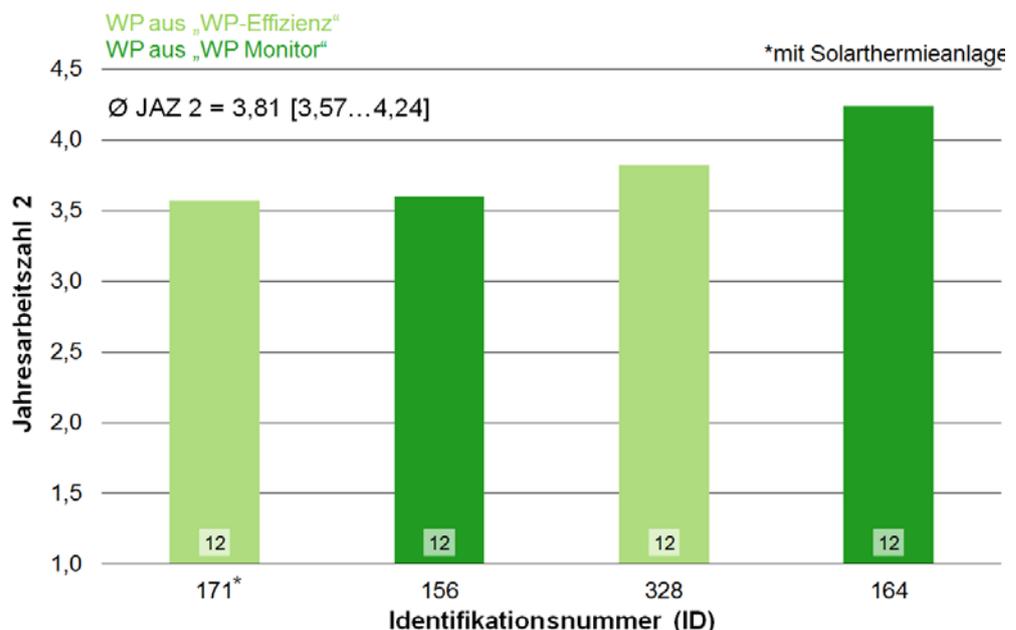
Innerhalb des Monitoring Programms wurden fünf Wärmepumpen mit der Wärmequelle Grundwasser messtechnisch untersucht. Eine Anlage (**ID 152**) kann in Folge von Problemen mit der Messtechnik im Rahmen dieses Berichtes nicht ausgewertet werden. Für die verbleibenden vier Anlagen erfolgt die Auswertung äquivalent zu jener der Luft- bzw. Erdreich-Wärmepumpen. Der Vollständigkeit halber werden demnach auch die jeweiligen Mittelwerte genannt. Diese müssen jedoch immer mit Blick auf die geringe Anlagenzahl betrachtet werden. Grundlegende Aussagen zur realen Performance von Grundwasser-Wärmepumpen im Feld erlaubt diese Auswertung nicht.

5.4.3.1 Jahresarbeitszahl 2, Anlagencharakterisierung und Betriebsbedingungen

Jahresarbeitszahlen und Anlagencharakteristik: einzelne Anlagen

Die Abb. 46 zeigt die Jahresarbeitszahlen der vier untersuchten Grundwasser-Wärmepumpen. Zwei dieser Anlagen wurden bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ messtechnisch untersucht. In der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013 erzielten die Anlagen Ergebnisse zwischen 3,57 und 4,24. Damit erreicht nur eine Anlage (**ID 164**) eine JAZ oberhalb des Durchschnittswertes aller Erdreich-Wärmepumpen in Höhe von 4,04. Äquivalent zu den entsprechenden Darstellungen für Luft- und Erdreich-Wärmepumpen werden etwaige Besonderheiten der Anlagen auf den Säulen dokumentiert. An dieser Stelle ist nur die Anlage **ID 171** erwähnenswert, die zusätzlich über eine Solarthermieanlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung verfügt.

Abb. 52: Jahresarbeitszahlen der untersuchten Wasser-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013, wobei JAZ der Anlagen aus dem „WP-Effizienz“ Projekt unterschieden und charakteristische Eigenschaften aufgetragen werden



Jahresarbeitszahlen und Betriebsbedingungen: Mittelwerte

In der Abb. 53 werden die Mittelwerte der Betriebsbedingungen sowie der Jahresarbeitszahlen der vier untersuchten Grundwasser-Wärmepumpen dargestellt. Das Diagramm dient gleichzeitig als Legende für jenes in Abb. 54. Die

mittlere Jahresarbeitszahl 2 liegt bei 3,81. Verglichen mit den Erdreich- und den Luft-Wärmepumpen haben die Wasser-Anlagen bessere Voraussetzungen auf Seiten der Wärmequelle. Die zwei dahingehend auswertbaren Anlagen kommen auf mittlere Quellentemperaturen von 10,6 °C (Erdreich: 4,2 °C; Luft: 3,2 °C). Demgegenüber haben die Wasser-Anlagen Nachteile hinsichtlich höherer Temperaturen auf der Senkenseite. So liegt die mittlere Temperatur zur Raumheizung bei 36,0 °C und jene zur Trinkwassererwärmung bei 49,7 °C. Der Anteil der bereitgestellten thermischen Energie für die Trinkwassererwärmung ist mit 14 % im Mittel geringer als bei Luft- und Erdreich-Anlagen. Dies ist vor allem auf die Wärmepumpe **ID 171** zurückzuführen, deren Trinkwasser über die Solaranlage und ggf. entsprechender Durchmischung im Kombispeicher bereitgestellt wird. Die Verteilung der Heizenergie auf einzelne Zeitperioden nimmt fast exakt die identischen Werte wie bei den Erdreich- bzw. Luft-Wärmepumpen an.

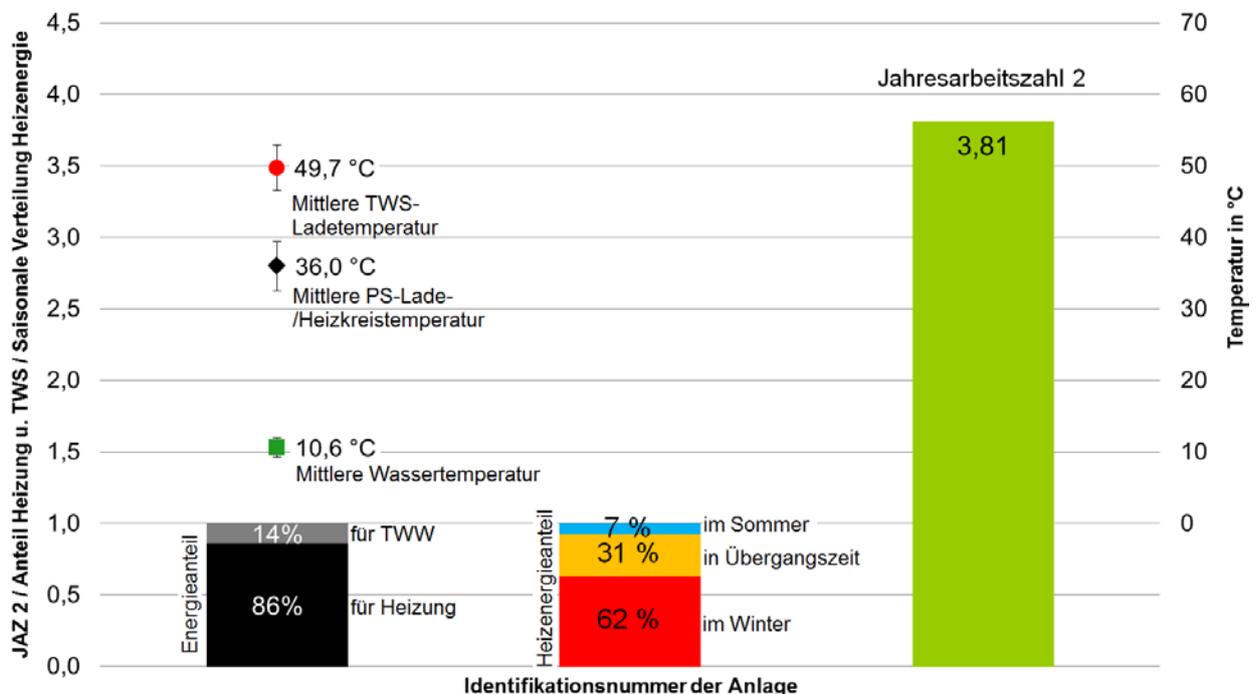


Abb. 53: Legende zur Abb. 54 sowie Mittelwerte der Jahresarbeitszahlen sowie der Betriebsbedingungen von Wasser-Anlagen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 (Bandbreiten entsprechen der Spreizungen)

Jahresarbeitszahlen und Betriebsbedingungen: einzelne Anlagen

In der Abb. 54 werden die Jahresarbeitszahl 2 sowie die Betriebsbedingungen der einzelnen Anlagen dargestellt. Fehlende Größen in Form von mittleren Temperaturen sind bei den Anlagen **ID 156** und **ID 328** auszumachen. Hier fand keine messtechnische Untersuchung der Wärmequellen statt. Die beiden erfassten mittleren Wärmequellentemperaturen lagen bei 11,2 °C (**ID 171**, Spreizung 2,4 K) bzw. 10,0 °C (**ID 164**, Spreizung 3,1 K). Wie bereits erwähnt, wurde von erstgenannter Wärmepumpe kein Trinkwasser erwärmt (Solarthermie und Kombispeicher). Da diese Wärmepumpe dennoch die geringste Jahresarbeitszahl 2 erzielt, ist u.a. auf die hohe mittlere Heizkreistem-

peratur von 42,6 °C zurückzuführen. Die entsprechenden Werte der übrigen drei Anlagen bewegen sich zwischen 32,2 °C (**ID 164**) und 35,8 °C (**ID 328**). Zusammen mit einer mittleren Trinkwasserspeicherladetemperatur von 47,3 °C hat die Wärmepumpe **ID 164** die im Mittel geringsten Senkentemperaturen, was sich auch in der höchsten Jahresarbeitszahl 2 4,24 widerspiegelt. Die Energieanteile der Trinkwasserwärmemenge der Anlagen ohne Solaranlage liegen zwischen 18 % (**ID 328**) und 20 % (**ID 164**).

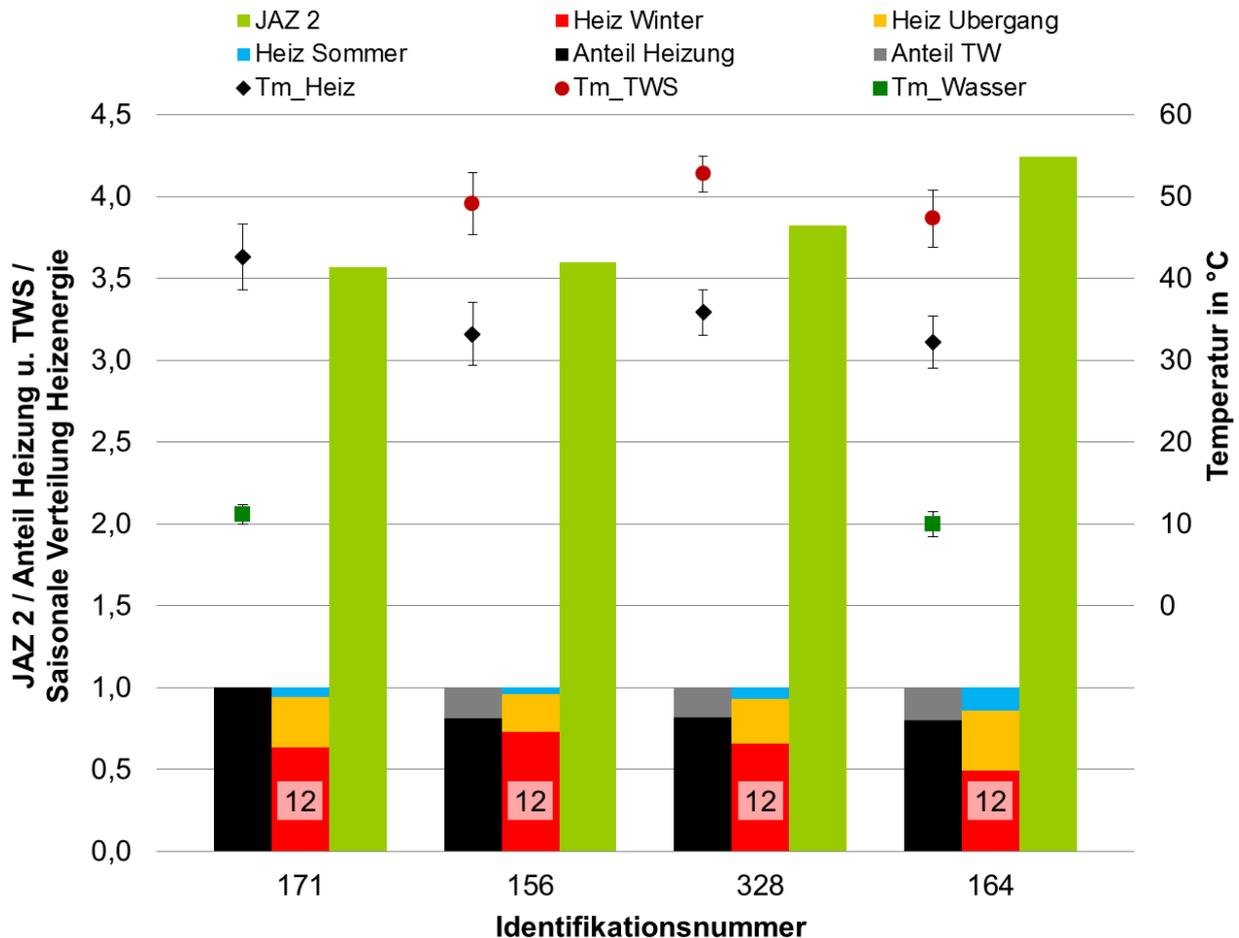


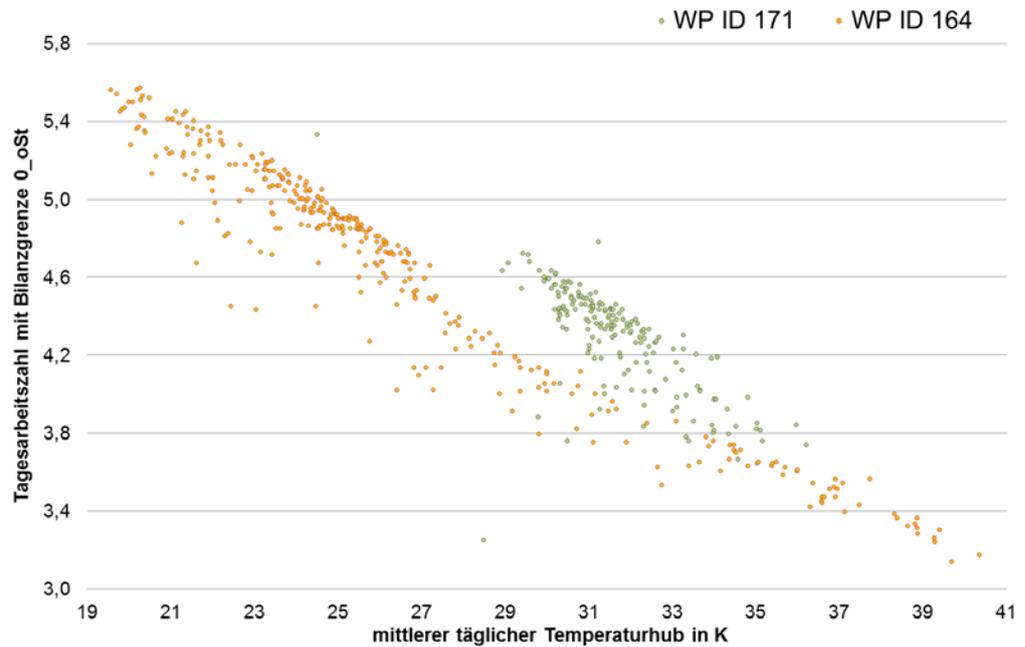
Abb. 54: Jahresarbeitszahl der Grundwasser-Wärmepumpen in der Auswertungsperiode Juli 2012 bis Juni 2013 und die entsprechenden Betriebsbedingungen.

5.4.3.2 Effizienz und Temperaturhub

Die Wärmequelle Grundwasser bietet über ein komplettes Jahr vergleichsweise konstante Temperaturen. Für die beiden dahingehend auswertbaren Grundwasser-Wärmepumpen lag die mittlere Quelltemperatur im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 zwischen 10,2 und 12,6 °C (**ID 164**) bzw. 9,8 und 11,9 °C (**ID 171**). Der mittlere tägliche Temperaturhub wird somit fast ausschließlich durch die Temperaturen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung beeinflusst. Die Abb. 55 zeigt für die genannten Wärmepumpen die täglichen Arbeitszahlen mit der Bilanzgrenze 0 abzüglich des Energieverbrauchs

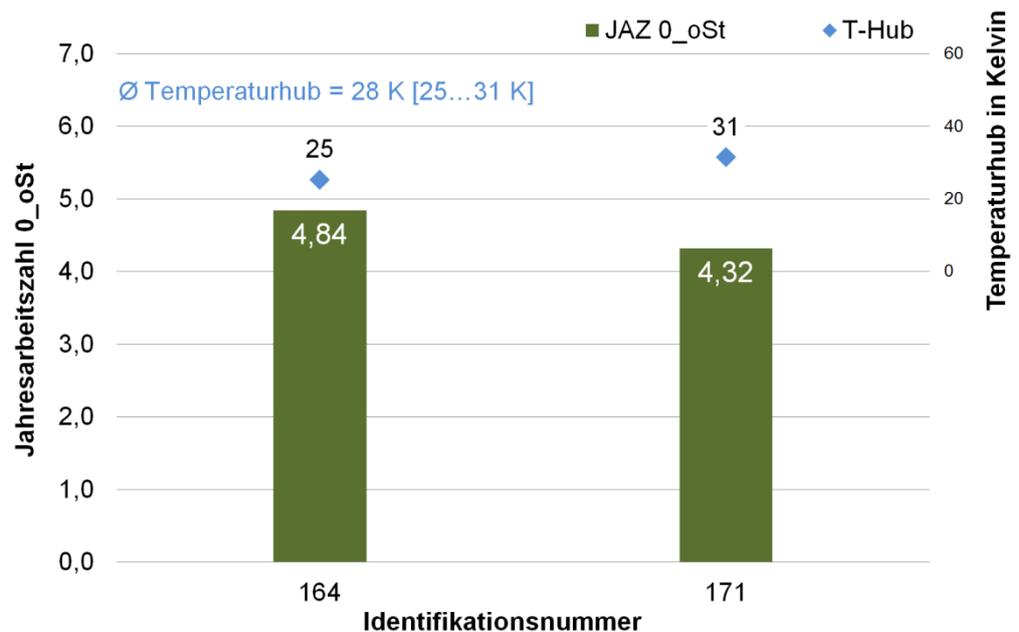
ches der Steuerung über die mittleren täglichen Temperaturhübe. Die Abb. 56 gibt für beide Wärmepumpen die entsprechenden Jahreswerte wieder.

Abb. 55: Tagesarbeitszahlen mit Bilanzgrenze 0_oSt über mittleren täglichen Temperaturhub zweier Grundwasser-Wärmepumpen



Die Wärmepumpe **ID 171** arbeitet ausschließlich im Heizmodus und der kleine Temperaturhubbereich spiegelt im wesentlichen die Heizkurve wider. Aufgrund der vergleichsweise hohen Heizkreistemperaturen beträgt der mittlere Temperaturhub im kompletten Jahr 31 K. Die Anlage **ID 164** arbeitet aufgrund der zusätzlichen Trinkwassererwärmung bei sehr unterschiedlichen Temperaturhuben. Aufgrund der wesentlich geringeren Temperatur zur Raumheizung hat diese Anlage im Jahresmittel einen um 6 K geringeren Temperaturhub zu überwinden als die Wärmepumpen **ID 171**, was sich auch in einer höheren JAZ widerspiegelt.

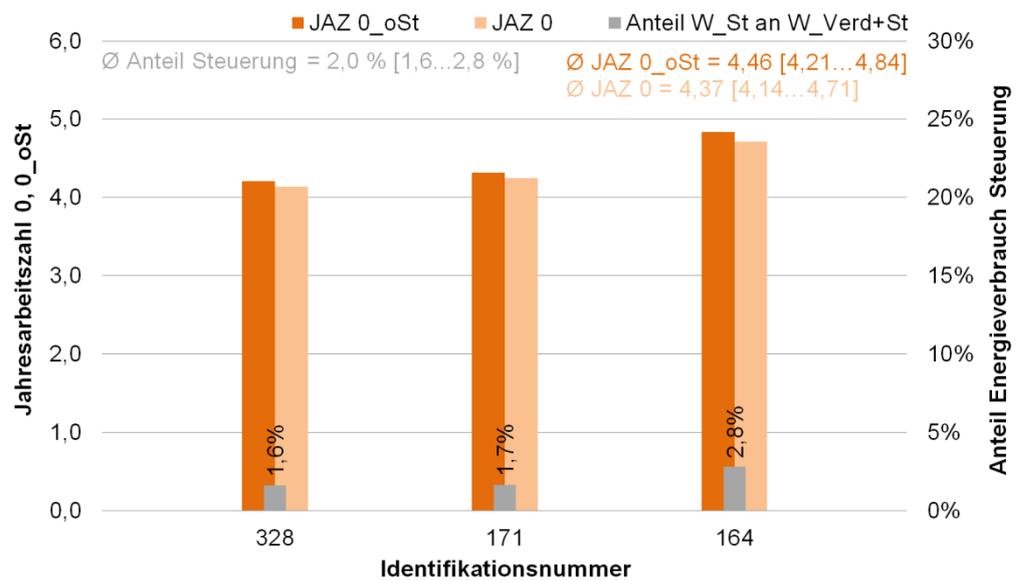
Abb. 56: Für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 werden für zwei Grundwasser-Wärmepumpen die mittleren Temperaturhübe sowie die JAZ 0_oSt dargestellt



5.4.3.3 Einfluss der Steuerung

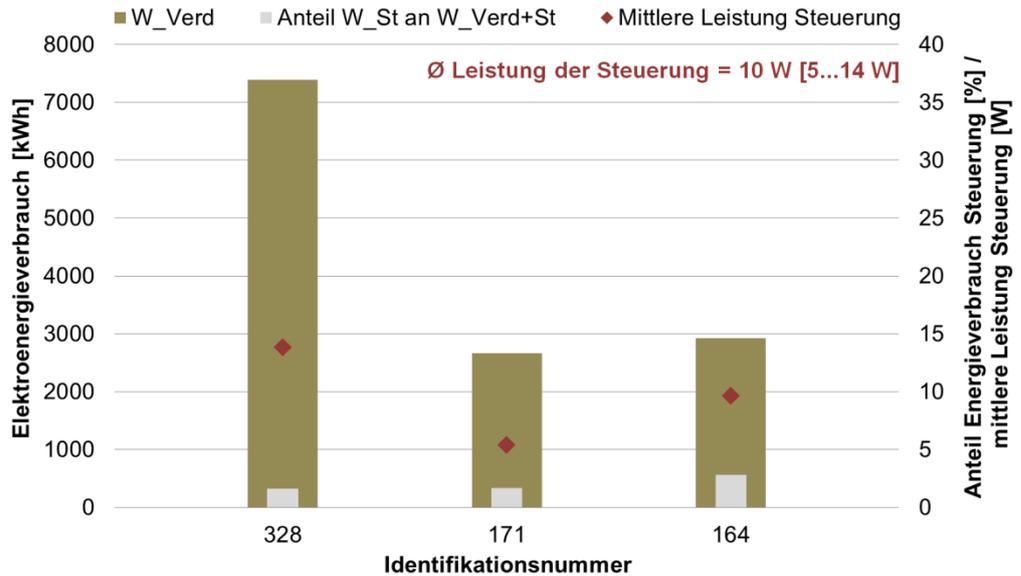
Für drei der vier Grundwasser-Wärmepumpen konnte der Energieverbrauch der Steuerung separat erfasst werden. Um den Einfluss auf die Effizienz festzustellen wird im Diagramm in Abb. 57 die Jahresarbeitszahl O der Jahresarbeitszahl O ohne den Energieverbrauch der Steuerung (O_{oSt}) gegenübergestellt. Der anteilige Elektroenergieverbrauch der Steuerung wird mit den grauen Säulen wiedergegeben. Dieser liegt zwischen 1,6 % (**ID 328**) und 2,8 % (**ID 164**). Dies führt für erstgenannte Anlage zu einer Jahresarbeitszahl-Minderung von 4,21 auf 4,14 und für letztgenannte von 4,84 auf 4,71.

