

Performance Monitoring von Wärmepumpensystemen mit Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden

Krishna Timilsina, Sven-Yannik Schuba, Mu Huang, Peter Pärish

Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH), Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Deutschland

Keywords: Erdwärmesonden, Wärmepumpe, Performance Monitoring, Regeneration, Wärmebilanz

Zusammenfassung

Mit dem zunehmenden Einsatz von Wärmepumpen in Verbindung mit Erdwärmesonden als eine der erneuerbaren Wärmequellen für die Wärmeversorgung in großen Gebäuden ist auch der nachhaltige Betrieb dieser zu einem Thema geworden. Für den nachhaltigen und optimierten Betrieb ist das Monitoring solcher Systeme mit Heiz- und Kühlfunktion sehr wichtig. Diese Studie konzentriert sich auf die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus den verfügbaren Messdaten von 12 verschiedenen Systemen mit Erdwärmepumpen für das Jahr 2023. Die Ergebnisse bestätigen die hohen Jahresarbeitszahlen erdgekoppelter Systeme. Im Vergleich zu Literaturwerten von Luft-Wärmepumpen zeigt sich, dass erdgekoppelte Systeme eine um 0,8 höhere JAZ erreichen. Eine Betriebsüberwachung deckt zudem hohe Abweichungen zu Planungswerten auf und kann auf eine Anpassung der Betriebsstrategie oder gar eine aktive Regeneration hinweisen.

1. Einleitung

Die Integration von Wärmepumpen mit oberflächennahen Erdwärmesonden (EWS) als Wärmequelle für Niedertemperaturanwendungen wie Raumheizung und Trinkwarmwasser ist eine bekannte Technologie. Die in der Anschaffung teuren Systeme mit einem EWS-Feld werden insbesondere in großen Systemen mit Heiz- und Kühlbedarf eingesetzt. Die EWS liefern eine relativ hohe und stabile Temperatur an den Verdampfer der Wärmepumpe und bieten zusätzlich den Vorteil, dass sie einen erheblichen Teil des Kühlbedarfs durch aktive oder passive (freie) Kühlung decken können [1]. Im Winter werden die EWS als Wärmequelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpen zur Wärmeversorgung des Gebäudes genutzt und im Sommer wird die Abwärme des Gebäudes über EWS durch aktive und passive Kühlung im Erdreich gespeichert. Dies macht EWS zu einer idealen Quelle für Wärmepumpen, die zusätzlich die saisonale Wärme und Kälte speichern. Studien zeigen, dass diese erdgekoppelten Wärmepumpen in Gebäuden effizienter sind als Luftwärmepumpen [2-3]. Die Nutzungsdauer von EWS-Feldern beträgt mit mindestens 50 Jahren ein Vielfaches der Lebensdauer der Wärmepumpe. Aufgrund ihrer speicherähnlichen Eigenschaften müssen die EWS-Felder überwacht werden, um die langfristige Temperaturentwicklung aus Gründen der Nachhaltigkeit, im Wesentlichen durch Grundwasserschutz begründet, zu beobachten [4]. Darüber hinaus ist das Performance-Monitoring des gesamten Wärmepumpensystems wichtig, da diese Systeme empfindlich auf nicht-optimierte Betriebsbedingungen reagieren. Die Komplexität des Systems und seiner Steuerung führt häufig zu höheren Temperaturhuben als nötig, ergo einem ineffizienteren Betrieb, die auf Basis des Monitorings identifiziert und gelöst werden können.

Diese Studie basiert auf dem Forschungsprojekt „Geo-Resume“, das darauf abzielt, grundlegende Empfehlungen für den nachhaltigen Betrieb und die Optimierung großer EWS-Felder zu entwickeln, wobei der Schwerpunkt auf der thermischen Regeneration der EWS zwischen den Heizsaisons durch die Integration von Solar-, Umwelt- und Abwärme liegt. Zu diesem Zweck werden Bestandsanlagen

und Neuanlagen mit Messtechnik ausgestattet und über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr gemessen. Für einige Anlagen lieferten die Betreiber selbst die historischen Daten für eine Langzeitanalyse. In dieser Studie werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Messdaten von zwölf repräsentativen Systemen mit erdgekoppelten Wärmepumpen zusammengefasst, die sich an sechs verschiedenen Standorten in Deutschland, wie in Abbildung 1 dargestellt, befinden. Diese Standorte unterscheiden sich in Bezug auf die Gebäudenutzung (Wohn- oder Nichtwohngebäude), die Systemkonfiguration, den Standort, den Zweck (Heizen oder Kühlen) und die Betriebsdauer (lang- oder kurzfristig). Die Tiefe der Erdwärmesonden variiert zwischen 40 m und 145 m.