Abb. 57: Darstellung des Effizienzeinflusses der Steuerung in Form des anteiligen Energieverbrauchs sowie der Arbeitszahldifferenzen für die Bilanzgrenzen O_{oSt} und O für drei Grundwasser-Wärmepumpen



Die konkreten elektrischen Leistungsaufnahmen werden in der Abb. 58 in Form von roten Rauten dargestellt. Die Minmale mittlere Leistung beträgt, wie bei den Erdreich- und Luft-Wärmepumpen auch, 5 W (**ID 171**). Das Maximum mit 14 W wurde bei der Wärmepumpen **ID 328** gemessen. Dieser hohe Wert trägt dazu bei, dass trotz vergleichsweise hohem Gesamtelektroenergieverbrauch, der Anteil für die Steuerung auf gleichem Niveau wie bei der Anlage **ID 171** liegt.

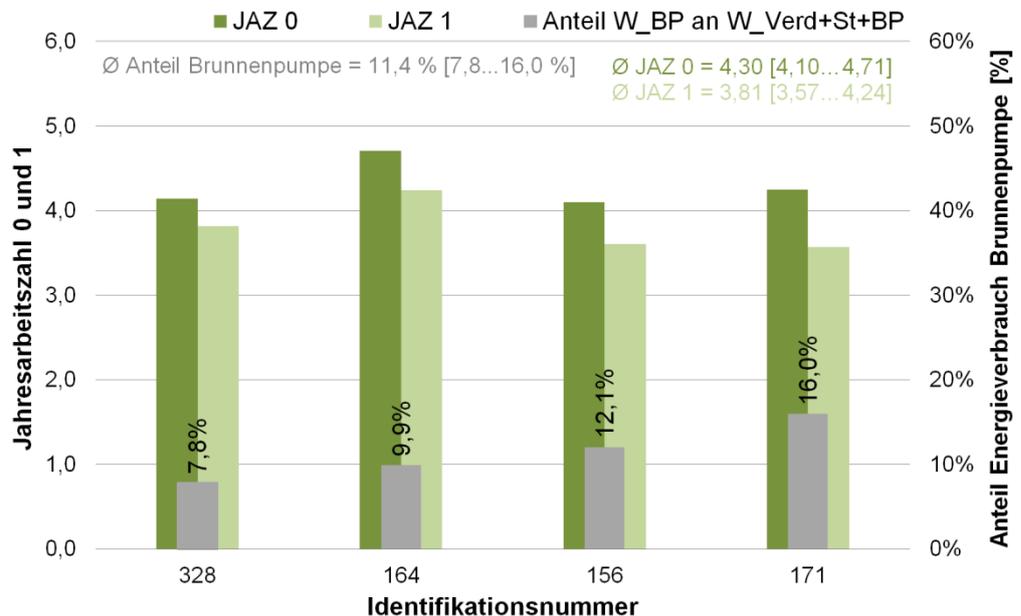
Abb. 58: Gesamtelektroenergieverbrauch und Anteil sowie Leistung der Steuerung für drei auswertbare Grundwasser-Wärmepumpen



5.4.3.4 Einfluss Wärmequellenantrieb

Verglichen mit den Ergebnissen der Luft- (5,7 %) und Erdreich-Wärmepumpen (4,5 %) ist bei Grundwasser-Wärmepumpen die höchste Effizienz-minderung durch den Antrieb in der Wärmequelle zu verzeichnen. Die Anteile der Elektroenergieverbräuche der Brunnenpumpen am jeweiligen Gesamtverbrauch für Verdichter, Steuerung und Brunnenpumpe reichen von 7,8 % (ID 328) bis 16,0 % (ID 171). Zum Vergleich: der maximale Wert bei den Solepumpen beträgt 8,2 %. Der Durchschnitt für die vier Wärmepumpen liegt bei 11,4 %. Entsprechend den Energieanteilen der Brunnenpumpen werden die Jahresarbeitszahl 0 der ID 328 von 4,14 auf 3,82 und jene der ID 171 von 4,25 auf 3,57 gemindert.

Abb. 59: Gesamtelektroenergieverbrauch und Anteil sowie Leistung der Steuerung für drei auswertbare Grundwasser-Wärmepumpen



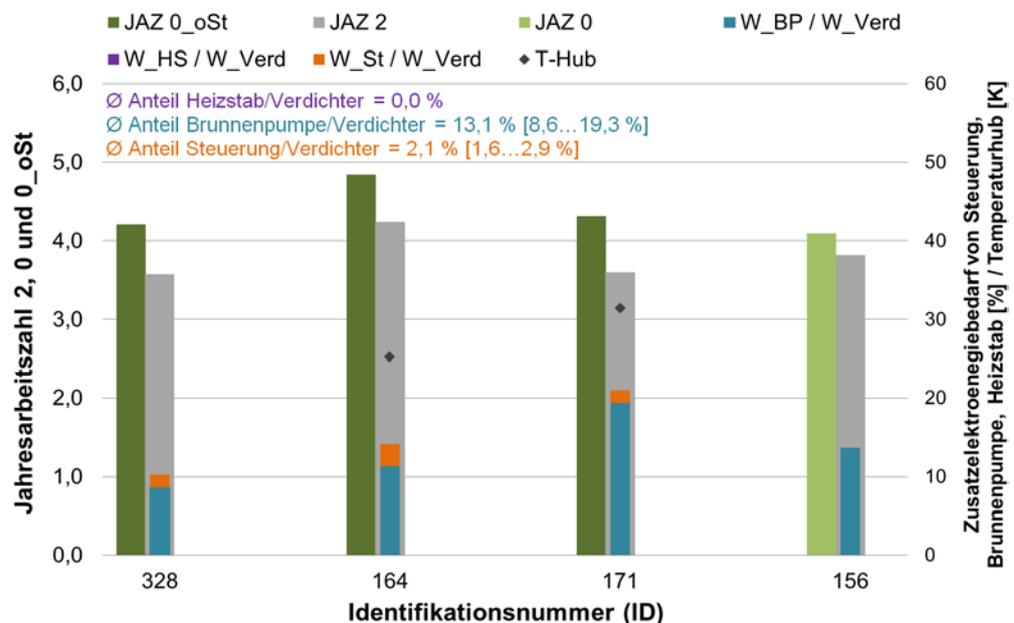
5.4.3.5 Einfluss Heizstab

Bei keiner der vier Wasser-Wärmepumpen wurde Heizstabarbeit gemessen. Daher entsprechen die im vorherigen Kapitel in der Abb. 59 vorgestellten Jahresarbeitszahl 1 auch jeweils der Jahresarbeitszahl 2.

5.4.3.6 Zusammenstellung der Effizienz und ihrer quantifizierbaren Einflussparameter

Wie auch für die Luft- bzw. Erdreich-Wärmepumpen werden die quantifizierbaren Einflussparameter auf der Jahresarbeitszahl 2 bei den Grundwasser-Wärmepumpen nachfolgend anhand der Abb. 60 vorgestellt. Da bei der Wärmepumpe **ID 156** der Energieverbrauch der Steuerung nicht separat erfasst wurde, wird der Jahresarbeitszahl 2 (graue Säule) die Jahresarbeitszahl 0 (hellgrüne Säule) gegenübergestellt. Bei den übrigen Anlagen werden Jahresarbeitszahl 2 und Jahresarbeitszahl 0_oSt (dunkelgrüne Säule) verglichen. Dementsprechend kann für diese drei Anlagen der Einfluss von Steuerung (orange), Brunnenpumpe (blau) und Heizstab (lila) dargestellt werden, wobei letztgenannter bei den untersuchten Wärmepumpen nicht zum Einsatz kam. Entgegen dem Vorgehen in den vorherigen Kapiteln werden hier die Energieverbräuche der Einzelkomponenten im Verhältnis zum Energieverbrauch des Verdichters dargestellt. Die Summe dieser Anteile ist gleichzeitig die Sortiergröße der drei Anlagen mit Jahresarbeitszahl 0_oSt. Die geringste relative Minderung der Jahresarbeitszahl 0_oSt, mit einem zusätzlichen Energieverbrauch zum Verdichter von 10,2 %, ist die Anlage **ID 156**. Der größte zusätzliche Energieverbrauch wird mit 21,0 % für die Wärmepumpe **ID 171** ermittelt.

Abb. 60: Zusammenfassung der Ergebnisse für vier Grundwasser-Wärmepumpen mittels Darstellung der quantifizierbaren Effizienzeinflüsse auf die Jahresarbeitszahl 2 sowie der im Mittel zu überwindenden Temperaturhübe



5.5 Betriebszeiten und Takthäufigkeit

Die Betriebszeit einer Wärmepumpe ist im Wesentlichen von ihrer Dimensionierung, der Betriebsart, dem Speicherkonzept, der Regelungseinstellungen sowie den äußeren Bedingungen im Betrachtungszeitraum abhängig. Hinsichtlich der Dimensionierung ist zu beachten, dass bei Luft-Wärmepumpen mit steigender Außenlufttemperatur eine wesentlich höhere Divergenz zwischen

Heizleistung und Heizlast des Gebäudes als bei Erdreich- oder Wasser-Wärmepumpen auftritt. Die Thematik der Takthäufigkeit ist vergleichsweise komplex. Ausgangspunkt ist auch hierbei der Unterschied zwischen aktueller Heizleistung der Wärmepumpe und Heizlast des Gebäudes und somit auch von Auslegung und gewählter Betriebsart. Anlagen mit einer Leistungsregelung sind hierbei, hinsichtlich des tatsächlich regelbaren Bereichs, kaum betroffen. Vor allem bei Luft-Wärmepumpen werden Pufferspeicher eingesetzt, um durch Volumenvergrößerung häufigem Takten entgegenzuwirken. Einstellungen wie Mindestlaufzeiten oder Hysteresen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Anschalthäufigkeit. Für Unterbrechungen sorgen bspw. Abtaubetriebe oder auch Sperrzeiten der Energieversorgungsunternehmen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse, getrennt nach den Wärmequelle Außenluft und Erdreich, für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 vorgestellt. Bei der Auswertung zu den Anschalthäufigkeiten müssen die Filterregeln berücksichtigt werden. Deren Ermittlung erfolgt getrennt nach den Betriebsmodi Heizen und Trinkwassererwärmung. Ein Takt wird für den Zeitraum gezählt, in dem der Verdichter ununterbrochen in Betrieb ist und dieser Betrieb einen Betriebsmodus zugeordnet werden kann. Diese Zuordnung erfolgt über zweifelsfrei detektierbare Zustände in den thermischen Kreisen. Wechselt der Modus, ohne dass der Verdichter abschaltet, wird dennoch jedem Betriebsmodus ein Takt angerechnet. Wird der Verdichterbetrieb während eines Modus unterbrochen, bspw. bei direktelektrischer Abtauung, werden dem Modus zwei Takte angerechnet. Wird der Verdichter im Abtaubetrieb nicht unterbrochen, wie es bei Kreislaufumkehr oder Heißgasabtauung der Fall ist, wird dem Modus nur ein Takt angerechnet. Die Auswertung fokussiert somit nicht die Anschalthäufigkeit des Verdichters. Dieser könnte prinzipiell einen kompletten Tag in Betrieb sein, wodurch kein Takt gezählt würde. Aber durch mehrmaligen Wechsel in den Trinkwassermodus wird die entsprechende Anzahl an Takten gefiltert.

Um vergleichbare und fundierte Ergebnisse zu erzielen, mussten auch bei dieser Auswertung Einschnitte in die Datenbasis vorgenommen werden. Einerseits wurden keine Anlagen mit größeren Datenlücken berücksichtigt. Die Auswahl erfolgte nach den gleichen Kriterien, wie sie im Kapitel 4.8 hinsichtlich der Ermittlung des Heizwärmeverbrauches angesetzt wurden. Das Kriterium besteht im Vorhandensein von Messdaten für mindestens 95% aller Tage in den Monaten mit einer signifikant hohen Anzahl an Heiztagen (257 der 262 Heiztage von September 2012 bis Juni 2013). Weitere Einschnitte in die Datenbasis sind auf die eingesetzte Messtechnik oder die Wärmepumpe an sich zurückzuführen. Letzteres betrifft den Umstand, dass nur Wärmepumpen berücksichtigt werden, die sowohl zum Heizen als auch zur Trinkwassererwärmung eingesetzt werden. Systeme mit zusätzlicher Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung wurden somit bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

Eine durchschnittliche Laufzeit der Wärmepumpenanlagen wird in der Literatur (zum Beispiel [Eslami-Nejad et al. 2014] und [BBR 2011]) abhängig von der Wärmequelle im Bereich 1700 bis 2400 Stunden pro Jahr angegeben. Ähnliche Werte sind in der EU-Guidline für die Berechnung der SPF Werte zu finden [EC 2013/114/EU].

5.5.1 Wärmequelle Außenluft

Auf der linken Seite der Abb. 61 werden die gefilterten Betriebstakte für die Trinkwassererwärmung (blau) und den Heizbetrieb (rot) sowie auf der rechten Seite die Verdichterlaufzeiten von 22 Luft-Wärmepumpen dargestellt. Zur einfacheren Interpretation werden die Betriebstakte nicht als Jahressummen sondern als Tagesmittelwerte angegeben. Vor allem hinsichtlich der Anfahrvorgänge im Heizmodus ist zu beachten, dass hierbei ein komplettes Jahr (365 Tage) angesetzt wurde.

Die Laufzeit der Anlagen beträgt im Schnitt 2242 h, wobei die Bandbreite mit Werten zwischen 1298 h (**ID 193**) und 4629 h (**ID 123**) sehr groß ist. Letztgenannter Wert hebt sich besonders von den übrigen ab und kann u.a. auf den Einsatz des leistungsgeregelten Verdichters zurückgeführt werden. Noch größere Unterschiede zeigen sich bei den Ergebnissen der Taktfilterung. Unter Berücksichtigung beider Betriebsmodi wurden durchschnittlich 13 Takte gezählt, wobei sich die Einzelwerte zwischen 4 (**ID 295**) und 29 (**ID 102**) bewegen. Bemerkenswert sind auch die unterschiedlichen Aufteilungen zwischen Trinkwassererwärmung und Heizbetrieb. Während im Schnitt vier Takte für ersteren und neun Takte für letzteren gefiltert wurden, zeigen sich bei den einzelnen Anlagen teilweise sehr unterschiedliche Relationen. Hervorzuheben sind hierbei vor allem die Anlagen **ID 159** sowie **ID 169**. Wie die Abb. 32 auf Seite 59 zeigt, bereiten diese beiden Anlagen überdurchschnittlich viel Trinkwarmwasser. Weiterhin könnten gering eingestellte Hysteresen zu diesem hohen Anteil an Anfahrvorgängen im Trinkwassermodus beigetragen haben. Das umgekehrte Verhältnis lässt sich auch für Anlage **ID 167** feststellen. Die relativ kleine Anzahl an Takten im Trinkwassermodus ist ebenfalls überwiegend auf die Energieanteile, dargestellt in der Abb. 32, zurückzuführen.

Um die zu Beginn angestellten Überlegungen bezüglich der Zusammenhänge zwischen Verdichterlaufzeit, Takthäufigkeit und Speicherkonzept zu prüfen, werden die entsprechenden Informationen in der Abb. 62 zusammengefasst. Es handelt sich um die bereits vorgestellten Ergebnisse der 22 auswertbaren Luft-Wärmepumpen. Diese werden nebeneinander und sortiert nach dem angewandten Speicherkonzept dargestellt. Innerhalb der Gruppen werden die Ergebnisse aufsteigend nach der Gesamtzahl der Takte sortiert gezeigt. Relativ deutlich ist erkennbar, dass kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Verdichterlaufzeit und Anzahl der Takte besteht. Im Vergleich der Gruppen untereinander muss die geringe Anlagenanzahl berücksichtigt werden, die nur begrenzte Aussagen zulassen. Bei den dargestellten Ergebnissen wurden die durchschnittlich wenigsten Takte bei Anlagen ohne Pufferspeicher ermittelt, gefolgt von Anlagen mit in Reihe installierten Pufferspeichern. Bei beiden Speicherkonzepten sind Wärmepumpe und Heizkreis nicht durch einen Pufferspeicher hydraulisch entkoppelt. Der in Reihe platzierte Pufferspeicher erhöht einzig das Volumen im Heizkreis. Eine hydraulische Entkopplung wird beim parallel installierten Pufferspeicher und dem Kombispeicher gewährleistet. Die diesen beiden Gruppen zuzuordnenden Anlagen erreichen im Mittel etwa die doppelten Taktzahlen.

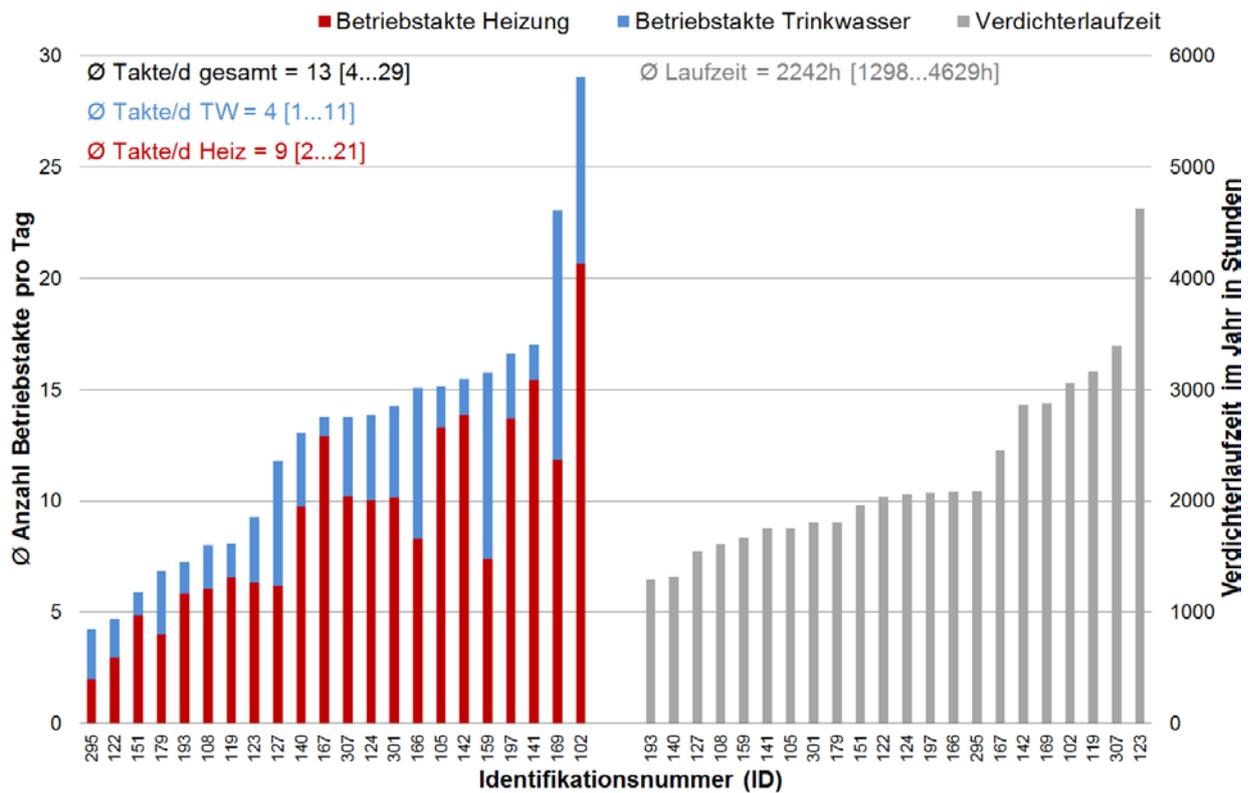


Abb. 61: Durchschnittliche Betriebsstake pro Tag für Heizbetrieb und Trinkwassererwärmung sowie Jahresverdichterlaufzeit im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für 22 dahingehend auswertbare Luft-Wärmepumpen

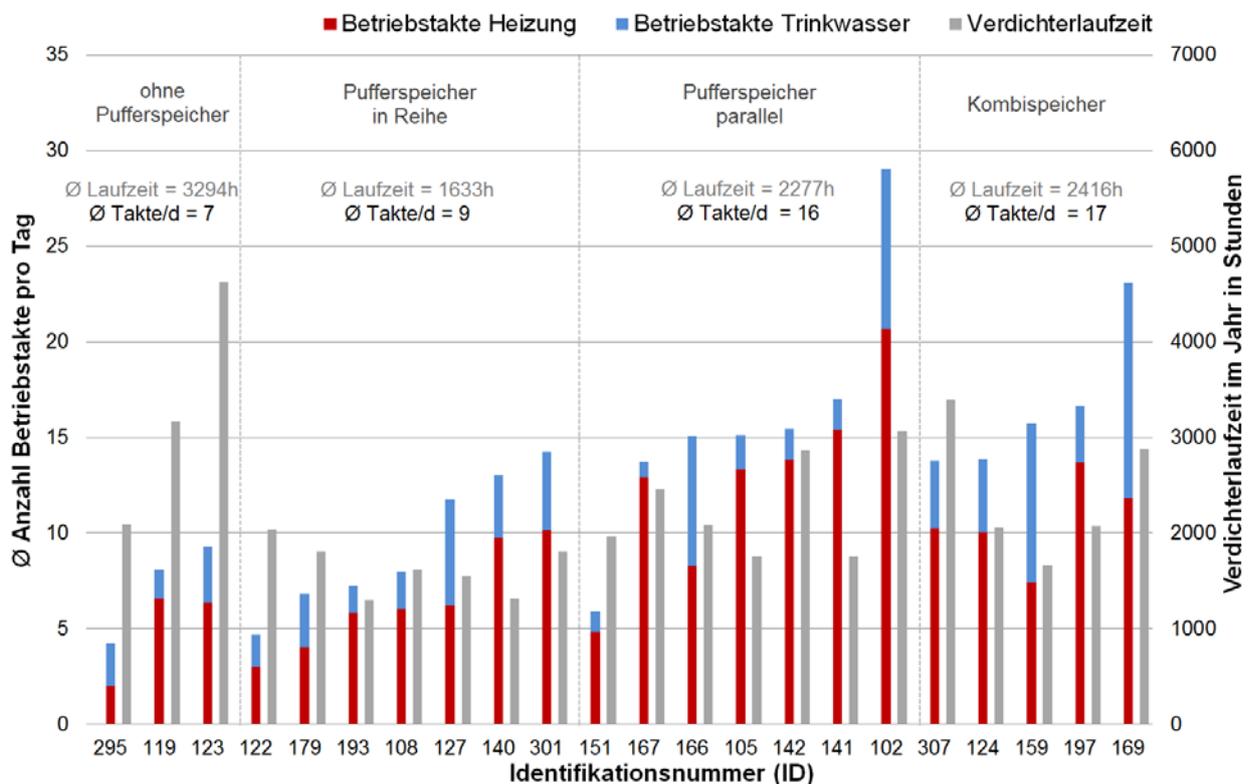


Abb. 62: Gegenüberstellung von Anzahl Betriebsstake und Verdichterlaufzeiten unter Berücksichtigung der Speicherkonzepte im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für 22 dahingehend auswertbare Luft-Wärmepumpen

5.5.2 Wärmequelle Erdreich

Die Auswertung zur Verdichterlaufzeit und den Betriebstakten erfolgt für die Erdreich-Wärmepumpen mit den äquivalenten Darstellungen wie für die Luft-Wärmepumpen. Die Verdichterlaufzeit ist bei den Erdreich-Wärmepumpen mit durchschnittlich 2002 h geringer als bei den Luft-Wärmepumpen. Gleichzeitig ist der untere Extremwert mit nur 795 h (**ID 121**) wesentlich geringer. Diese Anlage wurde für den Heizwärmebedarf (geringster Heizenergieverbrauch aller Objekte im Betrachtungszeitraum von 29 kWh/m²; vgl. Kapitel 4.8 auf Seite 36) zu groß dimensioniert. Bestätigt wird diese Annahme durch die mit 18 vergleichsweise hohe Anzahl an Betriebstakten. Die beiden Erdreich-Wärmepumpen mit leistungsgeregelten Verdichtern liegen mit Werten von 3599 h (**ID 116**) und 2671 h (**ID 160**) im oberen Bereich der Ergebnisse. Gleichzeitig finden sich beide Anlagen im unteren Bereich der Taktzahlauswertung wieder. Im Durchschnitt wurde für die Erdreich-Anlagen eine Anschalthäufigkeit von 11, bei Werten zwischen 3 und 26, ermittelt. Die Bandbreite bewegt sich im ähnlichen Bereich wie jene der Luft-Anlagen. Beide Mittelwerte würden im Vergleich die jeweils wärmequellenspezifischen theoretischen Zusammenhänge zur Takthäufigkeit bestätigen. Hinsichtlich der Verteilung der Takte zwischen den Betriebsmodi kann festgestellt werden, dass für Erdreich-Wärmepumpen trotz anteilig geringerer mittlerer Trinkwasserwärmemenge (Erdreich: 18 % / Luft 20 %) der durchschnittliche Anteil der Betriebstakte im Trinkwassermodus größer ist (34 % / 29 %). Bei den Luft-Wärmepumpen könnten kürzere Heizbetriebsphasen u.a. auf die quellentemperaturabhängige Heizleistung zurückzuführen sein. Abtauvorgänge kommen nicht in Frage, da die Wärmepumpen im Projekt fast ausschließlich mit Heißgas oder mittels Kältekreisumkehr abtauen, wobei der Verdichter jeweils in Betrieb bleibt (kein zusätzlicher Anfahrvorgang). Ein Extrembeispiel für vergleichsweise häufiges Anfahren im Trinkwassermodus (17/d) bei den Erdreich-Anlagen ist die **ID 192**. Bei dieser Anlage ist der Anteil der Trinkwasserwärmemenge mit 37 % relativ hoch.

Hinsichtlich der nach Speicherkonzept sortierten Größen ergeben sich teilweise andere Ergebnisse als bei den Luft-Wärmepumpen (Abb. 64). Identisch ist der fehlende Zusammenhang zwischen Verdichterlaufzeit und Anzahl der Betriebstakte. Anders verhält es sich bei der Zuordnung von Betriebstakten zu Speicherkonzepten. Bei den Luft-Wärmepumpen hatten die Optionen mit hydraulischer Trennung von Wärmepumpe und Heizkreis (parallel installierter Pufferspeicher und Kombispeicher) deutlich mehr Betriebstakte als die Optionen ohne. Bei den Erdreich-Wärmepumpen liegen die Ergebnisse für Systeme ohne Pufferspeicher und mit Kombispeicher auf ähnlichem und vergleichsweise geringem Niveau, während die Taktzahlen der Wärmepumpen mit Pufferspeicher (in Reihe und parallel) auf ähnlichen, jedoch höherem, Niveau liegen. An dieser Stelle sei jedoch wieder auf die geringe Anlagenzahl hingewiesen, die es nicht zulässt, allgemeingültige Schlüsse zu ziehen. Dies betrifft vor allem die Gruppe der Anlagen mit in Reihe geschaltetem Pufferspeicher. Weiterhin ist speziell bei den Systemen mit Kombispeichern zu berücksichtigen, dass fünf der neun Anlagen über eine Solaranlage verfügen. Entsprechend des jeweiligen solaren Eintrages werden Wärmepumpenbetriebszeit und Betriebstakte substituiert. Auf Basis dieser Ergebnisse scheint der Einsatz von Speichern sowohl bei den Luft- als auch bei den Erdreich-Wärmepumpen zu häufigerem Anfahren zu führen.

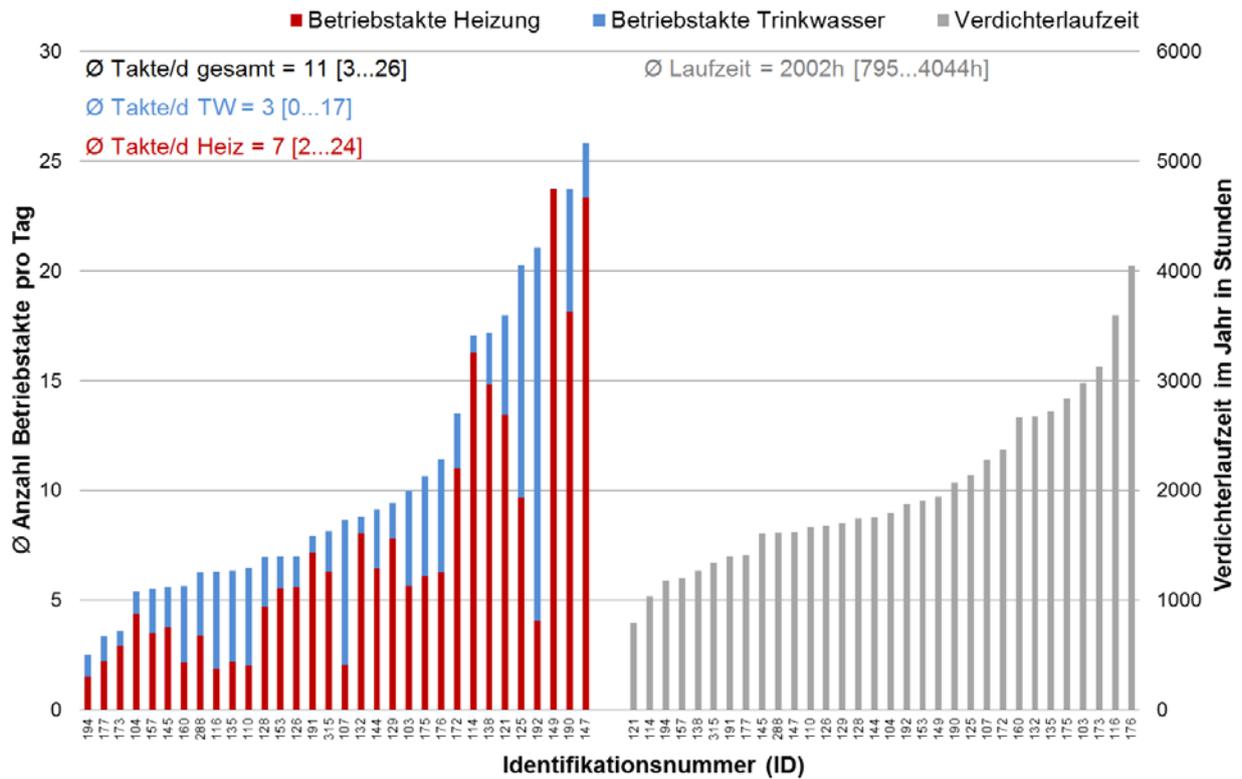


Abb. 63: Betriebsstake für Heizbetrieb und Trinkwassererwärmung sowie Verdichterlaufzeit im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für 32 dahingehend auswertbare Erdreich-Wärmepumpen

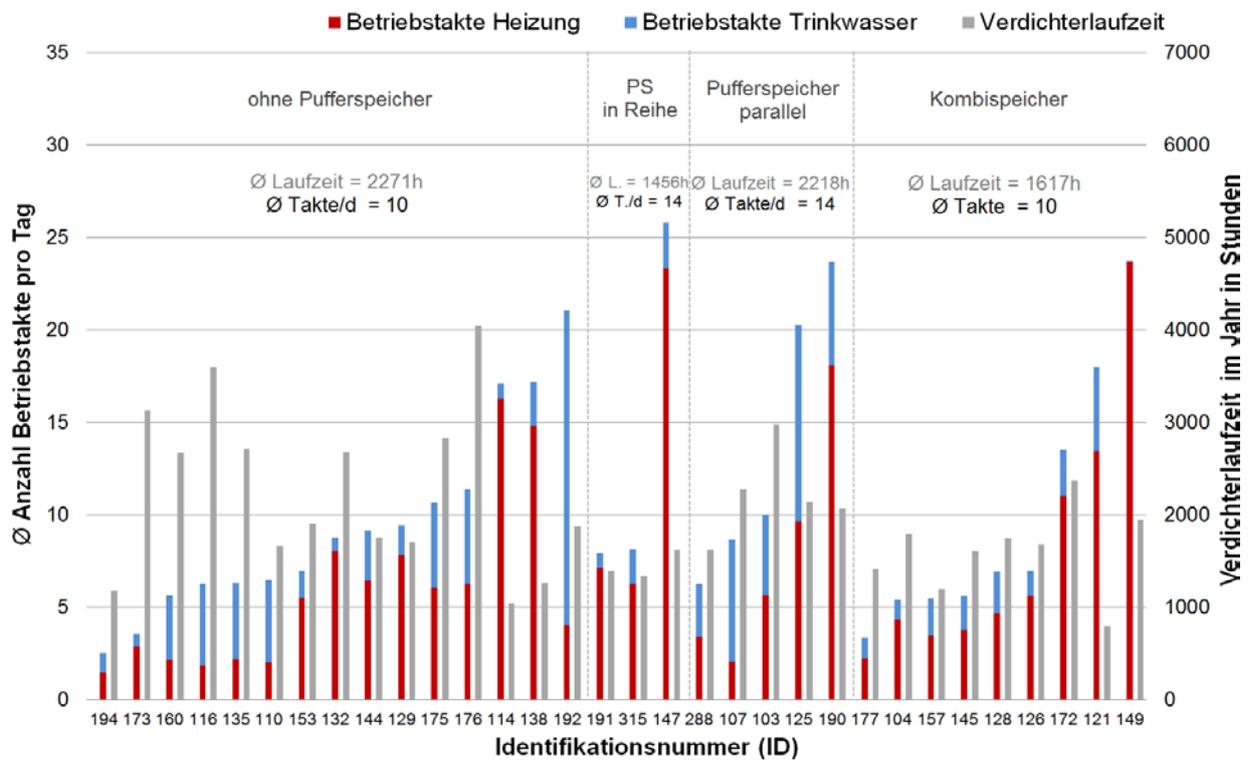


Abb. 64: Gegenüberstellung von Anzahl Betriebsstake und Verdichterlaufzeiten unter Berücksichtigung der Speicherkonzepte im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für 32 dahingehend auswertbare Erdreich-Wärmepumpen

5.6 Systemarbeitszahlen Wärmepumpe und Solar

Von den 87 untersuchten Wärmepumpen verfügen 14 über eine solarthermische Anlage, wobei sechs davon nur zur Trinkwassererwärmung eingesetzt werden und die übrigen acht Anlagen zusätzlich der Heizungsunterstützung dienen. Bei den bislang vorgestellten Arbeitszahlen wurden die Solaranlagen nicht berücksichtigt. Dennoch sind diese Ergebnisse vom Einsatz der Solaranlage in unterschiedlicher Ausprägung beeinflusst, u.a. je nachdem welche Wärmepumpenbetriebszeit substituiert wurde. Wie die Auswertungen in den Kapiteln 5.7.1 und 5.7.2 zeigen, wird sowohl bei den Luft- als auch bei den Erdreich-Wärmepumpen Betriebszeit, mit der im Jahresverlauf geringsten Effizienz, durch die Solaranlage substituiert. Bei den Erdreich-Wärmepumpen liegt die Effizienz in den Sommermonaten jedoch weiter unter dem Jahresdurchschnitt als bei den Luft-Wärmepumpen.

Im aktuellen Kapitel soll die Kombination aus Wärmepumpe und Solaranlage hinsichtlich ihrer Gesamteffizienz bewertet werden. Hierfür wird die im Kapitel 5.1 vorgestellte Bilanzgrenze der Jahresarbeitszahl 2 um die thermische Komponente des solaren Ladekreises (Output) und der elektrischen Komponente der Solarkreispumpe (Input) erweitert. Ein wichtiger Hinweis bei dieser Betrachtung betrifft die Bilanzierung der thermischen Energie. Wie auch für die Wärmepumpe wird nur der Output der Solaranlage gemessen und bilanziert. Bei letzterer ist jedoch die Diskrepanz zwischen bereitgestellter und tatsächlich benötigter Energie wesentlich höher. Da nur sehr vereinzelt auch nach den Speichern Wärmemengenzähler installiert wurden, ist eine exaktere Betrachtung nicht möglich. Die für die beschriebene Bilanzierung (2+Solar) erforderliche Messtechnik wurde bei zehn Anlagen installiert. Nachfolgend können neun Erdreich-Wärmepumpen und eine Luft-Wärmepumpe als kombinierte Systeme bewertet werden.

In der Abb. 65 werden die im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 monatlich bilanzierten Arbeitszahlen in Form grüner (Bilanzgrenze 2) sowie gelber (Bilanzgrenze 2+Solar) Säulen dargestellt. Die Anlagen sind mit ihrer Identifikationsnummer versehen. Die jeweils äußerst rechts dargestellte Anlage mit der **ID 185** ist die einzige Kombination einer Luft-Wärmepumpe mit einer Solaranlage. Die im Betrachtungszeitraum erzielten Jahresarbeitszahlen werden für beide Bilanzgrenzen in der Abb. 66 dargestellt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wird jeweils am unteren Ende der Säulen die Fläche der Solaranlagen genannt. Die verwendete Farbe unterscheidet deren jeweilige Einsatzzweck, wobei dieser entsprechend der hydraulischen Einbindung der Solaranlage definiert wurde. Ist diese einzig mit dem Trinkwasserspeicher verbunden, wird der Wert blau dargestellt. Bei Einbindung in einem Kombispeicher erscheint der Wert in rot. Der Vergleich von Fläche und Einsatzzweck zeigt, abgesehen von der geringen Fläche bei **ID 126**, eine deutliche Korrelation. Bei der genannten Anlage gilt zu berücksichtigen, dass es sich um die Nettofläche von Vakuum-Röhrenkollektoren handelt. Die Sortierung erfolgt in beiden Diagrammen in erster Instanz nach der Wärmequelle der Wärmepumpe, anschließend nach dem Betriebszweck der Solaranlage und abschließend nach der erzielten Jahresarbeitszahl 2 + Solar.

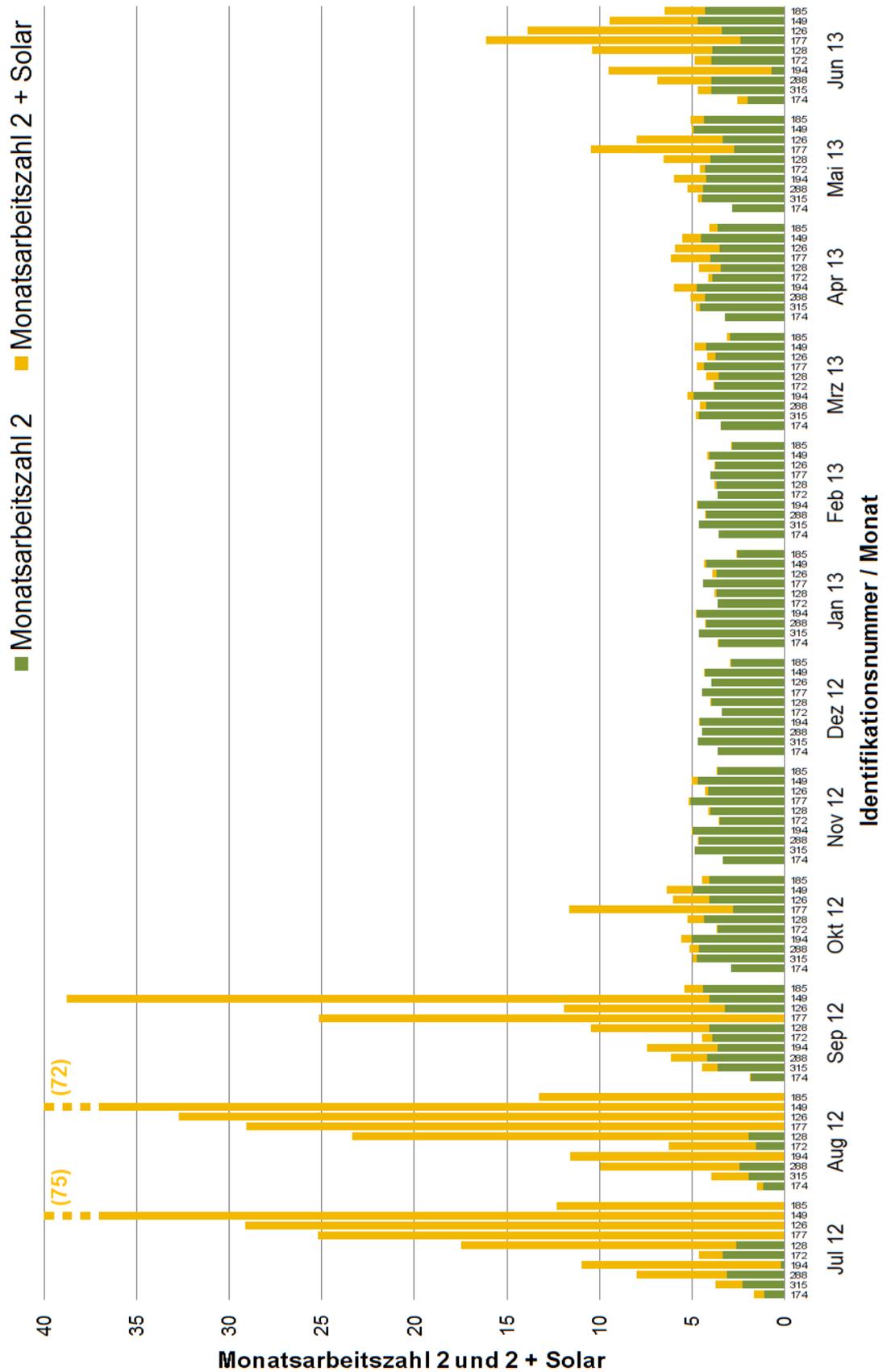
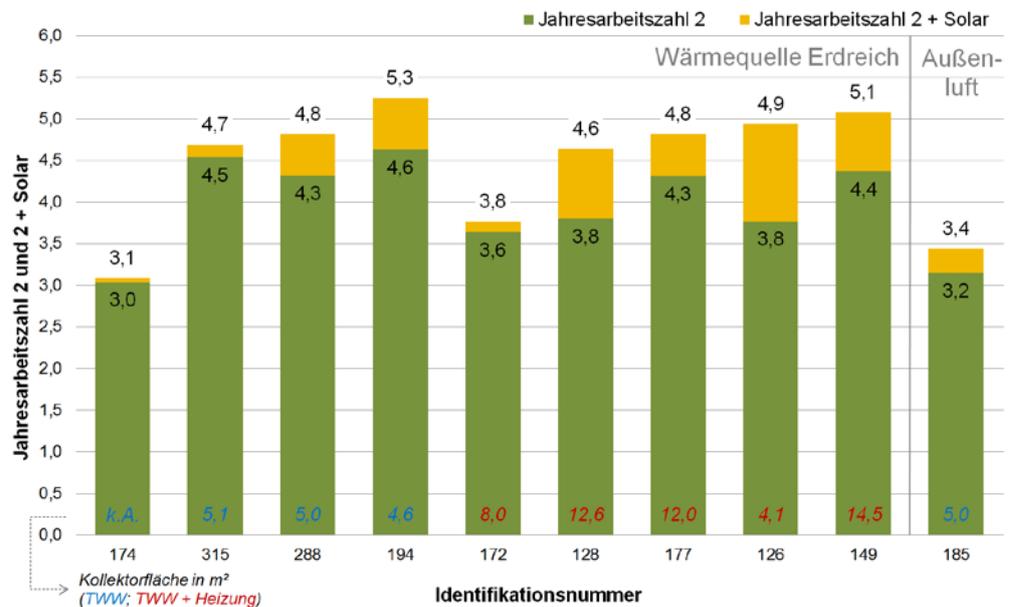


Abb. 65: Monatliche AZ über Bilanzgrenze 2 sowie 2+Solar aller dahingehend auswertbaren Wärmepumpen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 (ID 185 Luft-Wärmepumpe, übrige Erdreich-Wärmepumpen)

Abb. 66: Jahresarbeitszahlen über Bilanzgrenze 2 sowie 2+Solar aller dahingehend auswertbaren Wärmepumpen im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 (ID 185 Luft-Wärmepumpe, übrige Erdreich-Wärmepumpen)



Die Monatsarbeitszahlen spiegeln überwiegend die Einstrahlungsverhältnisse sowie die Dimensionierung (bzw. den Einsatzzweck) von Solaranlagen und Speicher wieder. Es wird deutlich, dass die solare Einstrahlung im ersten Halbjahr wesentlich intensiver war als im zweiten Halbjahr. Die Bedingungen im August führten dazu, dass die Hälfte der Wärmepumpen nicht in Betrieb gehen musste, was zusätzlich auch durch die Abwesenheit der Bewohner (Urlaub) beeinflusst worden sein kann. In den Monaten November bis Februar leisten nur die mit einem Kombispeicher verbundenen Solaranlagen einen kleinen Beitrag. Im ebenfalls noch relativ kalten März wurden hingegen schon deutlich höhere Energiebeiträge durch die Solaranlagen gemessen. Bei den Jahrswerten zeigen sich deutliche Überschneidungen in den Ergebnissen hinsichtlich des Betriebszwecks. Die solare Unterstützung der Trinkwassererwärmung führt bei den Anlagen **ID 288** (+12 %) und **ID 194** (+15 %) zu einer nennenswerten Erhöhung der Jahresarbeitszahl 2. Obwohl die Solaranlage bei **ID 172** zusätzlich Energie zur Raumheizung zur Verfügung stellen könnte, liegt die Erhöhung der Jahresarbeitszahl 2 bei lediglich 6 %. Kaum eine Effizienzsteigerung ist bei der **ID 174** zu beobachten. Der größte Zugewinn bezogen auf die Jahresarbeitszahl 2 wurde mit 29 % für die Kombination, der Anlage **ID 126** mit dem Vakuum-Röhrenkollektor, ermittelt.

5.7 Betriebsbedingungen und Effizienzwerte im Jahresverlauf

Die in Kapitel 5.4 vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Bilanzierung eines kompletten Jahres. Im aktuellen Abschnitt hingegen werden die verschiedenen Jahre sowie, die sich im Jahresverlauf ändernden Betriebsbedingungen der Wärmepumpenanlagen näher betrachtet.

Wesentlichen Einfluss haben die sich im Jahresverlauf ändernden Temperaturen auf Seiten der Wärmequelle und Wärmesenke. Erstere unterscheidet sich signifikant bei der Verwendung unterschiedlicher Wärmequellen, letztere vor allem (bei Niedertemperaturheizsystemen) hinsichtlich des energetischen Anteils für die Trinkwassererwärmung aber auch der notwendigen Heizkreistemperatur (Heizkurve). Die kombinierte Auslegung mit einem Heizstab, wie sie in der Regel bei Luft-Wärmepumpen ausgeführt wird, führt zu einer temperaturabhängigen Effizienzmindern und ist somit ebenfalls ein sich im Jahresverlauf ändernder Einflussfaktor. In den beiden folgenden Unterkapiteln werden diese Zusammenhänge anhand der Messergebnisse mit Fokus auf den Heizstabeinsatz (Kapitel 5.7.1) und den Unterschieden zwischen alten und neuen Anlagen (Kapitel 5.7.2) veranschaulicht. Hierbei wird der Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2013 betrachtet. Dieser Zeitraum wurde als Kompromiss zwischen einer möglichst großer Anzahl auswertbarer Anlagen und einem möglichst langem Auswertungszeitraum gewählt. Insgesamt konnten 21 Luft- und 35 Erdreich-Wärmepumpen dahingehend untersucht werden.

Im anschließenden Kapitel 5.7.3 werden - ohne direkte Bezugnahme auf die Effizienz - die Soletemperaturen von 11 Erdreich-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden hinsichtlich ihrer Entwicklung bei unterschiedlichen Zeithorizonten analysiert.

5.7.1 Einfluss des Heizstabbetriebs Juli 2011 bis Juni 2013

Um den Einfluss des Heizstabes auf die Effizienz zu zeigen, werden nachfolgend die Monats- und Jahresarbeitszahlen für die Bilanzgrenzen 1 und 2 (vgl. Kapitel 5.1) jeweils für Anlagen mit der Wärmequelle Außenluft sowie Erdreich vorgestellt. Vor allem bei den Effizienzwerten im Sommer ist zu beachten, dass diese auch Ergebnisse von mit Solaranlagen kombinierten Wärmepumpen enthalten. Wie im Kapitel 5.6 dargestellt wird, können in diesen Systemen Monatsarbeitszahlen der Teilkomponente Wärmepumpe sehr geringe Werte annehmen. Bei den Mittelwerten der Luft-Wärmepumpen ist ein kombiniertes System⁵, bei denen der Erdreich-Wärmepumpen sind acht kombinierte Systeme⁶ enthalten.