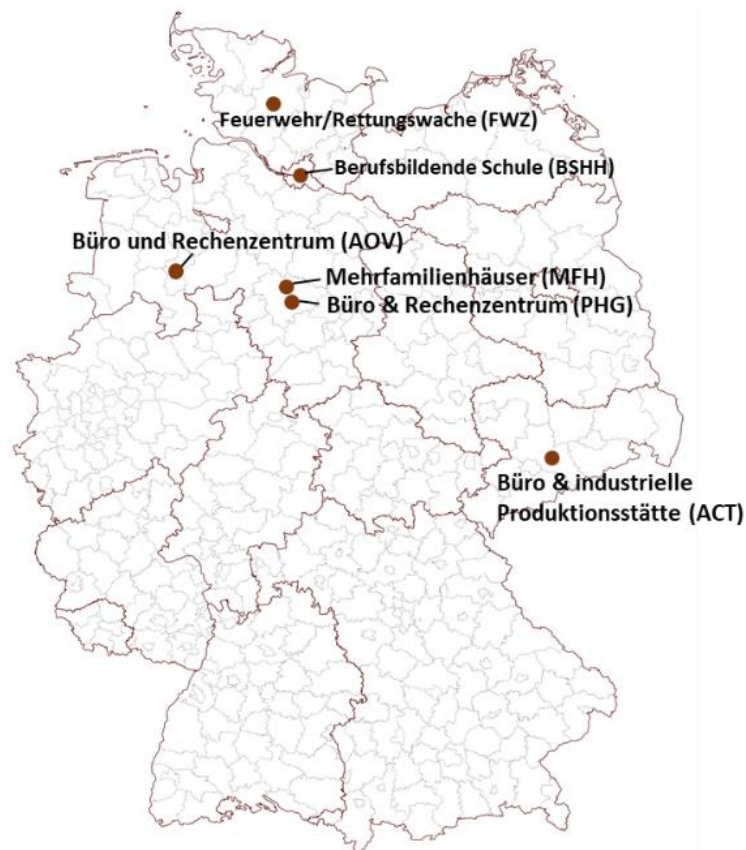


Abbildung 1: Standorte der analysierten Systeme

2. Anlagenbeschreibung

Dieser Abschnitt enthält eine kurze technische Beschreibung aller 12 erdgekoppelten Wärmepumpen.

AOV (Büro und Rechenzentrum)

Am Standort befinden sich zwei Systeme (BA1, BA2). AOV_BA1 besteht aus zwei parallel geschalteten Sole/Wasser-Wärmepumpen, die jeweils eine Heizleistung von 70 kW und eine Kühlleistung von 70 kW haben und die Betonkernaktivierung in den Büros, die Fußbodenheizung im Foyer und die Lüftungsanlage versorgen. Das EWS-Feld, bestehend aus 25 EWS mit je 100 m Länge, dient der saisonalen Wärme- und Kältespeicherung und soll den Grundbedarf an Heizung und Kühlung decken. Die Betonkernaktivierung wird zur Deckung der Grundlast im Heizbereich eingesetzt. Sobald die Wärme aus der Betonkernaktivierung bei sinkenden Außentemperaturen nicht

mehr ausreicht, wird die zusätzlich benötigte Wärme für das Gebäude über die statischen Heizkörper bereitgestellt. Dieses System ist seit Juni 2010 in Betrieb. AOV_BA2 besteht aus einer reversiblen Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 150 kW und einer Kühlleistung von 160 kW, die an das zweite EWS-Feld gekoppelt ist, das Wärme und Kälte für das erweiterte Gebäude liefert, das als Büro-, Besprechungs- und Konferenzraumfläche genutzt wird. Das EWS-Feld, bestehend aus 19 Erdwärmesonden mit je 100 m Länge, wird zum Heizen und Kühlen genutzt. Der gesamte Kühlbedarf wird durch reversibel erdgekoppelte Wärmepumpen über Betonkernaktivierung, Kühldecken und eine Lüftungsanlage (kurz: RLT-Anlage) gedeckt. Dieses System ist seit September 2017 in Betrieb. Zusätzlich kann ein Gas-Brennwertkessel mit einer Wärmeleistung von 200 kW zugeschaltet werden, um Spitzenlasten für beide Systeme abzudecken. Im AOV_BA2 liefert der Kessel auch Warmwasser.