5.7.1.1 Wärmequelle Außenluft

Ab Juli 2011 waren insgesamt 21 Luft-Wärmepumpen mit einer kontinuierlichen Datenbasis auswertbar. Die Ergebnisse werden in der Abb. 67 dargestellt. Die grünen Säulen zeigen die Monats- bzw. Jahresarbeitszahlen mit (Bilanzgrenze 2) und ohne (Bilanzgrenze 1) Heizstab. Neben diesen Effizienzwerten sind auf der linken vertikalen Achse Energieanteile abgetragen, wobei

⁵ ID 124

⁶ IDs 126, 149, 172, 177, 182, 191, 194, 288

100 % durch einen Wert von 1 wiedergegeben wird. Die Verteilung in grauschwarz steht für die Anteile der Trinkwasserwärmemenge (grau) und der Raumheizenergie (schwarz). Die Verteilung rechts daneben zeigt mit dem roten Abschnitt des Balkens den Anteil an Elektroenergie, der vom Heizstab benötigt wurde. Der gelbe Abschnitt entspricht dem Verbrauch von Verdichter, Steuerung und Ventilator. Die Anzahl der Anlagen, bei denen der Heizstab im jeweiligen Betrachtungszeitraum mindestens einmal in Betrieb war, geben die roten Säulen ohne Füllung wieder, dessen Werte sich an der rechten vertikalen Achse ablesen lassen. Gleiches gilt für die mittlere Außenlufttemperatur, dargestellt als blaue horizontale Striche. Diese entsprechen den in Kapitel 5.2 vorgestellten Mittelwerten von fünf in Deutschland verteilten Messstationen [DWD 2014].

Beim Vergleich der Effizienzwerte beider Jahre zeigen sich die Unterschiede vor allem aufgrund des differierenden Heizstabbetriebes. Während die Jahresarbeitszahlen mit der Bilanzgrenze 1 mit 3,09 bzw. 3,11 fast identisch sind, ist der Einfluss durch den Heizstab in 2011/12 wesentlich größer. Dieser verursacht eine Minderung auf 3,04, hervorgerufen durch einen Heizstabanteil am Gesamtelektroenergieverbrauch von 4,3 %. In 2012/13 ist dieser mit 2,2 % etwa halb so groß und führt zu einer Jahresarbeitszahl 2 von 3,09. Im Auswertungsjahr 2011/12 trat Heizstabbetrieb bei 17 der 21 Anlagen auf, im anschließenden Jahr bei 12 Anlagen.

Wie die Monatswerte zeigen, gibt es eine Abhängigkeit zwischen Heizstabbetrieb und mittlerer Außenlufttemperatur. Da es sich um Mittelwerte handelt, die keinen Aufschluss darüber geben wie häufig und in welcher Intensität die Bivalenztemperatur zum Einschalten des Heizstabes unterschritten wurde, besteht keine exakte Korrelation zwischen beiden Werten. Eine tiefergehende Auswertung zu den mittleren Außenlufttemperaturen auf Tagesebene wurde im Rahmen des Kapitels 5.2 ausgeführt. Hierbei wurde deutlich, dass die Auswertungsperiode 2012/13 von einer vergleichsweise langen Heizperiode, jedoch ohne extrem negative Temperaturspitzen der Außenluft geprägt war. In 2011/12 hingegen war das Temperaturniveau in der Heizperiode höher, wurde jedoch von negativen Temperaturspitzen in den ersten beiden Wochen im Februar unterbrochen. Entsprechend dieser äußeren Bedingungen verhalten sich auch die Anteile der monatlichen Heizstabbetrieb am Gesamtelektroenergieverbrauch. Der hohe Heizstabeinsatz in 2011/12 ist fast ausschließlich auf den Monat Februar zurückzuführen, in dem 14 der 21 Wärmepumpenanlagen auf den Heizstab zurückgreifen mussten. Diese verursachten einen Anteil der Heizstabbetrieb von durchschnittlich 14,6 % in diesem Monat. In 2012/13 wurde Heizstabbetrieb bei maximal fünf Anlagen in einem Monat detektiert. Bemerkenswert ist, dass dieser Wert in den Monaten Dezember, Januar, März und April bei stark unterschiedlicher anteiliger Heizstabbetrieb auftritt. Insgesamt spiegeln die Ergebnisse deutlich die Funktion des Heizstabes als zusätzlichen Wärmeerzeuger bei tiefen Außenlufttemperaturen wider. Auch lange Heizperioden mit geringen Außenlufttemperaturen führen nicht zu signifikant hoher Heizstabbetrieb, wenn die Bivalenzpunkte nicht unterschritten werden. Der Heizstabbetrieb außerhalb der Heizperiode ist in den meisten Fällen auf die Legionellenvermeidung zurückzuführen.

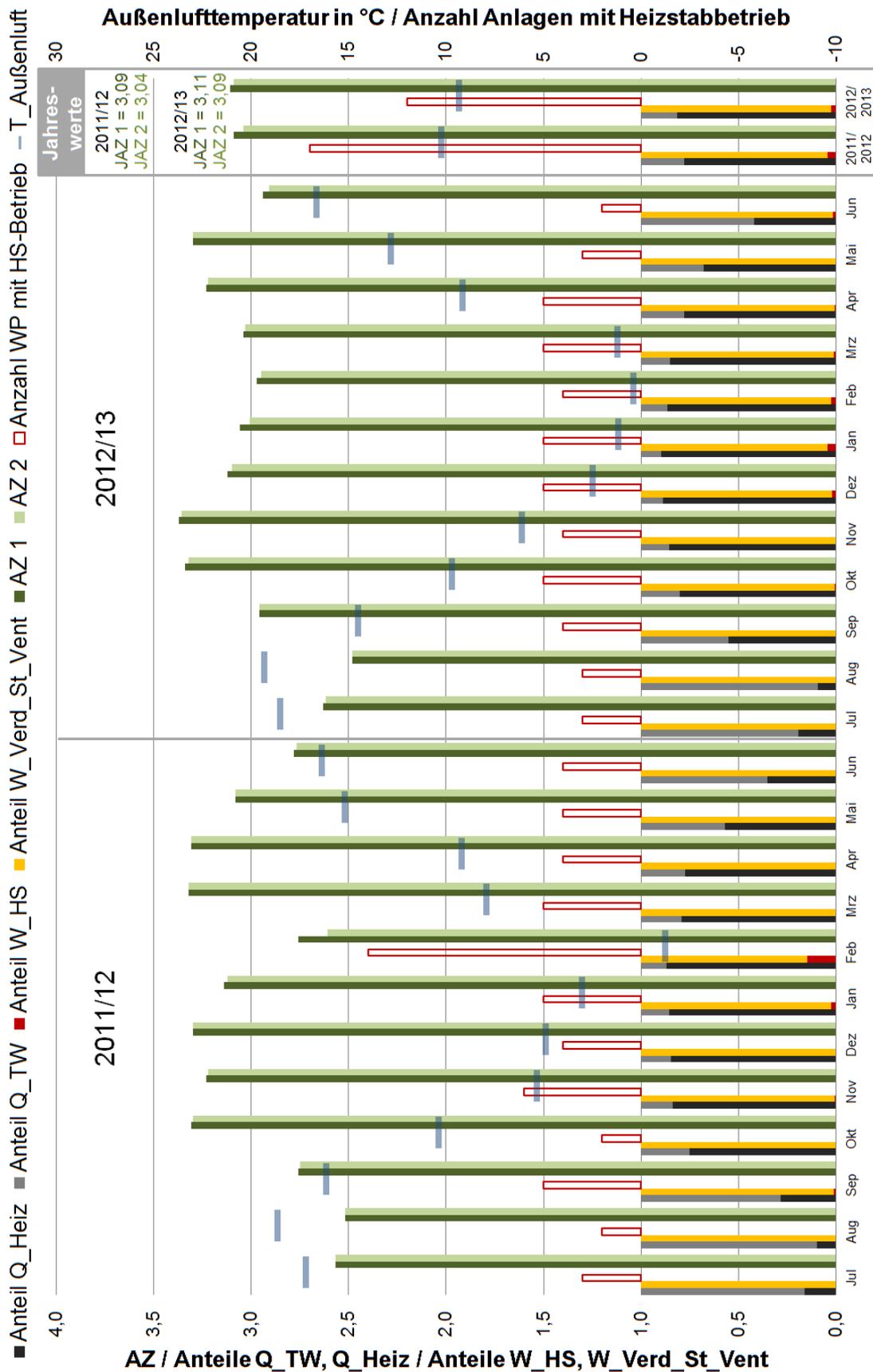


Abb. 67: Monats- und Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 1 und 2, Energieanteile auf der Elektro- und Senkenseite, mittlere Außenlufttemperaturen sowie die Anzahl der Wärmepumpen mit Heizstabbetrieb von 21 Luft-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2013

Die Jahresprofile der Monatsarbeitszahlen zeigen die üblichen Verläufe für Luft-Wärmepumpen beim Einsatz von Flächenheizsystemen. In den Sommermonaten werden die geringsten Effizienzwerte erzielt, was auf den hohen Anteil des Trinkwasserwärmebedarfs und der damit verbundenen hohen mittleren Wärmesenktemperatur einhergeht. Dies kann auch nicht durch die höheren Außenlufttemperaturen kompensiert werden. Die Höchstwerte ergeben sich in der Übergangszeit, wenn einerseits bereits geheizt wird, andererseits die Außenlufttemperaturen knapp unter der Heizgrenze eine hervorragende Wärmequelle darstellen und gleichzeitig geringe Heizkreistemperaturen erforderlich machen. In der Kernheizperiode liegen die Effizienzwerte auf einem mittleren Niveau und zeigen deutliche Abhängigkeiten zur Außenlufttemperatur.

5.7.1.2 Wärmequelle Erdreich

In der Abb. 68 werden die Ergebnisse zum Effizienzeinfluss des Heizstabes im Jahresverlauf, äquivalent zu den Darstellungen für die Luft-Wärmepumpen in Abb. 67, für Erdreich-Wärmepumpen dargestellt. Anders als bei den Luft-Wärmepumpen wird der Heizstab bei Erdreich-Wärmepumpen in der Regel nicht als Wärmeerzeuger zur planmäßigen Heizlastdeckung bei Unterschreitung einer definierten Außenlufttemperatur eingesetzt. Anhand der Jahreswerte wird deutlich, dass bei den untersuchten Anlagen kaum Heizstabarbeit auftritt. In 2011/12 reduziert der Heizstabeinsatz die Effizienz von 4,03 auf 4,01 und in 2012/13 von 4,09 auf 4,08. Bei insgesamt zehn (2011/12) bzw. neun (2012/13) der 35 Anlagen wurde der Heizstab eingesetzt. Eine Korrelation zur Außenlufttemperatur zeigt sich nur durch die vergleichsweise hohe Heizstabarbeit im kalten Februar 2012: Bei fünf Anlagen wurde Heizstabbetrieb gemessen und der gesamte Anteil am Elektroenergiebedarf in diesem Monat betrug 2,9 %. In den übrigen Monaten kann keine Relation zur Außenlufttemperatur festgestellt werden.

Der Jahresverlauf der Effizienz von Erdreich-Anlagen ist generell stärker von der Senktemperatur abhängig als jener der Luft-Wärmepumpen, was auf die gleichmäßigere Quelltemperatur zurückzuführen ist. Dies trifft umso mehr zu, da die Erdreich-Wärmepumpen überwiegend mit Erdwärmesonden und nicht mit Erdwärmekollektoren ausgestattet sind. Letztlich wird die verstärkte Abhängigkeit von der Senktemperatur in der größeren Differenz zwischen den Monatsarbeitszahlen im Sommer sowie denen in der Heizperiode deutlich, wobei auch der größere Einfluss der mit Solar kombinierten Systeme bei den Erdreich-Wärmepumpen berücksichtigt werden muss. Unterschiede zwischen den beiden ausgewerteten Jahren betreffen die Effizienzwerte in den Übergangszeiten. Diese spiegeln deutlich die Dauer der Heizperiode und deren Einfluss auf die mittlere Senktemperatur wider. Somit lässt sich anhand der Monatsarbeitszahlen ablesen, dass die Heizperiode in 2012/13 früher begann und später endete als in 2011/12.

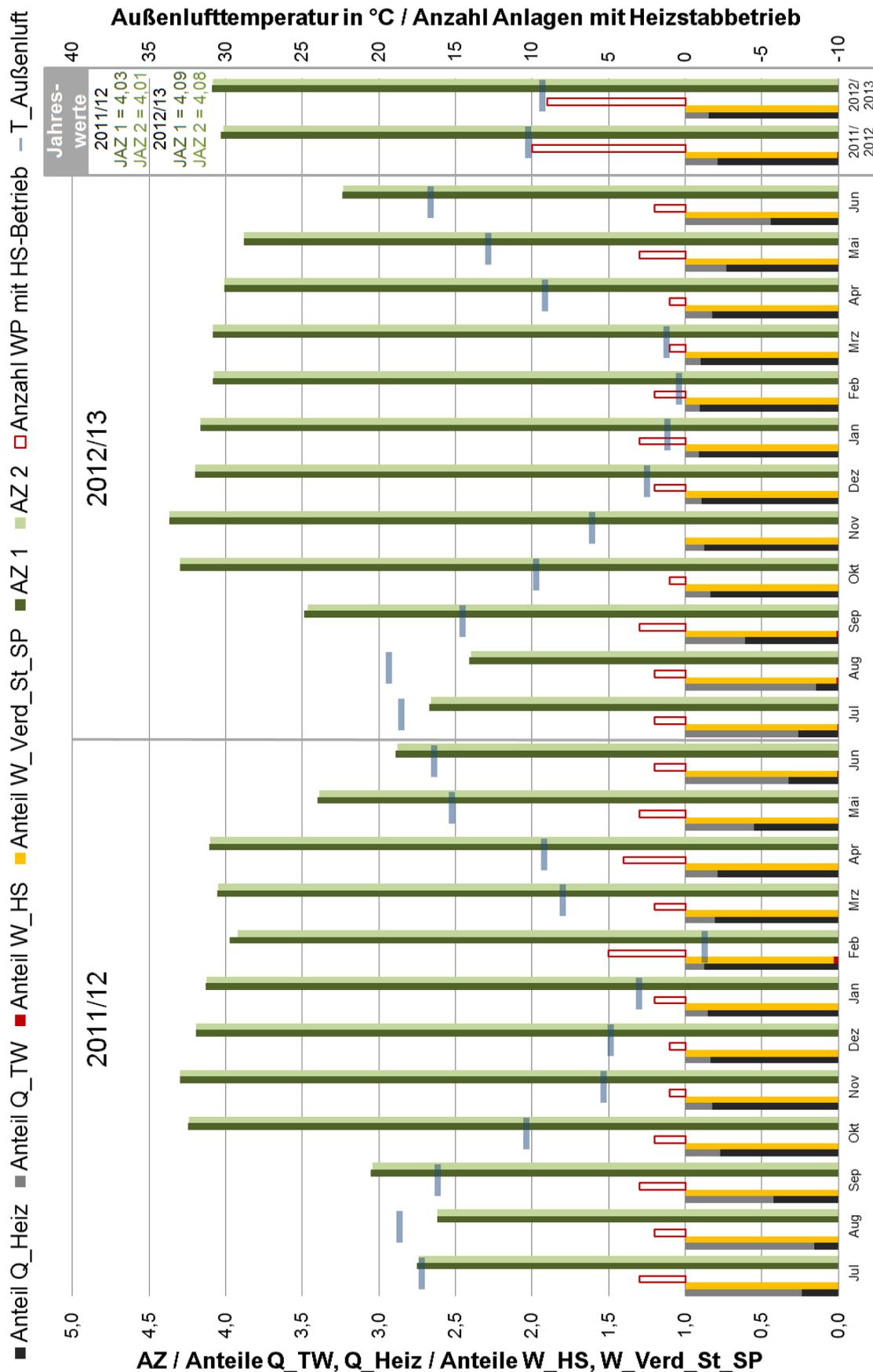


Abb. 68: Monats- und Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 1 und 2, Energieanteile auf der Elektro- und Senkenseite, mittlere Außenlufttemperaturen sowie die Anzahl der Wärmepumpen mit Heizstabbetrieb von 35 Erdreich-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2013

5.7.2 Effizienzunterschied bestehender und neuer Anlagen Juli 2011 bis Juni 2013

Nachfolgend werden die Monats- und Jahresarbeitszahlen mit der Bilanzgrenze 2 und dem Fokus auf die Effizienzunterschiede zwischen bereits im „WP-Effizienz“-Projekt untersuchten sowie neuen Wärmepumpen, vorgestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt separat für Wärmepumpen mit der Wärmequelle Außenluft und Erdreich.

5.7.2.1 Wärmequelle Außenluft

In der Abb. 69 werden mittels grüner Säulen die mittleren Jahresarbeitszahlen der Luft-Wärmepumpen, getrennt nach zehn bestehenden (hellgrün) und elf neuen Anlagen (dunkelgrün), gezeigt. Jeweils links von den Effizienzwerten sind die dazugehörigen Verteilungen der bereitgestellten thermischen Energie (Trinkwassererwärmung in grau, Raumheizung in schwarz) sowie der Elektroenergie (Heizstarbeit in rot sowie Verdichter, Steuerung und Ventilator in gelb) dargestellt.

Bei dem Vergleich der mittleren Jahresarbeitszahlen 2012/13 der hier ausgewerteten Anlagen (alt: 3,06; neu: 3,12) sowie jener aller untersuchten Luft-Wärmepumpen (vgl. Kapitel 5.4.1.1; alt: 3,00; neu: 3,23) werden Unterschiede deutlich. Die hier untersuchten neuern Anlagen erzielen höhere, die älteren Anlagen geringere Effizienzwerte. Die Effizienzunterschiede sind daher in dieser Auswertung geringer. In beiden Auswertungszeiträumen liegen die Jahresarbeitszahlen der neuen Anlagen um 0,06 oberhalb der Jahresarbeitszahlen der alten Anlagen. Im Jahresverlauf sind diese Unterschiede umso größer, je geringer der Heizwärmebedarf ist. Die größten Arbeitszahldifferenzen sind in den Sommermonaten zu beobachten. Hier haben die neuen deutliche Vorteile gegenüber den alten Wärmepumpen. Eine Ausnahme bilden die Monate Oktober und November 2012, in denen die älteren Wärmepumpen im Mittel ebenfalls höhere Jahresarbeitszahlen erzielen. Im Monat Februar des Jahres 2012, in dem aufgrund der geringsten mittleren Außenlufttemperatur die größte Herausforderung für die Effizienz in der Heizperiode auftritt, liegen die Jahresarbeitszahlen der neuen Anlagen um 0,08 höher. Dies ist u.a. auf die größere Heizstarbeit bei den länger bestehenden Anlagen zurückzuführen.

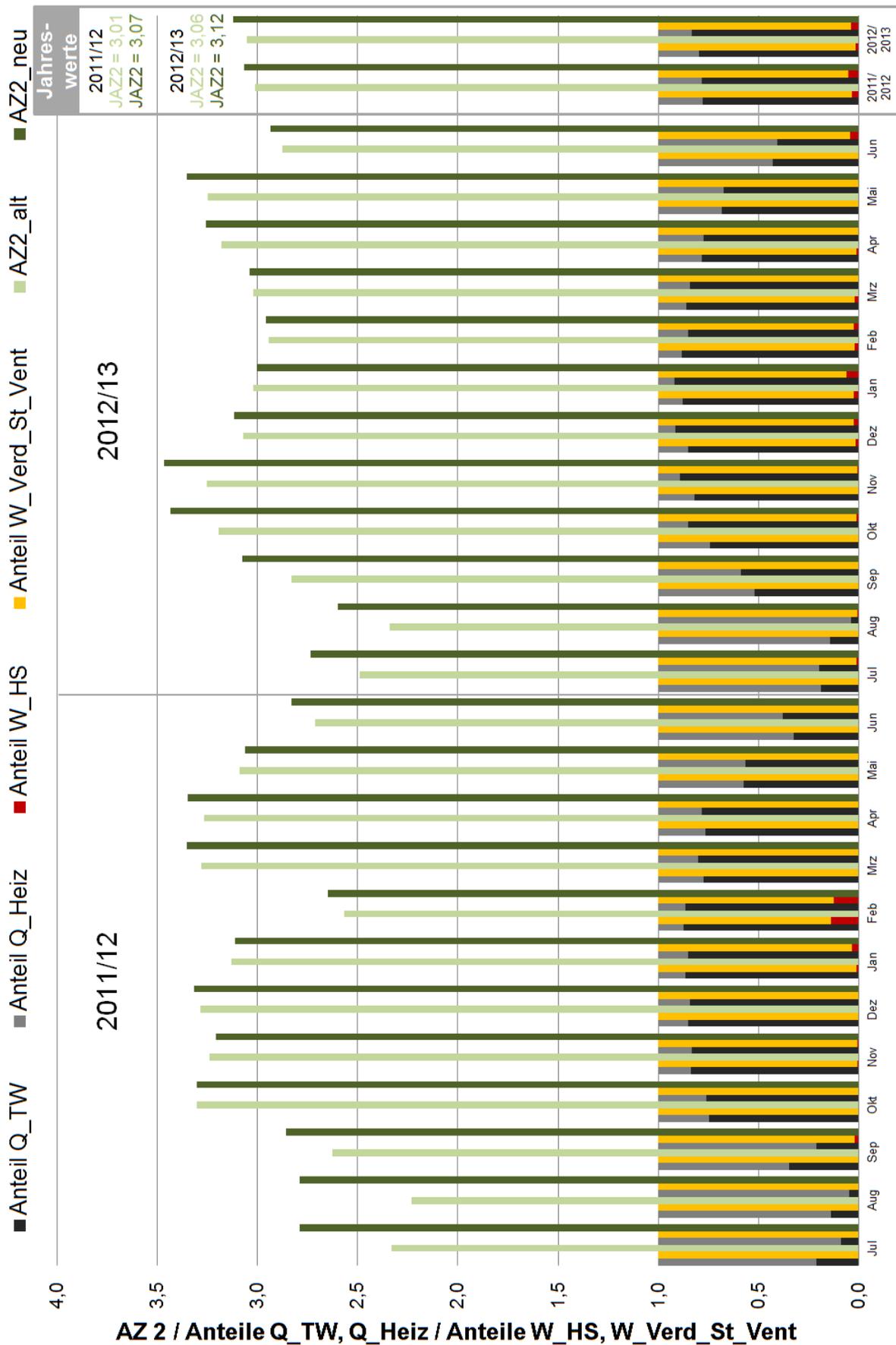


Abb. 69: Monats- und Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 2, Energieanteile auf der Elektro- und Senkenseite von 10 bestehenden und 11 neuen Luft-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2013

5.7.2.2 Wärmequelle Erdreich

Die in der Abb. 70 dargestellten Ergebnisse geben die Mittelwerte der Arbeitszahlen sowie der energetischen Anteile von 27 bereits in „WP-Effizienz“ untersuchten sowie von acht neuen Anlagen wieder.

Der Vergleich der Jahresarbeitszahlen 2012/13 (4,00 und 4,37) mit den Ergebnissen aller Erdreich-Wärmepumpen in Kapitel 5.4.2.1 (3,94 und 4,28) zeigt, dass die hier untersuchte Auswahl einerseits geringere Effizienzwerte erzielt, andererseits die Differenzen zwischen alten und neuen Anlagen auf ähnlichem Niveau liegen. Bemerkenswert ist die Änderung des Anteils der mittleren Trinkwasserwärmemenge zwischen den beiden Jahren bei den neuen Anlagen, die auf eine Fehlfunktion einer Wärmepumpenanlage zurückzuführen ist. Diese Anlage hat in 2011/12 den Kombispeicher zu 98 % im Trinkwassermodus beladen. Daraufhin wurde der Kombispeicher durch zwei separate Speicher ersetzt. Ab Juli 2012 lag der energetische Anteil der Trinkwasserwärmemenge dieser Anlage im Mittel bei 9 %. Der Einfluss dieser Fehlfunktion auf die Effizienz war hingegen gering, da die Wärmepumpe neben einer Fußbodenheizung auch Radiatoren auf hohem Temperaturniveau versorgt. Im Vergleich der Monatsarbeitszahlen von alten und neuen Anlagen zeigen sich unterschiedliche Relationen im Jahresverlauf. In der Heizperiode liegen die mittleren Effizienzwerte der neuen Wärmepumpen konstant oberhalb jener der alten. Mit Abnahme des Heizwärmbedarfs nimmt der Effizienzvorteil auf Seiten den neuen Anlagen ab. Im August 2012 erzielen die alten Wärmepumpen im Mittel sogar eine höhere Effizienz. Diese Unterschiede zwischen Sommer und Heizperiode sind u.a. auf den hohen Anteil an mit Solaranlagen kombinierten Systemen (vier von acht) bei den neuen Anlagen und der damit einhergehenden geringeren Effizienz zurückzuführen.