BSHH (Berufsschule)

Diese EWS-Anlage besteht ebenfalls aus zwei hydraulisch voneinander getrennten EWS-Feldern. Die an das Erdreich gekoppelten zwei Wärmepumpen mit einer Heizleistung von je 84,6 kW versorgen neben den Klassenräumen, ein Verwaltungsgebäude und eine Sporthalle mit Wärme auf dem Schulgelände. Die beiden EWS-Felder mit insgesamt 47 EWS, die jeweils 80 m lang sind, sind nicht thermisch separiert, sondern überlappen sich. Sie werden daher für die Analyse als ein einziges Feld behandelt, da die Wärmepumpen hydraulisch miteinander verbunden sind und von einem einzigen WMZ überwacht werden. Neben der natürlichen Regeneration des Erdwärmesondenfeldes wird dem EWS-Feld zusätzlich Wärme aus der Abluft der Lüftungsanlagen und über einen auf dem Dach installierten Außenluftwärmetauscher zugeführt. Die installierte Nennleistung beider Systeme beträgt jeweils 125 kW. Außerdem ist ein Gaskessel für die Wasserversorgung vorhanden.

ACT (Büro und industrielle Produktionsstätte)

Diese Anlage versorgt Gebäude, die für die industrielle Produktion genutzt werden, und Büro- und Verwaltungsgebäude. Es gibt zwei separate erdgekoppelte Wärmepumpensysteme, die im weiteren Verlauf als ACT_Geb2 und ACT_Geb3 bezeichnet werden.

Gebäude 2 (ACT_Geb2), das 2007 gebaut wurde, besteht aus einem Kopfbau und einer Produktions- und Fertigungshalle. Das Gebäude verfügt über eine Wärmepumpenanlage mit einer reversiblen Sole/Wasser-Wärmepumpe eine Wärmeleistung von 32,6 kW und eine Kälteleistung von 25,4 kW. Als Primärenergiequelle für den Heizbetrieb dient ein Erdwärmesondenfeld mit 12 Erdsonden á 125 m, von denen 11 Sonden betrieben werden. Die Wärmeabgabe von Gebäude 2 erfolgt über Heizkörper und über die Fußbodenheizung. Die sommerliche Kältebereitstellung erfolgt nach dem Prinzip der freien Kühlung über das Erdwärmesondenfeld ohne Wärmepumpenbetrieb. Dem Gebäude wird dabei über die RLT- Anlage, die Bauteiltemperierung im Hallenbereich und die Fußbodenheizkreise Wärme entzogen und über die Erdsonden dem Erdreich zugeführt. Sollte die passive Kühlung für die sommerliche Kältebereitstellung nicht ausreichen, wird die Wärmepumpe zugeschaltet und die Kühlung erfolgt dann aktiv über deren Verdichter mit einer größeren Temperaturspreizung, um die erhöhten Kühllasten abzuführen. In diesem Betriebszustand wird die überschüssige Wärme nicht in das Erdwärmesondenfeld gefahren, sondern über RLT-Abluftgitter an die Umgebungsluft abgegeben.

In Gebäude 3 (ACT_Geb3) wurden Produktionsbereiche, Versand und Wareneingang, Projektleitung für mechanische Bearbeitung sowie Sozialräume integriert. Für die Wärme- und Kältebereitstellung im Gebäude 3 wurden insgesamt 24 Bohrungen mit Längen zwischen 105 m und 145 m niedergebracht und zu EWS ausgebaut. Das Erdwärmesondenfeld wurde in drei Kreise zu je 8 Erdwärmesonden aufgeteilt, die jeweils an einem Verteilerbalken zusammengeführt und mit Wasser betrieben werden. Die Wärmebereitstellung erfolgt durch zwei Wärmepumpen. Die erste

Wärmepumpe besitzt eine Heizleistung von 40 kW. Die Heizleistung der zweiten Wärmepumpe beträgt 53 kW. Für Kühlung des Gebäudes mittels Geothermie wird ausschließlich das Prinzip der freien Kühlung angewendet.

PHG (Büro und Rechenzentrum)

Das System besteht aus PVT-Kollektoren, EWS, Erdwärmekollektoren (EWK) und einer Sole/Wasser-Wärmepumpe für die Heiz- und Kühlversorgung. Im Gegensatz zu anderen Systemen werden mehrere Wärmequellen für die Wärmepumpe integriert, wobei das EWS-Feld mit 6 EWS von je 100 m eine dieser Quellen ist. Die Wärmepumpe hat eine Heizleistung von 58 kW und eine Kühlleistung von 48 kW. Die gesamte Fläche des PVT-Kollektorfeldes beträgt 225 m². Darüber hinaus besteht das System aus zwei Pufferspeichern von je 3000 Litern, von denen sich einer auf der Quellenseite der Wärmepumpe (Kältespeicher) und der andere auf der Senken-Seite der Wärmepumpe (Wärmespeicher) befindet. Der Wärmespeicher dient als Verteilerspeicher für die Wärmeversorgung, wobei der Kältespeicher die von PVT-Kollektoren, EWS und EWK angesammelte Wärme an die Wärmepumpe liefert. Zusätzlich funktioniert der Kältespeicher als Verteilerspeicher für die Kälteversorgung. Die Demoanlage besteht aus vier Gebäuden: Dem Hauptgebäude (Bürogebäude) und drei Nebengebäuden, die als Seminarräume und für Ausstellungen oder externe Veranstaltungen genutzt werden. Das Verteilungssystem liefert Wärme und Kälte über einen Plattenwärmetauscher an alle oben genannten Gebäude.

FTZ (Feuerwehrtechnische Zentrale)

Bei dieser Demoanlage handelt es sich um einen Neubau für die Feuerwehrtechnische Zentrale mit der Integration von Löschzug-Gefahrgut (FTZ + LZ-G). Die Anlage besteht aus 20 Erdwärmesonden mit je 100 m Länge als Wärmequelle für zwei Sole/Wasser-Wärmepumpen mit je 44,4 kW Heizleistung. Die Anlage wird ausschließlich zur Beheizung über eine Fußbodenheizung genutzt. Die Warmwasserbereitung erfolgt über einen Gas-Brennwertkessel.

MFH (Mehrfamilienhäuser)

An diesem Standort befinden sich fünf individuelle Wärmeversorgungssysteme für jedes der fünf Mehrfamilienhäuser (MFH) mit 101 Mietwohnungen. Die Häuser werden im weiteren Verlauf dieses Beitrags mit MFH_I1 bis MFH_I5 bezeichnet. Die Wärmeversorgungssysteme in allen Gebäuden umfassen Erdwärmesonden in Kombination mit Sole/Wasser-Wärmepumpen und PVT-Kollektoren zur solaren Regeneration und direkten Beheizung der Pufferspeicher. Allerdings verfügt das Gebäude MFH_I5 über zwei Wärmepumpen für die Wärmeversorgung des Gebäudes, da es vergleichsweise größer ist als die anderen Gebäude. Der Wärmebedarf im Sommer soll hauptsächlich durch PVT-Kollektoren durch direkte Beladung der Heizungspufferspeicher gedeckt werden. Diese Konfiguration hat den Vorteil, dass die Erdwärmesonden in den Sommermonaten nicht zum Heizen genutzt werden und sich die Erdwärmesonden ungestört passiv regenerieren können. Darüber hinaus ist eine aktive Regeneration des Erdreichs durch PVT-Überschusswärme geplant. In den Wintermonaten arbeitet die Wärmepumpe als monovalentes System mit Erdwärmesonden als einziger Wärmequelle. Die Pufferspeicher sind mit Heizstäben ausgestattet, die als Zusatzheizung dienen. Außer Haus MFH_I2, das über eine zusätzliche elektrische Heizung mit 54 kW verfügt, haben alle anderen Häuser eine elektrische Heizung mit 36 kW. Die Tabelle zeigt die Konfiguration des EWS-Feldes, die Größe der WP und die Größe des PVT-Kollektorfeldes für jedes der 5 MFHs.

Tabelle 1: Informationen über EWS, WP und PVT der MFHs

Haus	EWS	WP-Heizleistung (@B0W55)	PVT-Fläche
MFH_I1	8 x 145 m	43 kW	187 m ²
MFH_I2	6 x 140 m	38 kW	105 m ²
MFH_I3	9 x 145 m	43 kW	185 m ²
MFH_I4	9 x 145 m	43 kW	240 m ²
MFH_I5	14 x 145 m	1 x 43 kW & 1 x 29 kW	233 m ²

Der durchschnittliche Auslegungsparameter Bohrmeter pro kW Wärmepumpen-Heizleistung gemittelt über alle Systeme beträgt 24 m/kW und liegt damit leicht über dem vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) für das Land Niedersachsen ermittelten Durchschnitt von 21,7 m/kW. Weitere Informationen zum geplanten Heiz-/Kühlbedarf der messtechnisch überwachten Anlagen und des Erdreichs sind in der folgenden Tabelle zu finden.