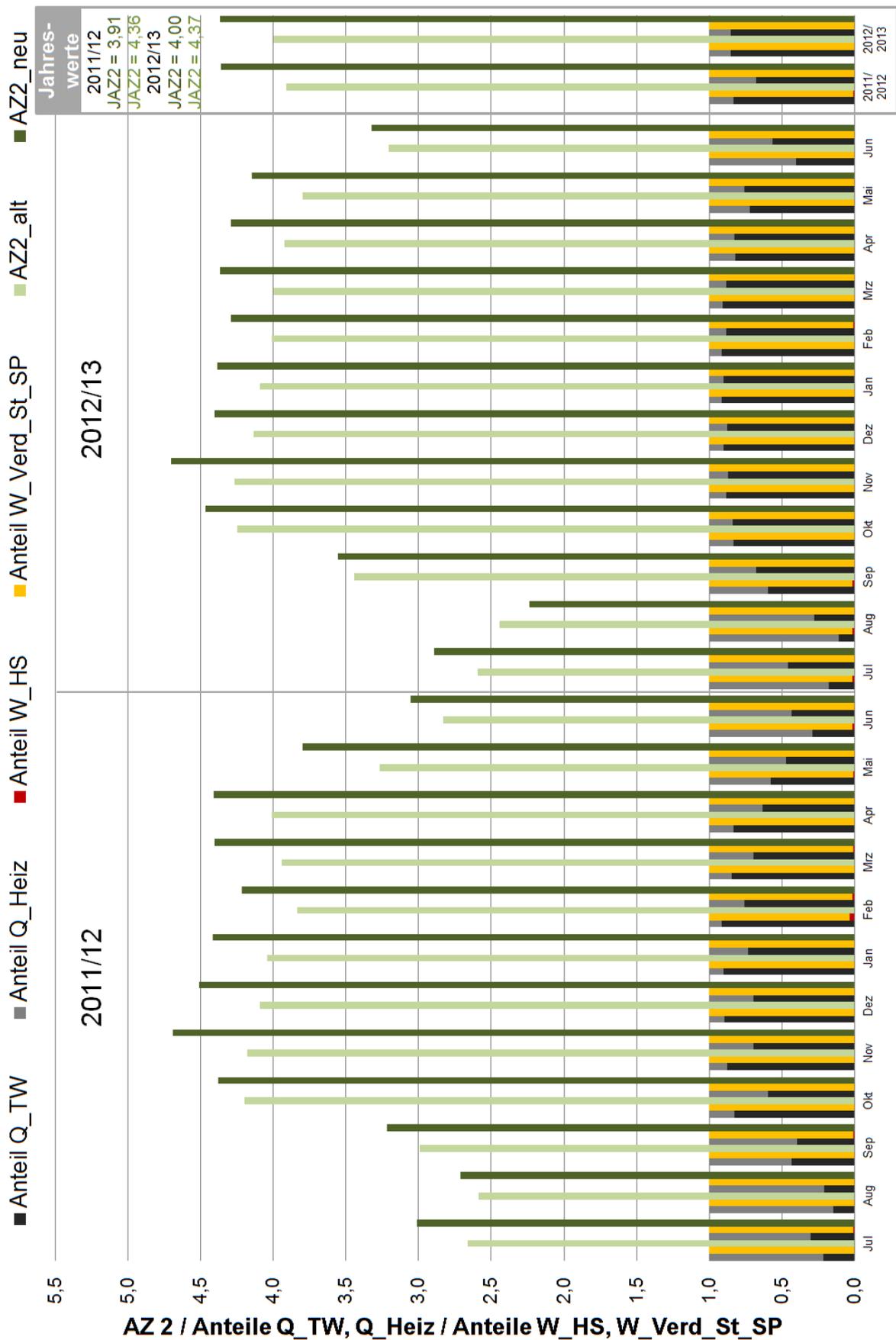


Abb. 70: Monats- und Jahresarbeitszahlen der Bilanzgrenzen 2, Energieanteile auf der Elektro- und Senkenseite von 27 bestehenden und 8 neuen Erdreich-Wärmepumpen für den Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2013

5.7.3 Soletemperaturen bei Erdwärmesonden von Januar 2008 bis Juni 2013

Während die Quelltemperaturen bei Luft-Wärmepumpen den jeweiligen Außenlufttemperaturen vor Ort entsprechen, sind die Quelltemperaturen der Erdreich-Wärmepumpen - in der Regel die Soletemperaturen - von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig. Im aktuellen Kapitel soll das Verhalten der Soletemperaturen im Jahresverlauf sowie deren Temperaturniveaus über einen längeren Zeitraum dargestellt werden. Hierfür werden die Ergebnisse jener Erdreich-Wärmepumpen mit Erdwärmesonde vorgestellt, die bereits im Rahmen von „WP-Effizienz“ messtechnisch untersucht wurden. Insgesamt wurden 23 dieser Anlagen im neuen Projekt weiter vermessen. Als Kompromiss zwischen möglichst langem Betrachtungszeitraum und einer möglichst großen Datenbasis wurden elf Anlagen ausgewählt, die seit Januar 2008 kontinuierlich über Messdaten verfügen.

In Abb. 71 werden die mittleren täglichen Solevor- (rote Linie) und Solerücklauftemperaturen (grüne Linie) der elf genannten Wärmepumpen dargestellt. Weiterhin wird die Außenlufttemperatur als Tagesmittelwert (blaue Linie; Mittelwert von fünf in Deutschland verteilten Messstationen, vgl. Kapitel 5.2) sowie als Mittelwert der jeweiligen Heizperiode (blaue Säulen; wird jeweils für Zeitraum 1. September bis 30. April angenommen) gezeigt. Mit beiden Werten lassen sich die Heizperioden gut charakterisieren. So gab es bspw. kurze Winter mit extremen negativen Temperaturspitzen (2011/12) oder lange Heizperioden, mit konstant geringem Temperaturniveau (2012/13). Die Soletemperaturen zeigen eine starke Korrelation zur Außenlufttemperatur, was besonders deutlich im kalten Februar 2012 zu erkennen ist. Bemerkenswert ist das schnelle Ansteigen der Soletemperaturen im Anschluss an negative Temperaturspitzen. Auch nach längeren Phasen geringer Außenlufttemperaturen steigen anschließend, mit geringerem Wärmeentzug aus dem Erdreich, die Soletemperaturen sofort wieder an. Im gesamten Betrachtungszeitraum nimmt die Temperatur der Sole beim Wiedereintritt in das Erdreich an insgesamt 17 Tagen einen negativen Wert an. Die mittlere tägliche Soletemperatur aller untersuchten Anlagen beträgt vor der Zuführung zum Verdampfer nie unter 2,6 °C. Auf die entsprechenden Resultate der Einzelanlagen wird anhand der Abb. 73 eingegangen.

Hinsichtlich der Soletemperaturen in den Sommermonaten gilt zu beachten, dass sich die Temperaturfühler zwar mittels Eintauschhülsen im Fluid, aber gleichzeitig auch im Aufstellraum der Wärmepumpe befinden. Je kürzer die Betriebszeiten der Wärmepumpen sind, desto stärker können sich auch die höheren Umgebungstemperaturen auf die mittlere Soletemperatur während des Betriebs auswirken.

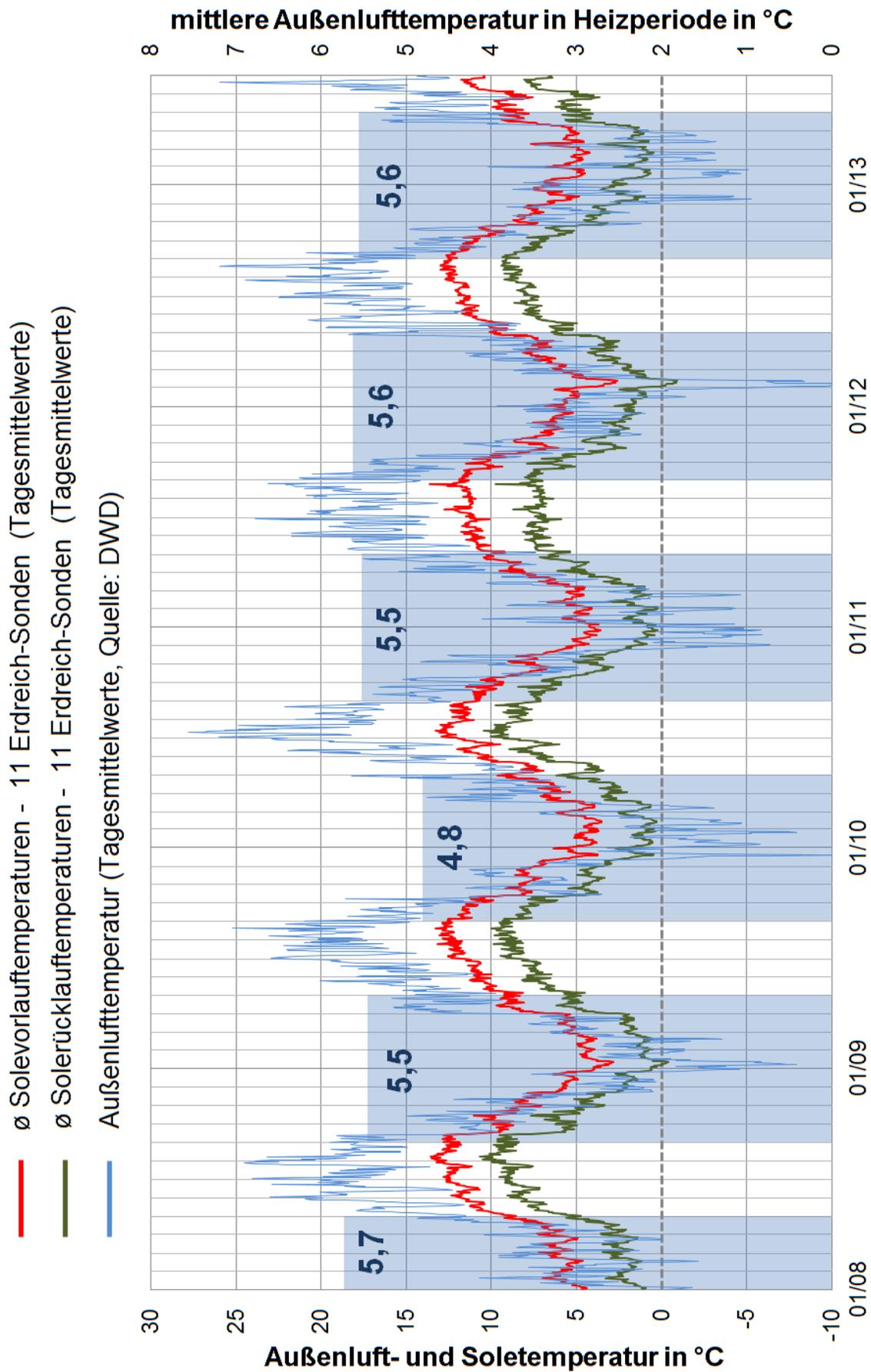


Abb. 71: Mittlere Solevor- und Solerücklauftemperaturen der Tagesmittelwerte von elf Wärmepumpen mit Erdwärmesonden

Die elf untersuchten Wärmepumpen wurden in den Jahren 2006 und 2007 installiert. Somit sind die Wärmequellen bis Mitte 2013 zwischen 7,5 und 5,5 Jahre in Benutzung. Bei der Formulierung von Aussagen hinsichtlich der Regenerationszeit muss berücksichtigt werden, dass bei der überwiegenden Anzahl der Anlagen keine Messwerte seit der Inbetriebnahme vorliegen und bis zum Beginn der messtechnischen Erfassung eine etwaige Temperaturabsenkung nicht festgestellt werden kann. Für den Betrachtungszeitraum lassen die bereits formulierten zügigen Anstiege der Soletemperaturen im Anschluss an negative Spitzen die Vermutung zu, dass sich das Erdreich kurzfristig betrachtet schnell regeneriert. Auch langfristig scheinen sich die Soletemperaturniveaus in den einzelnen Heizperioden nicht zu verringern. Das gleiche Ergebnis konnte bei einer äquivalenten Auswertung für alle elf Einzelanlagen festgestellt werden.

Zum Thema der langfristigen Absenkung der Erdreichtemperatur infolge des Wärmeentzugs durch eine Wärmepumpe existiert eine Vielzahl von Studien mit teilweise differierenden Ergebnissen.

In der Literatur gibt es viele Studien, die auf eine dauerhafte Absenkung hinweisen. Basierend sowohl auf Simulationen [Rybach et al. 1993], [Desideri et al. 2011] als auch auf Messungen [Bayer et al. 2013]. Die Ergebnisse des Projektes „WP Monitor“, die keine Anzeichen für ein dauerhaftes Absinken liefern, wurden in einer Studie von [Montagud et al. 2011] bestätigt. In dieser Studie wurde eine Erdwärmesonde in einem Zeitraum von fünf Jahren messtechnisch untersucht. Diese Erdwärmesonde bestand aus 6 Bohrlöchern mit jeweils 50 m Tiefe. Während des Testbetriebs wurde eine Wärmepumpe mit einer nominellen Heizleistung von 19,3 kW mit dieser Erdsonde versorgt.

In der Abb. 72 werden die eben vorgestellten Ergebnisse in direkte Beziehung gesetzt. Die roten Punkte geben die mittleren täglichen Solevorlauftemperaturen, die grünen Punkte die entsprechenden Rücklauftemperaturen bei den jeweils vorherrschenden Außenlufttemperaturen wieder. Die Bezugsaußenlufttemperaturen sind die Tagesmittelwerte, gemessen an fünf im Bundesgebiet verteilten Orten. Die damit verbundene Unschärfe muss bei den Ergebnissen berücksichtigt werden. Die zusätzliche farbliche Unterscheidung der Soletemperaturen dient der Darstellung des längerfristigen Einflusses des Wärmeentzuges aus dem Boden innerhalb einer Heizperiode. Hierfür werden die Ergebnisse für das Halbjahr August bis Januar (tendenziell bessere Bedingungen) in jeweils dunklem Farbton und für Februar bis Juli (tendenziell schlechtere Bedingungen) in jeweils hellem Farbton dargestellt. Durch die Unterteilung soll in erster Linie die Kernheizperiode möglichst gleichmäßig auf beide Halbjahre verteilt werden (vgl. Verlauf Außenlufttemperatur in Abb. 71).

Der Zusammenhang zwischen Soletemperatur und Außenlufttemperatur spiegelt sich im Diagramm als eine Art verzerrtes „S“ wieder. Mit zunehmender Außenlufttemperatur steigen die Soletemperaturen langsam an. Im mittleren Temperaturbereich nimmt diese Steigung zu, bevor sie oberhalb von etwa 15 °C Außenlufttemperatur wieder abnimmt.

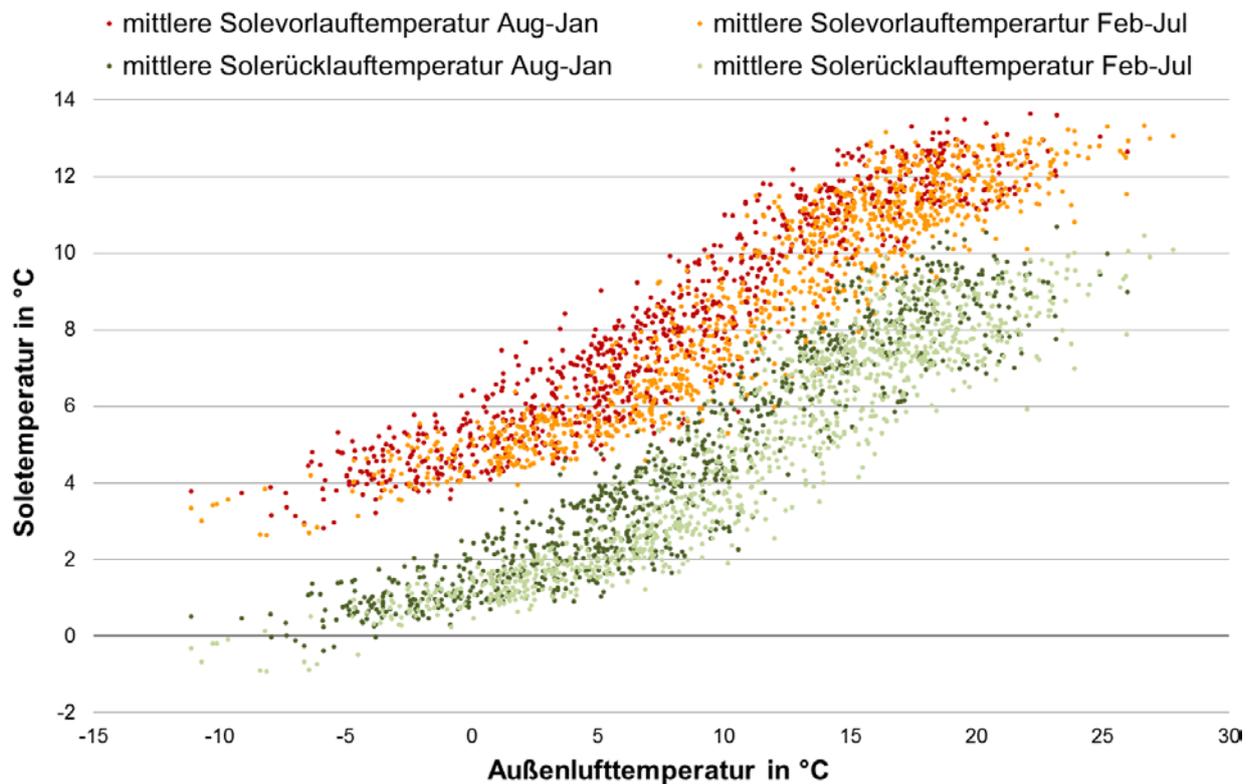


Abb. 72: Mittlere Solevor- und Solerücklauftemperaturen der Tagesmittelwerte von elf Wärmepumpen mit Erdwärmesonden über die mittlere Außenlufttemperatur (gemessen an fünf in Deutschland verteilten Messstationen) unterschieden nach den Zeiträumen September bis Januar und Februar bis August

Der Anstieg der Soletemperatur mit zunehmender Außenlufttemperatur spiegelt die abnehmende Auslastung der Wärmequelle wider. Der Verlauf im oberen Bereich ist auf die annähernd konstante Auslastung im Rahmen der Trinkwassererwärmung oberhalb der Heizgrenztemperatur zurückzuführen. Bezogen auf diese Mittelwerte wird die 0 °C-Grenze der Solerücklauftemperatur bereits ab -4 °C Außenlufttemperatur an den bereits erwähnten 17 Tagen unterschritten. Die relativ große Bandbreite an Soletemperaturen, bezogen auf eine bestimmte Außenlufttemperatur, lässt sich u.a. mit den wechselnden Bedingungen im Erdreich im Laufe der Heizperiode erklären. Die Werte für die definierte zweite Jahreshälfte liegen im Mittel unter denen der ersten Jahreshälfte. Die Abweichungen unterscheiden sich jedoch in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Zwischen 8 und 12 °C sind die Unterschiede am größten (mittlere Abweichung ca. 1 K), was auf die sehr guten Bedingungen im Erdreich zu Beginn der Heizperiode zurückgeführt werden könnte. Unterhalb dieses Temperaturbereiches nähern sich die Werte an, oberhalb auch soweit, dass im Mittel identische Temperaturniveaus vorliegen. Da sich - vereinfacht betrachtet⁷ - eine gewisse Außenlufttemperatur in einer gewissen Entzugsleistung aus dem Boden widerspiegelt, kann das Absinken der Soletemperatur in der definierten zweiten Jahreshälfte auf eine Abnahme der „Regenerationsgeschwindigkeit“ im Laufe der Heizperiode zurückgeführt werden.

⁷ Die Entzugsleistung wird in erster Linie von der Heizlast bestimmt, die, außer von der Außenlufttemperatur, u.a. auch von der Einstrahlung, den Windverhältnissen, dem Nutzerverhalten und der Kapazität des Gebäudes abhängig ist.

Die bisher genannten Resultate beziehen sich auf die Mittelwerte der elf untersuchten Anlagen. In der Abb. 73 werden die Solerücklauftemperaturen dieser Anlagen separat dargestellt. Bemerkenswert sind die großen Bandbreiten. In den Heizperioden unterscheiden sich die maximalen von den minimalen Werten um bis zu 8 K. Die negative Spitze aller Einzelanlagen wird im kalten Februar 2012 mit einem Wert von $-3,6\text{ C}$ erzielt. Die graue Linie im oberen Bereich des Diagramms zeigt für jeden Auswertungstag die Anzahl der Anlagen an, deren Solerücklauftemperatur im Tagesmittel unterhalb von 0 °C lag. Auch diese Werte spiegeln die sich im Jahresverlauf ändernden Heizlasten wider. Mit acht von elf Anlagen wurde der Spitzenwert im Januar 2009 erreicht, gefolgt von sechs Anlagen im Februar 2012. Die früheste Unterschreitung der 0 °C Grenze trat am 15. Oktober 2009, die späteste am 19. Mai 2010 auf. Die äquivalente Auswertung zu den Solevorlauftemperaturen führt zu dem Ergebnis, dass der geringste im Auswertungszeitraum gemessene Tagesmittelwert $0,0\text{ °C}$ beträgt.

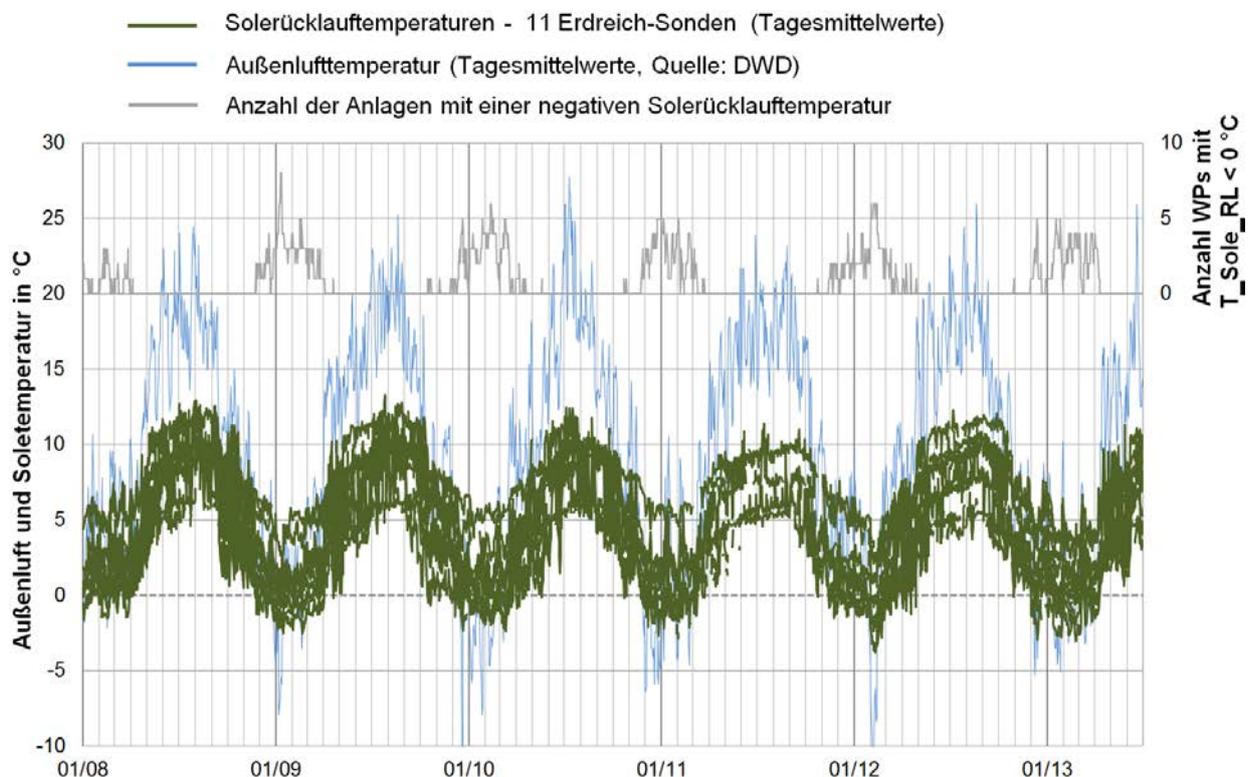


Abb. 73: Solerücklauftemperaturen der Tagesmittelwerte von elf Wärmepumpen mit Erdwärmesonden

Zusammenfassend lassen sich auf Basis dieser Auswertung – und somit des betrachteten Zeitraumes (5,5 a) sowie der betrachteten 11 Anlagen - hinsichtlich der Regenerationsgeschwindigkeit drei zeitliche Horizonte unterscheiden. Über kurzem Zeitraum korrelieren die Soletemperaturen stark mit der Außenlufttemperatur. Nach Abnahme des Wärmeentzugs aus dem Erdreich steigen diese bspw. zügig wieder an. Hierbei sind auch keine Unterschiede zwischen den einzelnen Heizperioden ersichtlich. Innerhalb einer Heizperiode sinkt das Temperaturniveau der Sole, bezogen auf eine bestimmte Außenlufttemperatur, ab. Längerfristig ist jedoch kein Absinken des Soletemperaturniveaus erkennbar.