Tabelle 2: Zusätzliche Planungs- und Auslegungsdaten der Anlagen

Anlage	Geplanter Heizwärmebedarf (MWh/a)	Geplanter Kältebedarf (MWh/a)	EWS Gesamtlänge (m)	Geplanter Wärmeentzug EWS (MWh/a)	EWS Geplanter Wärmeeintrag (MWh/a)
AOV_BA1	262	62	2500	174	206
AOV_BA2	305	73	1900	92	81
BSHH	469	348	3760	351	348
ACT_Geb2	90	81	1375	67,5	81
ACT_Geb3	162	180	3000	162	60
PHG	85	48	600	49,8	37
FWZ	120	0	2000	93,3	0
MFH_I1	141	0	1160	55,8	16,5
MFH_I2	83	0	840	36,8	9,5
MFH_I3	139	0	1305	57,9	16,2
MFH_I4	176	0	1305	54,8	25,1
MFH_I5	197	0	2030	91,7	23,3

3. Messtechnik

Die Hauptmotivation für das Monitoring der EWS besteht darin, das Verhalten von erdgekoppelten Wärmepumpen, die als saisonale Wärme- oder Kältespeicher fungieren, in Hinblick auf einen nachhaltigen Betrieb bewerten zu können. Das Arbeitspaket „Monitoring“ begann mit der

Identifizierung und Auswahl repräsentativer Standorte durch die involvierten geologischen Dienste. In vielen der Systeme war es möglich, ein bestehendes Datenerfassungssystem zu nutzen und nur bei Bedarf zusätzliche Messtechnik nachzurüsten.

Abbildung 2 zeigt das vereinfachte Schema der Messtechnik mit den minimal erforderlichen Sensoren und Geräten, um die für die Leistungsanalyse eines erdgekoppelten Wärmepumpensystems erforderlichen Datenpunkte zu erhalten. Die gemessenen Größen sind Temperatur, Durchfluss, elektrische Energie und thermische Energie. Der EWS-Wärmezähler, der oft von den Genehmigungsbehörden vorgeschrieben wurde, muss bei Standorten mit geplanter Regeneration (oder Gebäudekühlung) bidirektional sein. Bei der Verwendung wird empfohlen, auf den Messbereich der Temperaturdifferenz zu achten, da die meisten WMZ bei $\Delta T = 3 \text{ K}$ aufhören zu zählen. Daher wurde, mit Ausnahme einiger neuer Standorte, bei denen die Energiewerte aufgrund technischer Fehler im WMZ manuell berechnet werden mussten, ein Monitoring-Intervall von 15 Minuten gewählt. Je nach Anlage stehen für alle in diesem Dokument enthaltenen Anlagen Daten für mindestens ein Jahr zur Verfügung. Daher wird die Leistung der WP-Systeme für ein gemeinsames Jahr 2023 untersucht (vgl. Abschnitt 6). Es gibt einige EWS-Systeme, die bis zu 13 Jahre lang überwacht wurden. Die langfristige Performance dieser EWS-Systeme wird analysiert (vgl. Abschnitt 4 und 5).