6 Optimierungspotenzial und festgestellte Fehler

Mit dem Vorgängerprojekt „WP-Effizienz“ wurden im Wesentlichen ähnliche Ziele wie im Rahmen von „WP Monitor“ verfolgt. Die im Endbericht zu „WP-Effizienz“ [Miara et al. 2011] formulierten Kapitel 5 *Regelungsbasierte Probleme und Ableitung von Verbesserungspotenzialen*, Kapitel 8 *Festgestellte Fehler sowie Verbesserungsvorschläge bei Auslegung, Installation und Betrieb* sowie Kapitel 9 *Verantwortung für Effizienz und Effektivität* beschreiben einerseits ausführlich die Grundlagen für effizienten und effektiven Wärmepumpenbetrieb und gehen gleichzeitig auf die in der Felduntersuchung detektierten Probleme ein. Daher werden die nachfolgend im Rahmen von „WP Monitor“ gesammelten Erkenntnisse auch im Kontext der Ergebnisse aus „WP-Effizienz“ betrachtet. Das Optimierungspotenzial wird im Hinblick auf möglichst effizienten Wärmepumpenbetrieb formuliert und leitet sich im Wesentlichen aus den Ergebnissen der Kapitel 5.4 bis 5.7 ab. Die festgestellten Fehler wurden über den gesamten Projektzeitraum dokumentiert. Auf beide Aspekte wird gemeinsam in den folgenden Absätzen eingegangen.

Bereits die **Wahl der Wärmequelle** hat entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpenanlage. In der letzten Auswerteperiode lag die mittlere Temperatur der Außenluft, während die Wärmepumpen mit dieser Wärmequelle in Betrieb waren, bei 3,2 °C. Hierbei handelt es sich um die Temperatur vor Zuführung zum Verdampfer. Für Erdreich-Anlagen lag die mittlere Wärmequellentemperatur und somit der Mittelwert aus Vor- und Rücklauf bei 4,2 °C. Die mit 10,6 °C im Mittel höchsten und gleichzeitig konstantesten Wärmequellentemperaturen wurden für zwei dahingehend auswertbare Grundwasser-WP gemessen. Hinsichtlich der **Auslegung der Wärmequellenanlagen** von Erdreich-WP sei auf das breite Spektrum an gemessenen Wärmequellentemperaturen hingewiesen, welches sich im Vergleich der einzelnen Wärmepumpen ergibt. Dieses bewegt sich zwischen 0,4 °C und 9,0 °C. Den Höchstwert erzielte eine Anlage mit einer Wasser führenden, 300 m tiefen Erdwärmesonde. Die nächst geringere mittlere Soletemperatur einer konventionellen Anlage mit einem durchschnittlichen Anteil der Trinkwasserwärmemenge (17 %; keine überproportionale Betriebszeit im Sommer) beträgt 6,9 °C. Ferner befinden sich unter den Anlagen mit den drei höchsten Jahresarbeitszahlen eine Wärmepumpe mit **Direktverdampfung** und eine weitere mit **CO₂-Sonde**. Welchen Beitrag diese Technologien letztlich hinsichtlich der Wärmequellentemperaturen zu den hohen Jahresarbeitszahlen leisten, kann nicht festgestellt werden. Aufgrund des wesentlich höheren Aufwandes wurden diese Wärmequellen nicht messtechnisch untersucht. Ein weiterer die Wärmequelle betreffender Aspekt ist der Energieverbrauch für den jeweils notwendigen **Antrieb der Wärmequelle**. Dieser macht bei den Luft-Wärmepumpen bspw. im Mittel 6,1 % des Energieverbrauches des Verdichters aus. Hinsichtlich des Optimierungspotenzials stärker von Interesse ist die ermittelte Bandbreite, die von 1,8 bis 12,5 % reicht. Ähnlich verhält es sich für die Solepumpen der Erdreich-Wärmepumpen, deren Energieverbräuche verglichen mit denen des Verdichters zwischen 2,9 % und 9,2 % (Mittelwert 4,9 %) liegen. Die jeweils besseren Ergebnisse zeigen die Einsparpotenziale mit entsprechenden hocheffizienten Antrieben auf. Im „WP-Effizienz“-Projekt erreichten die Ventilatoren im Mittel noch einen Anteil von 7,9 %, die

Solepumpen von 6,5 % (beide Werte bezogen auf den Energieverbrauch von Verdichter und Steuerung). Bei den im Rahmen von „WP-Effizienz“ untersuchten Grundwasser-Wärmepumpen lagen die entsprechenden Anteile der Brunnenpumpen bei 17 %. Die beiden in „WP Monitor“ dahingehend auswertbaren Anlagen kommen auf Werte von 8,6 % und 19,3 %.

Das Optimierungspotenzial hinsichtlich der **Temperaturen** auf Seiten **der Wärmesenke** ist nur schwer abzuschätzen. Einerseits kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelten Temperaturwerte für ausreichenden Komfort gesorgt haben. Andererseits ist es schwer abzuschätzen, inwieweit dies auch mit geringeren Senkentemperaturen möglich gewesen wäre. Für den Zweck der Raumheizung mussten die Wärmepumpen bei ausschließlicher Verwendung von Fußbodenheizungen mittlere Temperaturen zwischen 27 °C und 37 °C bereitstellen. Für die Trinkwassererwärmung lagen die Werte zwischen 40 °C und 56 °C.

Ein ebenfalls auftretendes Problem betrifft das **mangelhafte Lademanagement** beim Einsatz von **Kombispeichern**. Fehlerhaft platzierte Temperatursensoren, mangelhafte Einstellungen in der Regelung oder ungewollte Durchmischung können im Speicher bspw. zu einer Beladung der für die Trinkwassererwärmung und nicht für die Raumheizung vorgesehenen Schicht führen. Hierdurch stellt die Wärmepumpe thermische Energie auf im Mittel höherem Temperaturniveau als eigentlich nötig zur Verfügung. Sowohl in „WP Monitor“ als auch in „WP-Effizienz“ waren etwa 20 % der Wärmepumpen mit Kombispeichern ausgestattet und in beiden Projekten konnte dieses Problem bei mehreren Anlagen beobachtet werden. Dies führte bei einer Luft-Wärmepumpe bspw. zum höchsten Anteil für die Trinkwasserwärmemenge von 58 %. Bei einer anderen Anlage wurde der Kombispeicher aufgrund dieses Problems durch zwei getrennte Speicher ersetzt.

Die **Elektroheizstäbe** der untersuchten Wärmepumpen waren nur selten im Einsatz. In der Auswertungsperiode 2012/13 wurde Heizstabarbeit bei 16 der 35 Luft-Wärmepumpen und sieben der 47 Erdreich-Wärmepumpen festgestellt. Der Energieverbrauch war nur wenigen Fällen signifikant und erreichte maximale Anteil am Elektroenergieverbrauch von 12,5 % bei Außenluft- und 5,2 % bei den Erdreich-Wärmepumpen. Die untersuchten Grundwasser-Wärmepumpen setzten keine Heizstäbe ein. Bei den meisten Wärmepumpen mit Heizstabarbeit, korreliert diese gut mit den Außenlufttemperaturen. Dies spricht für den planmäßigen Einsatz der Heizstäbe bei geringen Temperaturen. Jedoch wurden auch Fehler detektiert. Bei einer Anlage war der Bivalenzpunkt vorübergehend auf 5 °C Außenlufttemperatur eingestellt. Eine andere Anlage mit vergleichsweise hoher Heizstabarbeit wies relativ geringe Laufzeiten auf, was für eine überdimensionierte Anlage spricht, die prinzipiell in den für den Heizstab vorgesehenen Betriebspunkten arbeiten könnte. Wesentlich seltener als bei „WP-Effizienz“ wurde Heizstabbetrieb, bspw. aufgrund von Ausfällen der Anlage oder wegen mangelhafter Einstellungen, gemessen. Als Ausnahme und gleichzeitig Extremfall ist hier ein während der Kernheizperiode (nicht 2012/13) über zwei Monate arbeitender Heizstab zu nennen, der aufgrund des Ausfalles der Brunnenpumpe in Betrieb ging. In diesem Fall dauerte der Austausch der Brunnenpumpe unverhältnismäßig lang.

Ebenfalls größere Unterschiede waren beim **Energieverbrauch der Steuerung** festzustellen. Bezogen auf den Energieverbrauch des Verdichters wur-

den durch die Steuerungen zwischen 0,7 % und 8,8 % mehr verbraucht. Die mittleren elektrischen Leistungen der Steuerung lagen zwischen 5 W und 25 W.

Ein weiterer Aspekt der deutliches, wenn auch schwer quantifizierbares, Optimierungspotenzial aufweist, betrifft die **Anschalthäufigkeit der Wärmepumpen**. Je häufiger eine Wärmepumpe in Betrieb genommen wird, desto größer ist der Anteil der Betriebszeit unter Anfahrbedingungen. Der Feldtest hat gezeigt, dass Wärmepumpen bspw. im Jahresmittel nur drei mal täglich, aber auch 29-mal täglich in Betrieb gehen können. Für mehrere Wärmepumpen konnten in der Übergangszeit Betriebszeiten von unter fünf Minuten detektiert werden, was prinzipiell durch eine in der Regelung definierte Mindestlaufzeit hätte vermieden werden können bzw. sollen.

Ein wesentlicher Fortschritt im Vergleich zum „WP-Effizienz“-Projekt betrifft die Mängel bei den hydraulischen Komponenten. In einem nennenswerten Fall verursachte eine **defekte Rückschlagklappe** die Beladung des Heizungspufferspeichers durch den Trinkwasserspeicher, wenn der Heizkreis aktiv war. Somit wurde ein Teil der Energie zur Raumheizung auf unnötig hohem Niveau bereitgestellt und die Effizienz entsprechend gemindert. Ferner wurden in seltenen Fällen **undichte 3-Wege-Ventile** festgestellt, wodurch sich langsame Speicherentladungen einstellen können.

Zusammenfassend lässt sich im Vergleich zum „WP-Effizienz“-Projekt feststellen, dass die neuen Wärmepumpenanlagen besser geplant und mit größerer Sorgfalt installiert wurden. Wesentlich häufiger kommen Anlagen mit Hocheffizienzpumpen bzw. leistungsgeregelten Ventilatoren in der Wärmequelle zum Einsatz. Heizstäbe wurden häufig gleich abgeklemmt bzw. ausgeschaltet. Einerseits wurden alle im Rahmen von „WP-Effizienz“ detektierten Fehlfunktionen auch bei „WP Monitor“ festgestellt, andererseits traten diese wesentlich seltener auf. Die genannten Aspekte führten somit im Mittel zu besseren Betriebsbedingungen. Zusammen mit den höheren Leistungszahlen (COP) der neuen Wärmepumpen konnte die Bandbreite der JAZ im Vergleich zu „WP-Effizienz“ nach oben hin vergrößert werden. Dennoch wurden auch unter den neuen Anlagen Jahresarbeitszahlen von lediglich 2,5 (Außenluft), 3,5 (Erdreich) und 3,6 (Grundwasser) ermittelt, was weiterhin für ein enormes Optimierungspotenzial spricht.

7 Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Projektes

Über die komplette Projektlaufzeit von „WP Monitor“ 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 von „WP Monitor“ ist die Projekt-Homepage „<https://wp-monitor.ise.fraunhofer.de>“. Neben der Vorstellung allgemeiner Projektinformationen (Ziele, Methodik, Partner, ...), dient diese im Wesentlichen folgenden Aufgaben:

- Information und Aufklärung unterschiedlicher Interessengruppen rund um den realen Betrieb von Wärmepumpenheizungsanlagen
- Kommunikation der Messdaten bzw. Ergebnisse mit den Projektpartnern

Abb. 74: Ausführung der Online-Visualisierung



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 26 Wärmepumpenheizungsanlagen veröffentlicht. Die anonymisierte Online-Visualisierung der Messergebnisse für die Öffentlichkeit erfolgte wie in Abb. 74 dargestellt. Auf der linken Seite (grauer Streifen) werden allgemeine Informationen rund um die untersuchte Anlage sowie dem Gebäude dargestellt. Die rechte Seite umfasst in monatlicher Auflösung den nach einzelnen

Komponenten unterschiedenen Elektroenergieverbrauch und die nach Betriebsmodus aufgeteilte, bereitgestellte thermische Energie. Ebenso wird die daraus resultierende AZ visualisiert. Direkt auf einem Schema zur Visualisierung der installierten Komponenten sowie derer hydraulischen Verschaltung werden die Messergebnisse der letzten sieben Tage angezeigt. Ebenfalls als Tageswerte könne die Temperaturen auf Seiten der Wärmequelle sowie der – senke eingesehen werden. Zusammen mit der Visualisierung dieser Messdaten von unterschiedlichsten Systemen wurde einerseits die Vielfalt an Möglichkeiten aufgezeigt und andererseits allen Interessenten die Möglichkeit eingeräumt, den tatsächlichen Wärmepumpenbetrieb zu verfolgen.

Die Ergebniskommunikation für die Projektpartner erfolgte einerseits auf der Plattform Members Area und andererseits im Rahmen der Seite für Auswertungen und Messdaten. Die Members Area ist ein passwortgeschützter Bereiche, aus dem die Projektpartner sämtliche notwendigen Unterlagen, wie bspw. Installationsanleitungen für die Messtechnik, aber auch die Protokolle und Ergebnispräsentationen von Projekttreffen beziehen konnten. Für die Messdatenübermittlung wurde als Eingangsbereich die ebenfalls passwortgeschützte erste Ebene der bereits vorgestellten anonymisierten Online-Visualisierung genutzt. Über Eingabe eines weiteren Passwortes bestand Zugang auf einer zweite Ebene. Diese umfasst sämtliche Messdaten der betreffenden Anlage. Hierzu zählen die Roh- und die gefilterten Daten. Von allen Sensoren konnten die Messergebnisse in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung angeschaut, heruntergeladen oder in Form von Diagrammen visualisiert werden.

Aktuell wird die Homepage im Rahmen des Projektes „WP Monitor PLUS“ weiter verwendet. Auch die anonymisierte Online-Visualisierung erfolgt weiterhin. Bei Anlagen, die auch im neuen Projekt messtechnisch untersucht werden, aktualisieren sich die Ergebnisse. Die übrigen Anlagen bleiben mit ihren bisherigen Resultaten bestehen.

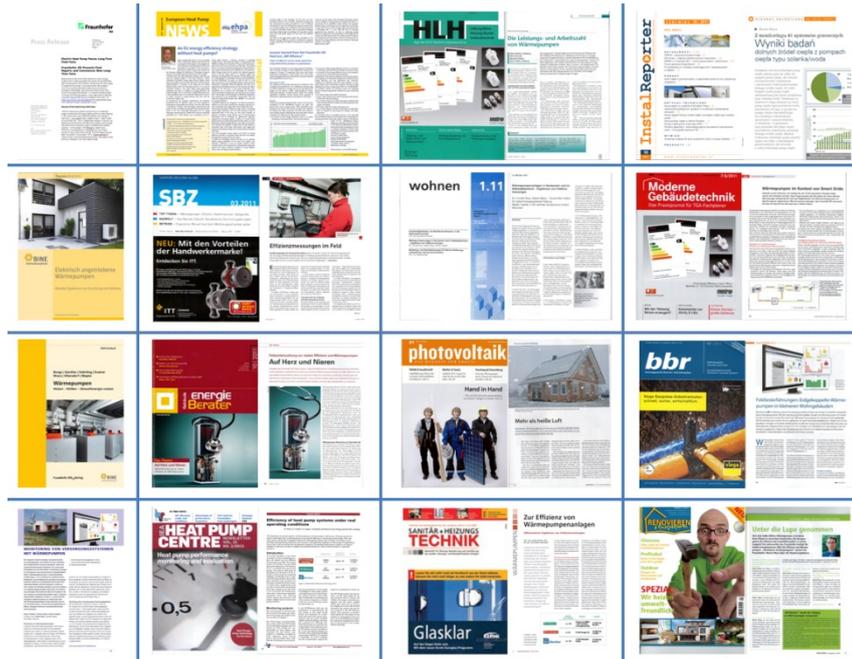
7.2 Vorträge

Im gesamten Projektzeitraum und darüber hinaus wurden Vorträge zu „WP Monitor“ gehalten. Eine Liste der über 50 Veranstaltungen auf denen zwischen Dezember 2009 und Mai 2013 durch den Projektleiter, Herrn Dr.-Ing. Marek Miara, oder durch seine Mitarbeiter Resultate präsentiert wurden, befindet sich im Anhang 8. Die Präsentationen fanden im Rahmen von Fachkongressen, Messen und anderen Fachveranstaltungen in ganz Deutschland sowie vielen anderen Ländern statt.

7.3 Veröffentlichungen in Printmedien und Beiträge Dritter

Im Projektzeitraum wurden knapp 30 gedruckte Veröffentlichungen verfasst. Eine Liste mit Veröffentlichungen, die im Projektzeitraum erfolgten, enthält der Anhang 9. Weitere Veröffentlichungen zum Thema stehen bevor. Hierbei waren und sind die Kanäle sowie die Zielgruppen äußerst verschieden. In der Abb. 75 wird ein kleiner Ausschnitt der bisherigen Publikationen dargestellt. Bei den Fachmagazinen reichen die Veröffentlichung von Beiträgen in branchennahen Blättern wie die „HLH“ oder die „Moderne Gebäudetechnik“ bis hin zu Artikeln in der „Photovoltaik“.

Abb. 75: Auswahl diverser Veröffentlichungen in Fachzeitschriften mit Bezug zu „WP Monitor“



Als offizielle Sprachrohre des Fraunhofer ISE wurden die Möglichkeiten der Pressemitteilungen sowie des Jahresberichtes genutzt. Die Pressestelle des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme ISE hat im April 2011 die Pressemitteilung „Elektrische Wärmepumpen bestehen langjährige Feldtests - Fraunhofer ISE legt Endberichte vor und startet neuen Langzeittest“ herausgegeben. Die Mitteilung fand ein großes Echo in den Fachmedien. Eine Auswahl an Beiträgen Dritter mit Bezug zu „WP Monitor“ ist im Anhang 10 zusammengestellt. Hervorzuheben sind ebenso die Veröffentlichung der BINE-Broschüre „Elektrisch angetriebene Wärmepumpen – Aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Feldtests“ sowie des BINE-Fachbuchs „Wärmepumpen – Heizen, Kühlen, Umweltenergie nutzen“, erschienen im Fraunhofer IRB Verlag (ISBN-print: 978-3-8167-9046-4) und herausgegeben vom FIZ Karlsruhe. Ein wissenschaftlicher Artikel zum Thema wurde für die IEA Heat Pump Conference im Mai 2014 verfasst. Weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen mit den Messergebnissen werden folgen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [Bayer et al. 2013] P. Bayer, L. Rybach, P. Blum, and R. Brauchler
Review on life cycle environmental effects of geothermal power
Generation
Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 26, pp. 446–463, Oct. 2013.
- [BBR 2011] BBR, DWD
Projektbericht Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutsch-
land für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse
Offenbach, 2011
- [Desideri et al. 2011] U. Desideri, N. Sorbi, L. Arcioni, and D. Leonardi
Feasibility study and numerical simulation of a ground source heat pump
plant, applied to a residential building
Appl. Therm. Eng., vol. 31, no. 16, pp. 3500–3511, Nov. 2011
- [DWD 2014] Homepage des Deutschen Wetterdienstes www.dwd.de
→ CDC – climate data center → freie Klimadaten → Klimadaten von 44
Stationen → Zeitreihen an Stationen Tageswerte
Stand: 17.03.2014
- [EnEV 2009] Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29. April
2009 (Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009)
Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23
- [Eslami-Nejad et al. 2014] P. Eslami-Nejad, M. Ouzzane, and Z. Aidoun
Modeling of a two-phase CO₂-filled vertical borehole for geothermal
heat pump applications
Appl. Energy, vol. 114, pp. 611–620, Feb. 2014
- [IWU] Homepage des Institutes für Wohnen und Umwelt www.iwu.de
Tabelle Gradtagzahlen Deutschland Stand: 17.03.2014
- [Jagnow et al. 2010] Jagnow, Horschler, Wolff
Die neue Energieeinsparverordnung 2002
Deutscher Wirtschaftsdienst, 2002
- [Miara et al. 2011] M. Miara, D. Günther, T. Kramer, T. Oltersdorf, J. Wapler
Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärme-
pumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Be-
trieb Endbericht, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2011.

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
AZ	Arbeitszahl(en)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
COP	Coefficient of Performance
DIN	Deutsche Industrie Norm
DWD	Deutscher Wetterdienst
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
GSM	Global System for Mobile Communications
HP	Heat Pump
HS	Heizstab
ID	Identifikation
IEA	Internationale Energie Agentur
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
JAZ	Jahresarbeitszahl(en)
M-Bus	Meter-Bus
MDES	Messdatenerfassungssystem
PS	Pufferspeicher
SP	Solepumpe
SPF	Seasonal Performance Factor
US	Ultraschall
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WP	Wärmepumpe
TAZ	Tagesarbeitszahl(en)

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m ²
E	Fehlergrenze für Rechenwerke	-
f	Faktor Elektroenergie	-
I	Stromstärke	A
P	Leistung	W
Q	Wärmemenge	kWh
q	spezifischer Energieverbrauch	kWh/m ²
T	Temperatur	°C
t	Zeitinkrement	s
\dot{V}	Volumenstrom	l/h
V	Volumen	m ³
W	Energie	kWh
x	Korrelationsniveau	-

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
Δ	Differenz	-
ε	Leistungszahl	-
η	Wirkungsgrad	-
φ	Feuchte	%

Indizes

Symbol	Bezeichnung
BP	Brunnenpumpe
c	Rechenwerk
C	Carnot
el	elektrisch
El	Elektro
f	Ultraschalldurchflusssensor
G	Gütegrad
Gebäude	Gebäude
Heiz	Heizen
high	high
HS	Heizstab
hub	Hub
max	Maximum
mid	middle
min	Minimum
N	Nutz
out	out
o	ohne
p	Nenn
PE	Primärenergie
SKP	Solarkreispumpe
SP	Solepumpe
St	Steuerung
t	Temperatursensorpaare
TWW	Trinkwarmwasser
Vent	Ventilator
Verd	Verdichter
WQ	Wärmequelle
WS	Wärmesenke

Anhang

Anhang 1 Eingesetzte Wärmemengenzähler und deren Fehlergrenzen

Wärmequelle bei Erdreich-Anlagen (Glykol-Wasser-Gemisch)

Nennvolumenströme: $\dot{V}_{Nenn} = 1500\text{ l/h}$, $\dot{V}_{Nenn} = 2500\text{ l/h}$, $\dot{V}_{Nenn} = 3500\text{ l/h}$

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{min} = 3\text{ K}$

Tabelle 5: Charakterisierung der Wärmemengenzählerkomponenten hinsichtlich Typ und Messfehler für Wärmequelle Erdreich

Wärmemengenzähler / Komponenten	Bezug / Hersteller	Typ
Mehrstrahlzähler	Elster Messtechnik GmbH	MTH-R-I-K
Temperatursensorpaar	Elster Messtechnik GmbH	TL045 (2-Leiter)
Rechenwerk	Elster Messtechnik GmbH	F4

Messfehler	Richtlinie / Norm	Klasse (Auflösung)	Fehlergrenzen
Mehrstrahlzähler	79/830/EWG	A (1Liter / Impuls)	vgl. Abb. 76
Temperatursensorpaar	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 78
Rechenwerk	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 79

Wärmequelle Grundwasser

Nennvolumenströme: $\dot{V}_{Nenn} = 1500\text{ l/h}$, $\dot{V}_{Nenn} = 2500\text{ l/h}$, $\dot{V}_{Nenn} = 3500\text{ l/h}$

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{min} = 3\text{ K}$

Tabelle 6: Charakterisierung der Wärmemengenzählerkomponenten hinsichtlich Typ und Messfehler für Wärmequelle Grundwasser

Wärmemengenzähler / Komponenten	Bezug / Hersteller	Typ	
Ultraschall (US) Kompaktwärmemengenzähler	Elster Messtechnik GmbH	F96	
Messfehler	Richtlinie / Norm	Klasse	Fehlergrenzen
Temperatursensorpaar	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 77
Rechenwerk	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 78
US-Durchflusssensor	DIN EN 1434-1	3	vgl. Abb. 79

Thermische Solaranlage (Glykol-Wasser-Gemisch)

Nennvolumenstrom: $\dot{V}_{Nenn} = 1500\text{ l/h}$

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{min} = 3\text{ K}$

Tabelle 7: Charakterisierung der Wärmemengenzählerkomponenten hinsichtlich Typ und Messfehler für Wärmequelle Solaranlage

Wärmemengenzähler / Komponenten	Bezug / Hersteller	Typ	
Einstrahlzähler	Elster Messtechnik GmbH	ETDA-KGmHM	
Temperatursensorpaar	Elster Messtechnik GmbH	TL045 (2-Leiter)	
Rechenwerk	Elster Messtechnik GmbH	F4	
Messfehler	Richtlinie / Norm	Klasse (Auflösung)	Fehlergrenzen
Einstrahlzähler	79/830/EWG	A (10 Liter / Impuls)	vgl. Abb. 76
Temperatursensorpaar	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 78
Rechenwerk	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 79

Wärmesenke Heizkreis und Trinkwarmwasser

Nennvolumenströme: $\dot{V}_{Nenn} = 1500\text{ l/h}$, $\dot{V}_{Nenn} = 2500\text{ l/h}$, $\dot{V}_{Nenn} = 3500\text{ l/h}$

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{\min} = 3\text{ K}$

Tabelle 8: Charakterisierung der Wärmemengenzählerkomponenten hinsichtlich Typ und Messfehler für Wärmesenke

Wärmemengenzähler / Komponenten		Bezug / Hersteller	Typ
Ultraschall (US) Kompaktwärmemengenzähler		Elster Messtechnik GmbH	F96
Messfehler	Richtlinie / Norm	Klasse	Fehlergrenzen
Temperatursensorpaar	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 77
Rechenwerk	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 78
US-Durchflusssensor	DIN EN 1434-1	3	vgl. Abb. 79

Trinkwarmwasserentnahme

Nennvolumenstrom V100: $\dot{V}_{Nenn} = 1500\text{ l/h}$ (Richtlinie 75/33/EWG)

Dauerdurchfluss V200: $\dot{V}_3 = 2500\text{ l/h}$ (Richtlinie 2004/22/EG)

Minimale Temperaturdifferenz: $\Delta T_{\min} = 3\text{ K}$

Tabelle 9: Charakterisierung der Wärmemengenzählerkomponenten hinsichtlich Typ und Messfehler für Trinkwarmwasserentnahme

Wärmemengenzähler / Komponenten		Bezug / Hersteller	Typ
Temperatursensorpaar		Elster Messtechnik GmbH	TL045 (2-Leiter)
Rechenwerk		Elster Messtechnik GmbH	F22
Ringkolbenzähler (Kaltwasserzähler)		Elster Messtechnik GmbH	V100
Ringkolbenzähler (Kaltwasserzähler)		Elster Messtechnik GmbH	V200
Messfehler	Richtlinie / Norm	Klasse (Auflösung)	Fehlergrenzen
Temperatursensorpaar	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 77
Rechenwerk	DIN EN 1434-1	/	vgl. Abb. 78
Ringkolbenzähler V100	75/33/EWG	C (0,5 Liter / Impuls)	vgl. Abb. 80
Ringkolbenzähler V200	2004/22/EG	R160 (1 Liter / Impuls)	vgl. Abb. 80

Abb. 76: Fehlergrenzen für die Einstrahl- und Mehrstrahlzähler nach Richtlinie 79/830/EWG

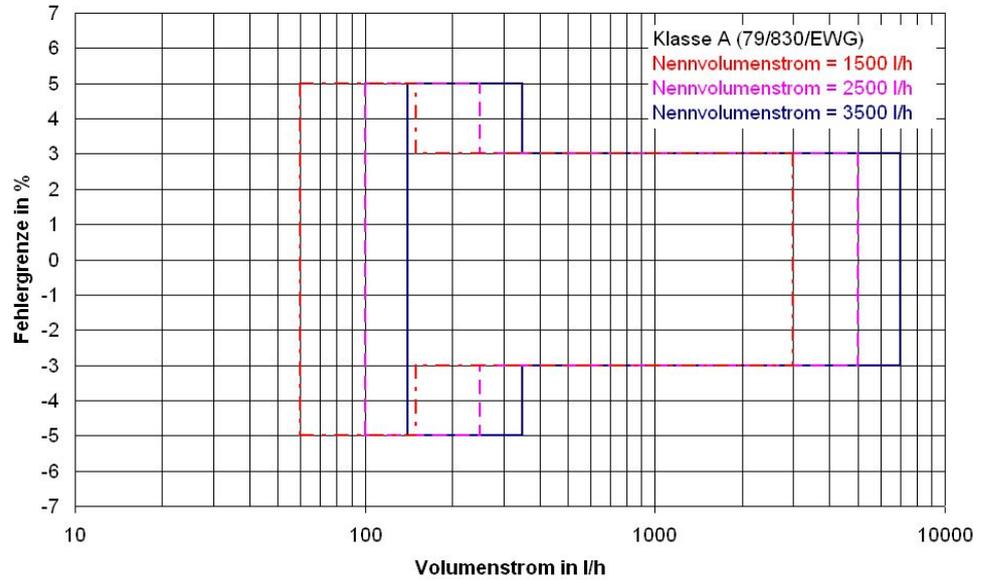


Abb. 77: Fehlergrenze E_t für die Temperatursensorköpfe nach DIN EN 1434-1, Minimale Temperaturdifferenz = 3K

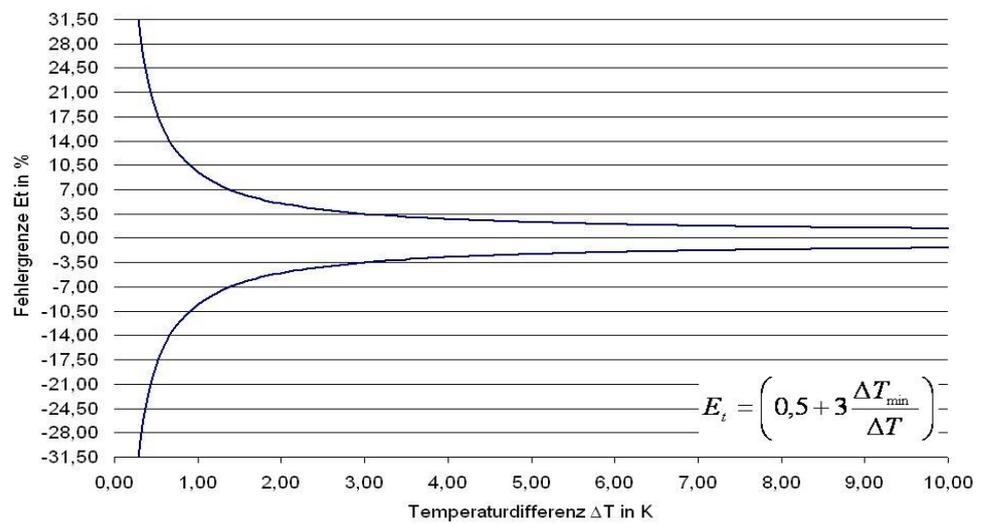


Abb. 78: Fehlergrenze E_c für die Rechenwerke nach DIN EN 1434-1, Minimale Temperaturdifferenz = 3K

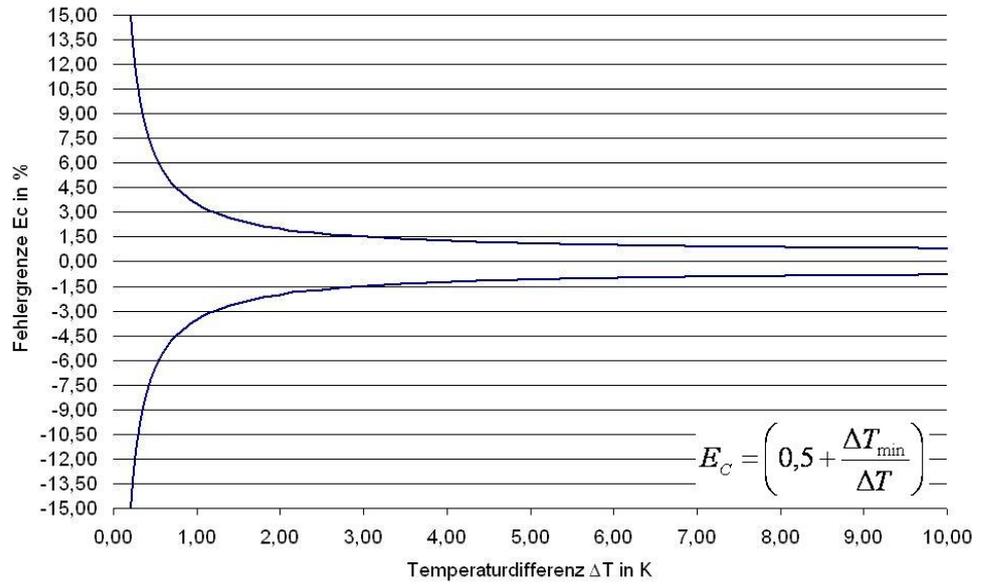


Abb. 79: Fehlergrenzen E_f für die Ultraschalldurchflusssensoren nach DIN EN 1434-1, Klasse 3

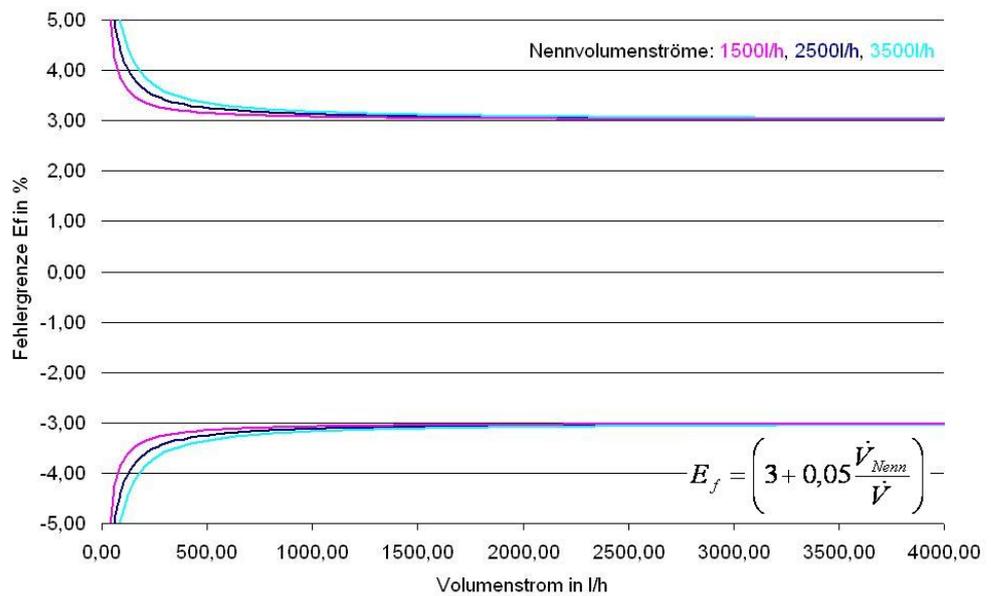
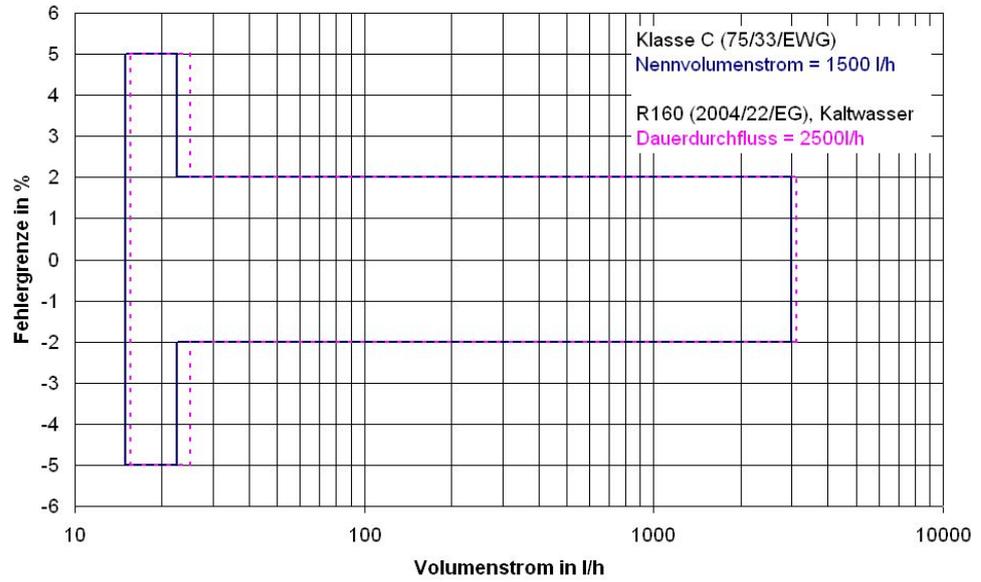


Abb. 80: Fehlergrenzen für die Ringkolbenzähler nach Richtlinie 75/33/EWG und 2004/22/EG



Anhang 2

Wechselstromzähler Phase I

Tabelle 10: Charakterisierung der in Phase I verwendeten Elektrozähler

Komponenten		Bezug / Hersteller		Typ
Wechselstromzähler		Saia-Burgess		AAD1
Messfehler	Norm	Klasse	Fehlergrenzen	Nennstrom
Wechselstromzähler	DIN EN 62053-21	1	vgl. Tabelle 14	$I_b = 5A$

Wechselstromzähler Phase II

Tabelle 11: : Charakterisierung der in Phase II verwendeten Elektrozähler

Komponenten		Bezug / Hersteller		Typ
Wechselstromzähler		EMU Elektronik AG		12.x1m
Messfehler	Norm	Klasse	Fehlergrenzen	Nennstrom
Wechselstromzähler	DIN EN 62053-21	2	vgl. Tabelle 14 Fehler! Verweisquelle	$I_b = 5A$

Drehstromzähler Phase I

Tabelle 12: Charakterisierung der in Phase I verwendeten Elektrozähler

Komponenten		Bezug / Hersteller		Typ
Drehstromzähler		Saia-Burgess		AAE3
Messfehler	Norm	Klasse	Fehlergrenzen	Nennstrom
Drehstromzähler	DIN EN 62053-21	1	vgl. Tabelle 14 Fehler! Verweisquelle	$I_b = 10A$

Drehstromzähler Phase II

Tabelle 13: Charakterisierung der in Phase II verwendeten Elektrozähler

Komponenten		Bezug / Hersteller		Typ
Drehstromzähler		EMU Elektronik AG		32.x1M
Messfehler	Norm	Klasse	Fehlergrenzen	Nennstrom
Drehstromzähler	DIN EN 62053-21	2	vgl. Tabelle 14	$I_b = 5A$

Die Fehlergrenzen

Tabelle 14: Nennung der Fehlergrenzen für die vorgestellten Elektroenergiezähler nach DIN EN 62053-21

Wert des Stroms	Leistungsfaktor	Fehlergrenzen in %	
		Klasse 1	Klasse 2
$0,05 \cdot I_b \leq I < 0,1 \cdot I_b$	1	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$
$0,1 \cdot I_b \leq I \leq I_{\max}$	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
$0,1 \cdot I_b \leq I < 0,2 \cdot I_b$	0,5 induktiv	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$
$0,2 \cdot I_b \leq I \leq I_{\max}$	0,5 induktiv	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$

Anhang 3 Eingesetzte Temperaturfühler zur Außentemperaturermittlung

Phase I

Tabelle 15: Charakterisierung der Außentemperaturfühler aus Phase I

Komponenten	Bezug / Hersteller	Typ
Temperaturfühler mit Halbleitersensor	HYGROSENS INSTRUMENTS GmbH	DS 1820
Schnittstelle Fühler / Datenerfassung	Fraunhofer ISE	-
Messfehler	Genauigkeit	
Temperaturfühler mit Halbleitersensor	$\pm 0,5K$ (laut Hersteller, bei 23 °C, 0...70 °C, Verschlechterung der Genauigkeit hin zu den Grenzen)	
Schnittstelle Fühler / Datenerfassung	-	

Phase II

Tabelle 16: Charakterisierung der Außentemperaturfühler aus Phase II

Komponenten	Bezug / Hersteller	Typ
Temperaturfühler PT100	JUMO	Typenblatt 90.2523
2-Kanal Analog Eingangsklemme für Widerstandssensoren (Schnittstelle Fühler / Datenerfassung)	WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG	750-461
Messfehler	Genauigkeit	
Temperaturfühler PT100	Klasse B nach DIN EN 60 751	
2-Kanal Analog Eingangsklemme für Widerstandssensoren (Schnittstelle Fühler / Datenerfassung)	$< \pm 0,2\%$ vom Skalenendwert (-200 °C...850 °C, laut Hersteller, bei 25 °C Einsatztemperatur)	

Anhang 4

Zusammenfassung ausgewählter Eigenschaften der Erdreich-Wärmepumpen

ID	Bereits in "WP-Effizienz" geregelter Verdichter	Erdwärmekollektor	Solarthermie (TW)	Solarthermie (TW + Heizung)	Fläche Solaranlage in m²	CO2-Sonde	Energiezaun	WQ + Energiezaun	WQ + Abbluff	Direktverdampfung	300m tiefe Sonde, Medium Wasser	Anzahl Sonden	Gesamtlänge Sonden in m	Bohrtiefe in m	Fläche Erwärmerkollektor in m²	Pufferspeicher	Pufferspeicher - in Reihe	Pufferspeicher - parallel	ohne Pufferspeicher	Kombispeicher	Fußboden-/Wandheizung	Radlatoren	kombinierte Systeme	freistehendes Haus	Doppelhaus	Reihenhaus	Gebaudefläche in m²	absoluter Heizenergieverbrauch 07/12-06/13 in kWh	spezifischer Heizenergieverbrauch 07/12-06/13 in kWh/m²	absoluter Trinkwasserwärmeverbrauch in kWh*	spezifischer Trinkwasserwärmeverbrauch in kWh*
103	X											2	140	70		X				X							190	21017	111	2060	11
104	X											3	120	40						X					X		130	13226	102	2520	19
106	X											2	152	76		X			X					X			200	12269	61	1478	7
107												1	95	95		X	X			X			X				159	10284	65	3820	24
110	X											2	110	55				X	X	X				X			160	10644	67	5275	33
112	X											3	174	58				X	X	X			X				252	16094	64	2438	10
114	X																	X	X	X							238	9727	41	1047	4
115	X		X												280	X			X	X			X				170	24314	143	1690	10
116		X	X							X					330	X			X	X			X				270	28075	104	4661	17
120	X		X												160	X			X	X					X		135	7397	55	1718	13
121	X											1	128	128					X	X				X			216	6258	29	2289	11
125	X											2	182	91		X		X					X				189	13300	70	4289	23
126	X		X		4,1										115								X				140	10138	72	1813	13
128		X		X	12,6										400				X	X			X				200	9331	47	6967	35
129												1	96	96					X	X			X				208	8407	40	2093	10
132	X									X		1	300	300					X	X			X				320	37990	119	1880	6
135	X											2	170	85					X	X			X				250	19833	79	3218	13
138	X											2	198	99					X	X			X				202	8990	45	3779	19
144	X											2	110	55					X	X							240	8192	34	2542	11
145	X											1	97	97					X				X				143	6774	47	2837	20
147	X											1	160	160		X	X			X			X				166	13489	81	2068	12
148	X											1	80	80					X	X			X				142	7079	50	1868	13
149	X											2	160	80					X	X			X				276	20203	73	0	0
153	X			X	14,5							2	130	65					X	X				X			190	14339	75	1254	7
157	X											2	160	80					X	X			X				200	9851	49	4586	23
158	X											1	120	120					X	X			X				270	14756	55	2628	10
160		X				X						2	170	85					X	X			X				169	14002	83	4663	28
162	X											2	170	85		X	X					X					180	13899	77	1219	7
172				X	8,0							1	96	96					X	X			X				235	26214	112	2686	11
173	X											1	96	96					X	X			X				320	21172	66	609	2
174	X		X		k.A.							1	180	180					X	X			X				167	10637	64	3214	19
175	X		X												115				X	X			X				173	17495	101	3275	19
176	X		X												180				X	X			X				175	22186	127	6463	37
177		X		X	12,0										400				X	X			X				175	13350	76	2305	13
178	X						X												X	X			X				153	10569	69	2813	18
182	X	X		X	12,0										115				X	X			X		X		225	16222	72	3978	18
183	X											1	130	130		X	X			X			X				150	11447	76	2536	17
187		X								X						X	X			X			X				250	7377	30	1366	5
188																			X	X			X				252	15315	61	4059	16
189	X	X						X							100				X	X			X				292	11654	40	3149	11
190												2	150	75		X	X			X			X				208	13215	63	4426	21
191			X		5,0											X	X					X					176	17615	100	1355	8
192	X											4	120	30					X	X			X				187	11385	61	6641	36
194			X		4,6			X											X	X			X				142	6926	49	751	5
195	X	X						X							120				X	X			X				260	16614	64	4442	17
288	X		X		5,0							4	220	55		X	X			X			X				280	14820	53	3089	11
315			X		5,1											X	X			X			X				240	11724	49	2362	10

* Trinkwasserwärmebedarf als konstant angenommen und über Datenlücken linear extrapoliert

ID	bereits in "WP-Effizienz" geregelter Verdichter	Spitgerät	Solarthermie (TW)	Solarthermie (TW + Heizung)	Fläche Solaranlage in m ²	+ Erdwärmekollektor	Sole zwischen Außen-/Inneneinheit	Pufferspeicher	Pufferspeicher - in Reihe	Pufferspeicher - parallel	ohne Pufferspeicher	Kombispeicher	Fußboden-Wandheizung	Radiatoren	kombinierte Systeme	freistehendes Haus	Reihenhaus	Doppelhaus	Gebäudefläche in m ²	absoluter Heizenergieverbrauch 07/12-06/13 in kWh	spezifischer Heizenergieverbrauch 07/12-06/13 in kWh/m ²	absoluter Trinkwasserwärmeverbrauch in kWh*	spezifischer Trinkwasserwärmeverbrauch in kWh*
101	X							X		X			X			X			208	19695	95	1434	7
102								X	X				X			X			280	15753	56	7505	27
105	X							X	X				X			X			167	11652	70	1788	11
108								X	X				X			X			125	10637	85	983	8
111	X									X			X			X			185	14689	80	4878	26
113		X						X	X				X			X			195	18418	94	3217	16
119		X	X							X					X	X			185	21089	114	1708	9
122								X	X				X			X			145	11947	82	3492	24
123		X	X							X			X			X			115	7142	62	2234	19
124	X			X	7,6							X			X	X			170	15538	91	3879	23
127	X							X	X				X					X	133	7835	59	4387	33
131	X							X	X				X			X			165	6754	41	3908	24
136	X										X	X						X	139	5154	37	7358	53
140	X							X	X				X			k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	9853		2252	
141								X	X				X			X			161	9626	60	2911	18
142	X							X	X				X			X			138	22053	160	2773	20
146								X	X						X			X	101	5181	51	1408	14
151								X	X				X			X			190	12448	66	2396	13
154								X	X				X			X			205	9391	46	2921	14
155								X	X				X			X			129	6924	54	1510	12
159	X										X	X				X			169	7615	45	4035	24
165	X					X	X			X			X			X			170	5925	35	3394	20
166								X	X				X			X			k.A.	26589		10466	
167								X	X					X		X			170	34416	202	2183	13
169	X										X	X				X			179	13157	74	8043	45
179								X	X				X			X			127	9894	78	2555	20
180								X	X				X			X			151	12931	86	2200	15
185		X	X	X	5,0			X	X				X			X			115	16348	142	318	3
186								X	X				X			k.A.	k.A.	k.A.	108	8249	76	2181	20
193	X	X						X	X				X			X			161	8589	53	1840	11
197											X	X				X			200	15357	77	2125	11
295		X	X							X			X			k.A.	k.A.	k.A.	127	8377	66	2453	19
301			X					X	X				X			X			120	7712	64	4928	41
302							X					X	X					X	164	10960	67	3654	22
307							X					X		X		X			210	36934	176	4386	21