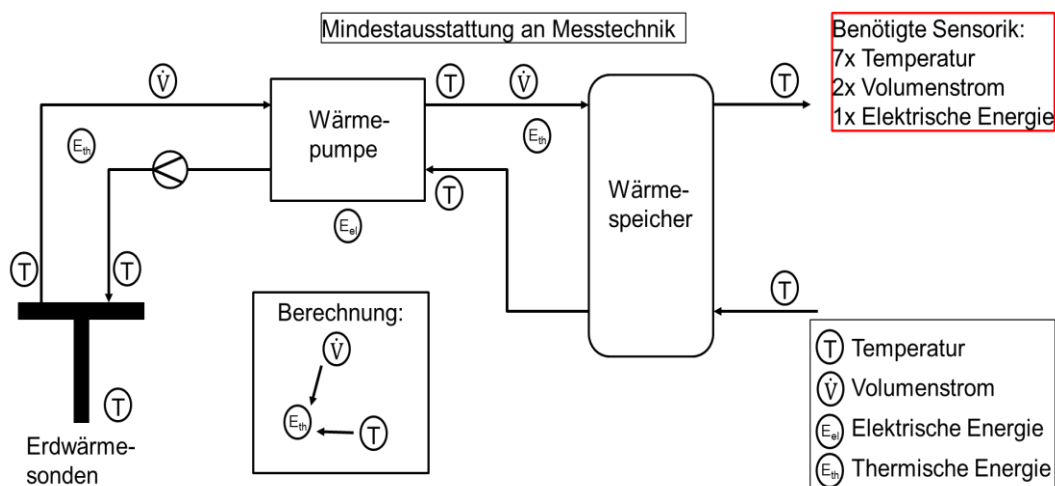


Abbildung 2: Mindestausstattung an Messtechnik

4. Untergrundseitige Analysen

4.1 Energiebilanz in EWS

Die Abbildung 3 zeigt die Energiebilanz an der Erdwärmesonde, wobei der Wärmeentzug als positive Energie und der Wärmeeintrag als negative Energie dargestellt ist. Der spezifische Netto-Wärmeentzug, dargestellt als gestrichelte rote Linie, ist die Differenz zwischen Wärmeentzug und -eintrag, ermittelt in kWh je m Erdwärmesonde. Die gemessenen Wärmeentzüge und -einträge stehen in engem Zusammenhang mit der Betriebsweise des Systems und dem unterschiedlichen Heiz- und Kühlbedarf der Anlagen. Im Jahr 2023 verzeichnete der Standort BSHH mit etwa 188 MWh die höchste Wärmenutzung, da es sich um das größte geothermische Feld handelt. Umgekehrt hat der PHG-Anlage mit nur 28 MWh den niedrigsten Wärmeentzug, da es sich um das kleinste Feld handelt und zusätzliche Wärmequellen wie PVT-Kollektoren und ein Erdwärmekollektor genutzt werden. MFH_I4 und MFH_I5 haben scheinbar einen geringeren Wärmeentzug als die übrigen MFHs, obwohl sie ein größeres Feld haben. Dies liegt daran, dass es für diese beiden Systeme große Datenlücken gab. Insgesamt haben alle Standorte einen höheren Wärmeentzug als Einspeisung. Die spezifischen

Netto-Wärmeentzüge sind an den Standorten ohne Wärmeeintrag relativ höher, z. B. bei den fünf MFH und dem FTZ, wo sie über 25 kWh/m liegen. Unter den Standorten mit Regeneration hatte BSHH den höchsten Netto-Wärmeentzug. Für die MFHs war eine Regeneration mit Solarwärme geplant, die jedoch aufgrund von Leckagen im Flüssigkeitskreislauf der PVT-Anlage nicht erfolgreich war. Der durchschnittliche jährliche Wärmeentzug pro Bohrmeter betrug für alle Anlagen etwa 44 kWh/(m·a) und der durchschnittliche jährliche Wärmeeintrag pro Bohrmeter betrug 24 kWh/(m·a). Zudem sind die geplanten spezifischen Netto-Wärmeentzüge dargestellt und es wird deutlich, dass die Anlagen teilweise vollkommen anders betrieben werden als die Planungsannahmen.

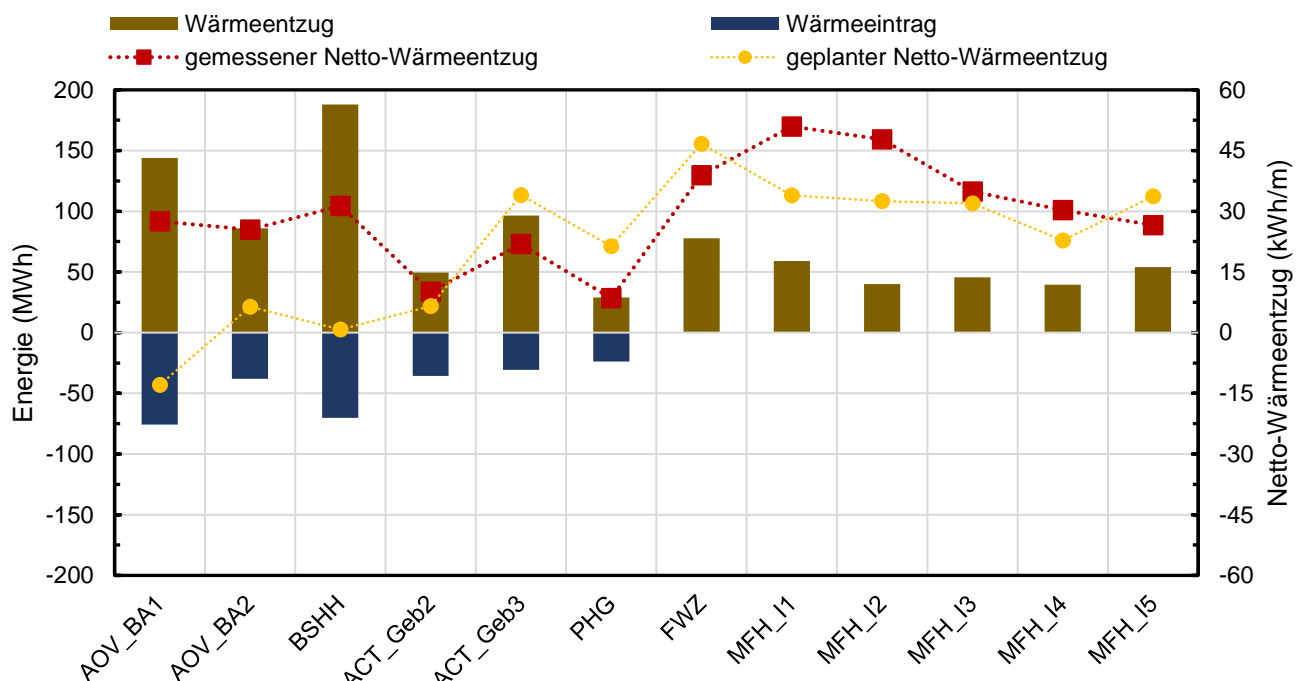


Abbildung 3: Wärmeentzug und -eintrag der Anlagen

Der Vergleich der im Monitoring erfassten Wärmemenge mit den geplanten Angaben (siehe Tabelle 1) zeigt, dass die meisten Anlagen eine höhere Abweichung von der Planung aufweisen. Mit Ausnahme von MFH_I1 und I2 ist der Wärmeentzug geringer als geplant. Da es sich bei diesen Gebäuden um Neubauten handelt, könnte der geplante Wärmebedarf etwas zu optimistisch gewesen sein. Der Wärmeeintrag ist bei allen Standorten geringer als geplant. Wie bereits erwähnt, fand in den MFH aufgrund der fehlenden Solarwärme keine Regeneration statt. Der große Unterschied zwischen der Planung und dem Betrieb der Standorte, die seit mehr als 6 Jahren in Betrieb sind, weist darauf hin, dass die EWS-Auslegung möglicherweise unter Berücksichtigung der neuesten Betriebsbedingungen und -strategien aktualisiert werden müsste. Und es gab auch Ausfälle während des Betriebs, z. B. liefen bei mehreren Standorten die Umwälzpumpen ununterbrochen, was zu einem höheren Stromverbrauch führte (z. B. PHG und FWZ), und einige Standorte wurden anders als geplant betrieben, z. B. mit einem geringeren Wärmeeintrag als geplant (AOV).

Um das Verhältnis zwischen Wärmeentzug und -eintrag für Erdwärmesonden zu ermitteln, wird eine Kennzahl „Energiebilanzzahl“ auf der Grundlage von Gleichung 1 berechnet [5]. Wenn die Energiebilanzzahl, die Werte zwischen -1 und +1 annehmen kann, größer als 0 ist, bedeutet dies, dass der Wärmeentzug den Wärmeeintrag übersteigt, und wenn die Energiebilanzzahl kleiner als 0 ist, ist der Wärmeeintrag höher. Eine ausgeglichene Bilanz ergibt 0, ausschließlicher Wärmeentzug oder Wärmeeintrag ergeben 1 bzw. -1.

$$EBZ = \frac{\int \dot{Q}_{Entzug} dt - \int \dot{Q}_{Eintrag} dt}{\int \dot{Q}_{Entzug} dt + \int \dot{Q}_{Eintrag} dt} \quad (1)$$

Die Abbildung zeigt die geplante und durch Monitoring ermittelte *EBZ* für alle Standorte. Im Jahr 2023 verfügte die Hälfte der Anlagen über eine thermische Regeneration (*EBZ* < 1). An den meisten Standorten gibt es eine große Abweichung von der geplanten *EBZ*. Insgesamt wurden für Nichtwohngebäude kleinere *EBZ* geplant als für Wohngebäude (MFHs).