* Trinkwasserwärmebedarf als konstant angenommen und über Datenlücken linear extrapoliert

Anhang 6

Zusammenfassung ausgewählter Eigenschaften der Wasser-Wärmepumpen

ID	bereits in "WP-Effizienz" geregelter Verdichter	Spitgerät	Solarthermie (TW)	Solarthermie (TW + Heizung)	Fläche Solaranlage in m²	+ Erdwärmekollektor	Sole zwischen Außen-/Inneneinheit	Pufferspeicher	Pufferspeicher - in Reihe	Pufferspeicher - parallel	ohne Pufferspeicher	Kombispeicher	Fußboden-/Wandheizung	Radiatoren	kombinierte Systeme	freistehendes Haus	Reihenhaus	Doppelhaus	Gebäudefläche in m²	absoluter Heizenergieverbrauch 07/12-06/13 in kWh	spezifischer Heizenergieverbrauch 07/12-06/13 in kWh/m²	absoluter Trinkwasserwärmeverbrauch in kWh*	spezifischer Trinkwasserwärmeverbrauch in kWh*
152	X										X						X		162	41282	255	2201	14
156	X							x		x			X				X		177	10050	57	2391	14
164								x	x				X			X			310	11297	36	2844	9
171	X			X	k.A.							X			X	X			200	11498	57	0	0
328								x	x				X			X			150	25448	170	5617	37

* Trinkwasserwärmebedarf als konstant angenommen und über Datenlücken linear extrapoliert

Anhang 7

Zusammenfassung der monatlichen Gradtagzahlen sowie die Anzahl der Heiztage an verschiedenen Messstationen (Quelle: [DWD 2014])

			Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Summe
Frankfurt	2012/13	Gradtagzahl	0	0	120	308	407	504	564	529	534	271	190	48	3474
		Heiztag	0	0	17	29	30	31	31	28	31	23	24	8	252
	langjähriges Mittel	Gradtagzahl	15	15	111	298	437	541	572	497	426	290	140	52	3396
Berlin	2012/13	Gradtagzahl	10	0	90	312	423	587	609	546	637	300	141	46	3702
		Heiztag	2	0	13	30	30	31	31	28	31	24	18	7	245
	langjähriges Mittel	Gradtagzahl	18	20	124	308	450	563	602	527	470	317	148	59	3606
Düsseldorf	2012/13	Gradtagzahl	16	6	141	273	386	473	553	524	540	297	221	87	3516
		Heiztag	3	1	19	26	30	31	31	28	31	24	26	13	263
	langjähriges Mittel	Gradtagzahl	24	24	113	265	396	498	526	467	419	303	156	72	3262
Hamburg	2012/13	Gradtagzahl	51	11	152	309	421	569	581	544	634	364	206	114	3954
		Heiztag	9	2	19	28	30	31	31	28	31	28	24	17	278
	langjähriges Mittel	Gradtagzahl	45	43	157	317	439	545	579	516	482	352	204	103	3782
München	2012/13	Gradtagzahl	22	13	154	358	455	589	619	608	575	321	228	118	4059
		Heiztag	4	2	19	30	30	31	31	28	31	27	25	15	273
	langjähriges Mittel	Gradtagzahl	28	29	164	335	490	607	638	548	478	314	152	66	3849
Mittelwert der fünf Stationen	2012/13	Gradtagzahl	20	6	131	312	419	544	585	550	584	311	197	82	3741
		Heiztag	4	1	17	29	30	31	31	28	31	25	23	12	262
	langjähriges Mittel	Gradtagzahl	26	26	134	305	442	551	583	511	455	315	160	71	3579
		Heiztag	4	4	17	29	30	31	31	28	31	27	19	10	262

Anhang 8 Vorträge mit Inhalten aus dem „WP Monitor“-Projekt

Datum	Ort	Anlass/ Gastgeber /Veranstaltung	Titel
29. Oktober 2009	Karlsruhe, Deutschland	Wärmepumpen Symposium	FELDTESTERFAHRUNGEN
23./24. Februar 2010	Bilbao, Spanien	First Annual Conference of the European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling	INTEGRATING HEAT PUMPS AND SOLAR THERMAL ENERGY
25. Februar 2010	Stuttgart, Deutschland	CEP Clean Energy & Passivehouse 2010	SOLARTHERMIE UND WÄRMEPUMPEN
22./23. April 2010	Kassel, Deutschland	8. GRE- Kongress	FELDMESSUNG NEUER WÄRMEPUMPEN
12. Mai 2010	Berlin, Deutschland	11. Berliner Energietage	FELDMESSUNG NEUER WÄRMEPUMPEN
09. Juni 2010	Stuttgart, Deutschland	1. VDI-Fachkonferenz	FELDTESTERGEBNISSE FÜR SOLE- UND LUFT-WÄRMEPUMPEN
07. Oktober 2010	Berlin, Deutschland	8. Forum Wärmepumpen	ERGEBNISSE DES FRAUNHOFER-ISE FELDTTESTS WEBBASIERTES MONITORING VON WP-ANLAGEN
23. November 2010	Stuttgart, Deutschland	Universität Stuttgart	EFFIZIENZ VON WÄRMEPUMPENSYSTEMEN
8. März 2011	Karlsruhe, Deutschland	DKV Unterbezirksverein Karlsruhe	EFFIZIENZ DER WÄRMEPUMPENSYSTEME UNTER REALEN NUTZUNGSBEDINGUNGEN WEBBASIERTES MONITORING VON WP-ANLAGEN
11. März 2011	Freiburg im Breisgau, Deutschland	Besuch des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme ISE einer Delegation aus Japan	Heat Pump Group Large Scale Monitoring Projects and Results with Focus on GSHPs
14. April 2011	Brüssel, Belgien	European Union Sustainable Energy Week	Lab vs. field measurements - Experiences from the Fraunhofer ISE projects
4. Mai 2011	Köln, Deutschland	4. Europäischer Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz (EBH 2011)	WIE EFFIZIENT SIND WÄRMEPUMPEN UNTER REALEN BEDINGUNGEN ?
13. Mai 2011	Freiburg, Deutschland	geoENERGIE-Tagung	Wie effizient sind Wärmepumpen tatsächlich? - Ergebnisse mehrjähriger Feldtests
01. Juni 2011	Freiburg, Deutschland	WORKSHOP UPONOR	Results of long-term heat pump monitoring in the residential new buildings and the building stock
07. Juni 2011	Frankfurt, Deutschland	2. VDI Konferenz Wärmepumpen	Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Langzeit-Wärmepumpen-Monitoring „WP-Effizienz - ...und erste Ergebnisse aus neuem Projekt „WP Monitor“
08. Juni 2011	München, Deutschland	Intersolar 2011	Performance of Systems – Results from Large Monitoring Campaigns
22. Juni 2011	Warschau, Polen	Kongres PORT PC	POMPY CIEPŁA – EGZAMIN PRAKTYCZNY
27. Juni 2011	Freiburg, Deutschland	Wärmetechnisches Kolloquium der Technischen Bergakademie Freiberg	EFFIZIENZ VON WÄRMEPUMPENSYSTEME
27. Juni – 31. August 2011		10th IEA HP Conference 2011 Website Conference	SYSTEM BOUNDARIES FOR SPF-CALCULATION
09. Juli 2011	Freiburg im Breisgau, Deutschland	Tag der offenen Tür (30 Jahre Fraunhofer ISE)	Wärmepumpen
11. September 2011	Sint-Katelijne-Waver, Belgien	Warmtepomp Symposium	Conversion of heat and power markets - new heat pumps generation
14. September 2011	Sint-Katelijne-Waver, Belgien	Warmtepomp Symposium	FIELD-TESTS OF NEW HEAT PUMPS IN GERMANY
27.-28. September 2011	Regensburg, Deutschland	11. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie	Feldtesterfahrungen: Erdgekoppelte Wärmepumpen in kleinen Wohngebäuden
29. September 2011	Nürnberg, Deutschland	Workshop Annex 32, Heat Pump Summit 2011	Field monitoring results of more than 100 residential heat pumps
11. Oktober 2011	Freiburg im Breisgau, Deutschland	FuE im Atrium Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme Freiburg	Wärmepumpenaktivitäten am Fraunhofer ISE - von Materialforschung bis Monitoring und von Kälte bis Wärme
13. Oktober 2011	Freiburg im Breisgau, Deutschland	Energetiouren 2011 – Innovationen begreifbar	Wärmepumpe-Effizienz – Erfahrungen aus mehrjährigen Feldtest
18. Oktober 2011	Brüssel, Belgien	Conference hosted by the Polish Presidency	Lessons learned from field trials on system design
19. Oktober 2011	Berlin, Deutschland	Jahreskonferenz Erneuerbare Energien	Potenziale elektrisch betriebener Wärmepumpen - Ergebnisse aus mehreren Felduntersuchungen: Effizienz von Erdreich- und Luft-Wärmepumpen, Energieeinsparpotenziale, Wärmepumpen im Smart Grid?
21. Oktober 2011	Duisburg, Deutschland	11. Wärmepumpen Fachtagung	Untersuchung der Wärmepumpenanlagen unter realen Bedingungen
26. Oktober 2011	München, Deutschland	Bauzentrum München - Abendforum	Wärmepumpen Monitoring: Reale Effizienz in Alt- und Neubau
26. Oktober 2011	Hannover, Deutschland	4. Norddeutsche Geothermietagung	Effizienz von Wärmepumpen: Ergebnisse eines Feldtests
27.-28. Oktober 2011	Freiburg im Breisgau, Deutschland	Local Renewables Freiburg 2011 Green Buildings and Renewable Energy: The Way Forward in Urban Development	Heat pumps: effective contribution to energy efficiency?

17. November 2011	Aachen, Deutschland	DKV Tagung 2011	Effizienz von Wärmepumpenanlagen: Ergebnisse aus Felduntersuchungen
24. November 2011	Salzburg, Österreich	3. Österreichisches Wärmepumpen Forum	Feldtesterfahrungen: Erdgekoppelte Wärmepumpen in kleinen Wohngebäuden
28. November 2011	Berlin, Deutschland	Expertentreffen des BWP und der DGS	Die Effizienz von Wärmepumpenanlagen im Feldtest
2. Februar 2012	Karlsruhe, Deutschland	KIT - Seminar Strömungs-maschinen und Strömungssysteme	Wärmepumpen für Gebäudeanwendung - Status und neue Ansätze
29. Februar 2012	Offenburg, Deutschland	PraxisForum Erdwärme	Einflüsse auf die Arbeitszahlen von Wärmepumpen
06. März 2012	Brüssel, Belgien	EPP Group in the European Parliament: Breakfast debate hosted by MEP Dr. Paul Rübig Less dependence, more efficiency: why heat pumps are key to an Energy Efficient Europe	Panel discussion "Less dependence, more efficiency: why heat pumps are key to an Energy Efficient Europe"
07. Mai 2012	Mailand, Italien	EHPA-SEPAMO event	Performance is improving: Experience from field tests
22. Mai 2012	Essen, Deutschland	Workshop E.ON Ruhrgas AG	Performance is improving: Experience from field tests
4. Juli 2012	Freiburg im Breisgau, Deutschland	SOG Runde	Wärmepumpen im intelligenten Energieversorgungssystem
01.-03. Oktober 2012	Hannover, Deutschland	GeoHannover 2012	Effizienz von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen: Ergebnisse aus Feldmessungen
18. Oktober 2012	Warschau, Polen	Kongres PORT PC	RÓŻNE ASPEKTY OCENY POMP CIEPŁA Specyfika rynków różnych krajów
25.-26. Oktober 2012	Bremen, Deutschland	III. International Conference - Low Temperature and Waste Heat Use in Communal and Industrial Supply Systems	Effizienz von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen: Ergebnisse aus Feldmessungen
22. Februar 2013	Bad Dübau, Deutschland	Fachtagung Brunnenbau, Spezialtiefbau und Geotechnik	Feldtesterfahrungen: Erdgekoppelte Wärmepumpen in kleinen Wohngebäuden
07. März 2013	Karlsruhe, Deutschland	Fachsymposium: Kalte Nahwärme und Eisspeicher	Verfahren zur Vermessung einer Eisspeicheranlage
8. April 2013	München, Deutschland	DKV Bezirksverein München	Effizienz von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen: Ergebnisse aus Feldmessungen
15. Mai 2013	Brüssel, Belgien	6th EHPA European Heat Pump Forum	Conversion of heat and power markets – new heat pumps generation
28. Mai 2013	Allendorf, Deutschland	Viessmann Wärmepumpen-Forum	Wärmepumpen im Feldtest
11-12. Juni 2013	Frankfurt, Deutschland	4. VDI Wärmepumpen-Konferenz	Wärmepumpen im Feldtest
19. August 2013	Düsseldorf, Deutschland	Workshop WP+SG in NRW	Wärmepumpen als DSM-Instrument
09. September 2013	Sint-Katelijne-Waver, Belgien	Warmtepomp Symposium	Conversion of heat and power markets - new heat pumps generation
26.-28. September 2013	Xi'an, China	New Energy Forum 2013	Outcomes of the Europe-Largest Heat Pumps Monitoring Campaign for Family Dwellings in Germany
17. Oktober 2013	Warschau, Polen	II Kongres PORT PC	Szacowanie współczynnika efektywności wg wytycznych VDI, znaczenie efektywności pomp ciepła w Europie i na świecie
24.-25. Oktober 2013	Freiburg im Breisgau, Deutschland	Jahrestagung 2013 des Forschungs-Verbands Erneuerbare Energien	Systemkonformer Einsatz von FEE-Überschussstrom in Stromwärmeeanwendungen
13. November 2013	Tokio, Japan	IEA HPP WORKSHOP	Recent status of fuel driven heat pump
14. November 2014	Essen, Deutschland	Geothermiekongress	Wärmepumpen im Feldtest
12. Februar 2014	Frankfurt, Deutschland	OTTI-Fachforum Luft-/Wasser-Wärmepumpen im Gebäudebestand – Chancen und Risiken	Monitoring von Bestandsanlagen
07. April 2014	Hamburg, Deutschland	Fachkreis Effizient Bauen	Wärmepumpen-Effizienz – Erfahrungen aus mehrjährigen Feldtest
16. Mai 2014	Montréal, Kanada	7th Geothermal Heat Pump Business and Policy Forum	Outcomes from the Wide-Scale Monitoring Campaign of Heat Pumps in Family Dwellings in Germany
10. Juni 2014	Warschau, Polen	Konferenz, AHK- Geschäftsreise	(Hybride) Wärmepumpen im Smart Grid

Anhang 9 Gedruckte Beiträge mit Inhalten aus dem „WP Monitor“-Projekt

Titel	Zeitschrift	Seiten
Country in focus: Field measurements in Germany Measurement of efficiency: Fraunhofer results from 100 new and 100 used buildings.	European Heat Pump News – December 2009	8 - 9
Erdgekoppelte Wärmepumpen für Neubauten	Bine Informationsdienst 03/2010	1 - 4
Wyniki monitoringu pomp ciepła w Niemczech w latach 2008-2009, Efektywnosc pomp ciepła potwierdzona w rzeczywistych warunkach pracy	Polski Instalator (Polen) 04/2010	78 - 81
Wärmepumpenanlagen in Neubauten und im Gebäu- debestand – Ergebnisse von Feldtestmessungen	Wohnen – Zeitschrift der Wohnwirtschaft Bayern 02/11	10 - 16
Sprawność pomp ciepła w realnych warunkach użytkowania	InstalReporter (Polen) 02/2011	12 - 16
Effizienzmessungen im Feld	SBZ – Sanitär, Heizung, Klima 03/11	14 - 19
Effizienz von Wärmepumpensystemen unter realen Nutzungsbedingungen	Moderne Gebäudetechnik 04/2011	22 - 25
Elektrische Wärmepumpen bestehen Feldtests	Technik, Mai 2011- Nr. 5	49
Wärmepumpen im Kontext von Smart Grids	Moderne Gebäudetechnik 7-8/2011	24 - 25
Lessons learned from the Fraunhofer-ISE field test „WP-Effizienz“	European Heat Pump News – September 2011	10
Wyniki badań dolnych źródeł ciepła w systemach grzewczych opartych na pompach ciepła typu solanka/woda.	InstalReporter (Polen) 10/2011	
Auf Herz und Nieren. Felduntersuchung zu realen Effizienz von Wärmepumpen	Gebäude Energieberater, Ausgabe 10/2011	12 - 17
O rozwoju, barierach, edukacji i promocji – rynku pomp ciepła	InstalReporter (Polen) 12/2011	27 - 29
Monitoring von Versorgungssystemen mit Wärmepumpen	Fraunhofer ISE – Jahresbericht 2011	29
Die Leistungs- und Arbeitszahl von Wärmepumpen	HLH - Lüftung/Klima/Heizung/Sanitär/Gebäudetechnik Bd. 63 (2012) Nr. 1 - Januar	32 - 36
Zur Effizienz von Wärmepumpenanlagen	SANITÄR+HEIZUNGSTECHNIK 2/2012	2 - 5
Feldtesterfahrungen: Erdgekoppelte Wärmepumpen in kleineren Wohngebäuden	bbr – Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau 02/2012	60 - 65
Unter die Lupe genommen	Renovieren & Energiesparen 4-5/2012	43 - 47
Wärmepumpen im zukünftigen Stromnetz	Fraunhofer ISE – Jahresbericht 2012	28
Efficiency of heat pump systems under real operating conditions	IEA Heat Pump Centre, Newsletter Vol. 31, Nr. 02/2013	22 - 26
Alternative Wärmequellen für Wärmepumpen – Eisspeicher und kalte Nahwärme	TGA Fachplaner 06/2013	18 - 26
Elektrisch angetriebene Wärmepumpen – Monito- ringprojekte untersuchen Effizienz unter realen Bedingungen	FEE Heizungsjournal – Special 10/2013	94 - 103
Elektrisch angetriebene Wärmepumpen Aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Feldtests	BINE Informationsdienst – Themeninfo I/2013	Ganzes Heft
Wärmepumpen - Heizen, Kühlen, Umweltenergie nutzen	BINE Informationsdienst	Buch

Titel	Medium	Internetadresse
Studie des deutschen Wärmepumpenmarkts – März 2010 (S. 17 – 18)	 Geothermiezentrum Bochum	http://www.geothermiezentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/Projekte/WP-Studie/Abschlussbericht_WP-Marktstudie_Mar2010.pdf
Mehr als heiße Luft	Photovoltaik 01/2012	http://www.photovoltaikeu.de/Archiv/HefTarchiv/Mehr-als-heisse-Luft_QUIEPTQ0ODI5OSZNSUQ9MTEwNDUz.html
Am Leistungslimit	Zeitschrift Haustech – November 2011	http://www.fws.ch/tl_files/download_d/Presseartikel/Haustech_Am_Leistungsli mit_Nov11.pdf
ISE-Feldtest belegt hohe Arbeitszahlen für Erdreichwärmepumpen	 baulinks	http://www.baulinks.de/webplugin/2008/2015.php4
Wärmepumpen-Feldtest Mit Sorgfalt effizient	TGA Fachplaner	http://www.tga-fachplaner.de/MAGAZIN/Meldungen/L0FSVFZJRvDERVBSUw_U1RZTEVJRD0yNTEzMzUmRkIMVEV-SPEwMDQ0OCwxMDQyMjYmRkIMVEVSMj0xMDQyMjYmU09SVD0wMSZlNQVhSRUM9MTAmUkNPVU5UPTeWOCZSTlI9MjcmTUlEPTeWZk1OQ.html
Wärmepumpen im unabhängigen Vergleich	Verivox	http://www.verivox.de/pm/waermepumpen-im-unabhaengigen-vergleich-72580.aspx
Qualitätssicherung für Wärmepumpen-Anlagen	 EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen	http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/qualitaets-sicherung-fuer-waermepumpen-anlagen/
Ergebnisse von Wärmepumpen-Feldtests	Gebäude Energie Berater	http://www.geb-info.de/GEB-2011-5/Ergebnisse-von-Waermepumpen-Feldtests_QUIEPTMxNzEyNyZNSUQ9MzAwMDE.html?UID=5EE3288B81ADF71584CF4FBBE1D0B4C675988F923B9BB4
Fraunhofer ISE veröffentlicht Forschungsergebnisse zur Effizienz von Wärmepumpen	Der Heizungsfinder Blog	http://www.heizungsfinder.de/blog/fraunhofer-ise-veroeffentlicht-forschungsergebnisse-zur-effizienz-von-waermepumpen/
Echte JAZ bis 5,2: Fraunhofer ISE untersuchte Wärmepumpen		http://www.cci-dialog.de/branchenticker/2011/kw15/01/echte_jaz_bis_5x2_fraunhofer_ise_untersuchte_waermepumpen.html
Fraunhofer-Institut: Test mit Wärmepumpen	Stiftung Warentest	http://www.test.de/Fraunhofer-Institut-Test-mit-Waermepumpen-4248763-0/
So effizient sind Wärmepumpen	Schornsteinfeger-meister Sascha Breuer	http://www.schornsteinfegermeister.de/Energienachrichten/So-effizient-sind-Waermepumpen.html,386
Elektrische Wärmepumpen bestehen langjährige Feldtests	REE Regenerative Erneuerbare Energien	http://www.regenerative-erneuerbare-energien.de/nachrichten/Gesamt%FCbersicht/%20%20Elektrische%20W%E4rmepumpen%20bestehen%20langj%E4hrige%20Feldtests/1277225/2/
Wärmepumpen bestehen langjährige Feldtests	Stadtwerke Düsseldorf	http://www.swd-energieeffizienz.de/waermepumpen-bestehen-langjaehrigfeldtests-1345/
ISE legt Ergebnisse von Langzeittests vor Wärmepumpen brauchen sorgfältige Planung	EnBauSa.de Energetisch Bauen und Sanieren	http://www.enbausade.de/heizung-warmwasser/aktuelles/artikel/waermepumpen-brauchen-sorgfaeltige-planung-2140.html
Wärmepumpen bestehen Feldtest von Fraunhofer Institut	Geothermie Nachrichten	http://www.geothermie-nachrichten.de/waermepumpen-betsehen-feldtest-von-fraunhofer-institut
Fraunhofer-Monitoring BWP-Anlagen im ISE-Dauermonitoring	Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.	http://www.waermepumpe.de/waermepumpe/referenzobjekte/fraunhofer-monitoring.html
Klimafreund Wärmepumpe?	SONNENERGIE: offizielles Fachorgan der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (DGS)	http://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2009-03/Layoutfertig/PDF/Einzelartikel/SE-2009-03-s046-Waermepumpe-Klimafreund_Waermepumpe.pdf
Elektrische Wärmepumpen bestehen langjährige Feldtests	Informationsdienst Wissenschaft e.V. -idw-	http://idw-online.de/de/news417171
Wärmepumpen bald ohne Kältemittel?	Branchendienst.de	http://www.branchendienst.de/9071-waermepumpen-bald-ohne-kaltemittel/

Elektrische Wärmepumpen bestehen langjährige Feldtests		http://www.greentech-germany.com/elektrische-waermepumpen-bestehen-langjaehrige-feldtests-a29028
Wärmepumpen: Sinnvoll für den Klimaschutz?	fesa-Thema 2/2013	http://www.fesa.de/fileadmin/user_upload/fesa-Thema/fesaThema_2013-02_Waermepumpen.pdf
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) untersucht Wärmepumpen-Effizienz in Langzeit-Feldtest „WP Monitor“ macht die Leistung von Wärmepumpen transparent	Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. Pressekit März 2013	http://www.waermepumpe.de/presse/mediakit-2013.html
Wärmepumpen bestehen langjährige Feldtests	Erdwärme-Zeitung.de	http://www.erdwaerme-zeitung.de/meldungen/waermepumpen-bestehen-langjaehrige-feldtests.php