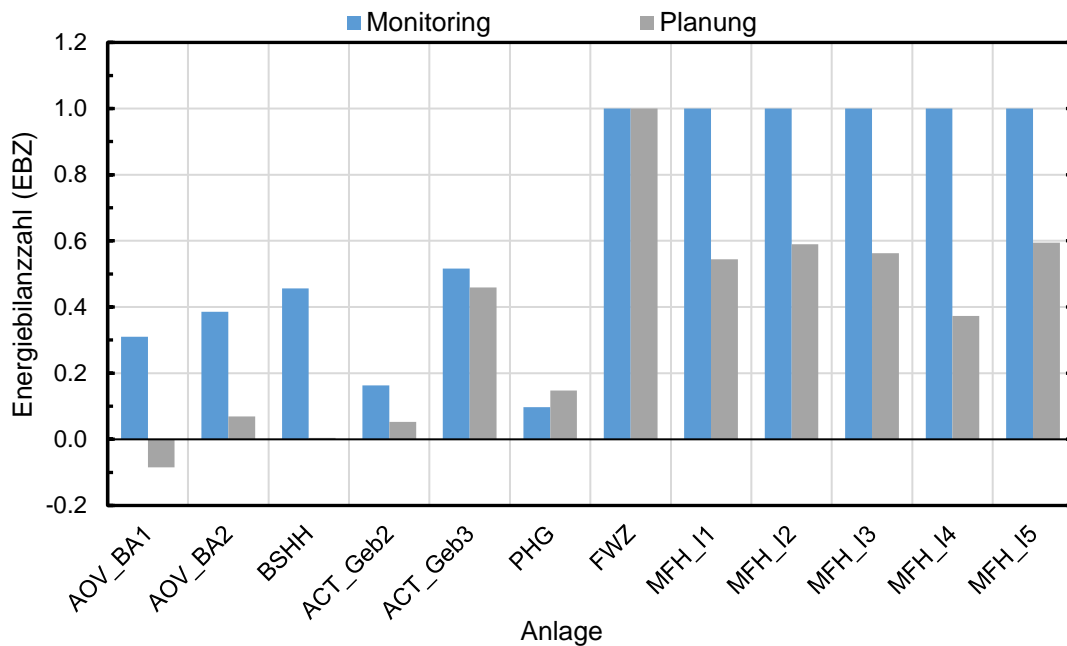


Abbildung 4: Geplante und gemonitorte EBZ

4.2 Fluidtemperaturen in EWS

Es gibt nur wenige Systeme, die mit Temperatursensoren im Erdreich ausgestattet sind. Daher wird die mittlere Fluidtemperatur der Systeme zur Analyse der Temperaturniveaus verwendet. Abbildung 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung (15-Minuten-Zeitraum) der mittleren Fluidtemperatur (d. h. der Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauftemperatur bei Volumenstrom > 0) für Erdwärmesonden in Form einer Heatmap. Die mittlere Fluidtemperatur liegt meist zwischen 4 und 17 °C. Die neuen Systeme, die durch die fünf MFHs repräsentiert werden, weisen auch ohne Regeneration relativ hohe Temperaturen von 6 bis 18 °C auf. Die minimale mittlere Fluidtemperatur beträgt 2 °C für AOV_BA1. Das Maximum liegt bei 26 °C für PHG, was während der solaren Regeneration durch PVT der Fall ist. Die jährliche durchschnittliche mittlere Fluidtemperatur der Systeme lag im Heizmodus zwischen 5,2 °C und 10,3 °C und im Kühl- oder Regenerationsmodus zwischen 12,2 °C und 18,3 °C.

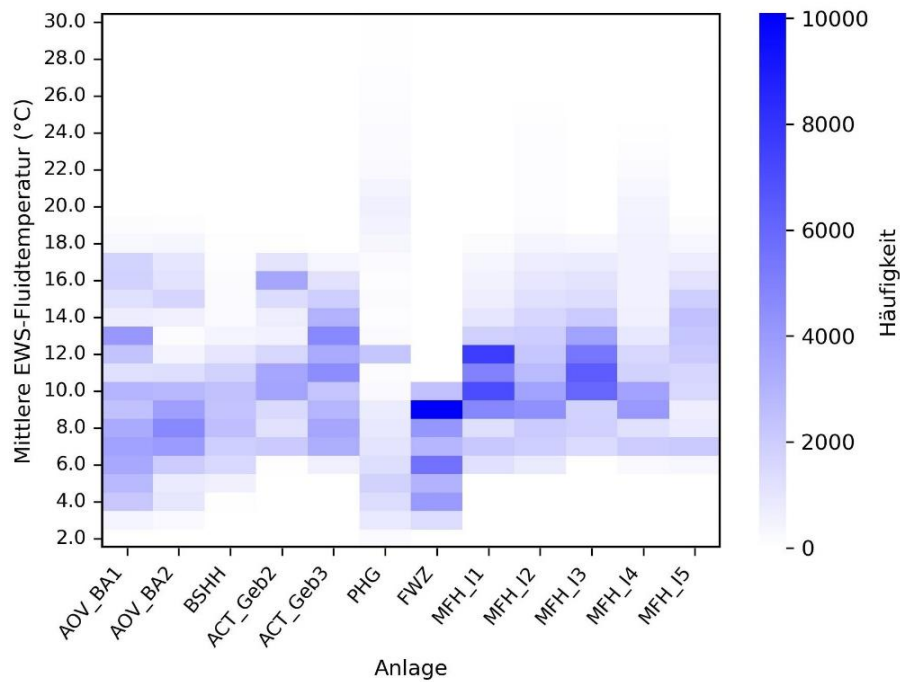


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der mittlere EWS-Fluidtemperatur

Abbildung 6 illustriert die durchschnittliche Heizlast der EWS-Felder in kW und verschiedene minimale Fluid- und Außenluft-Temperaturen an den jeweiligen Standorten.

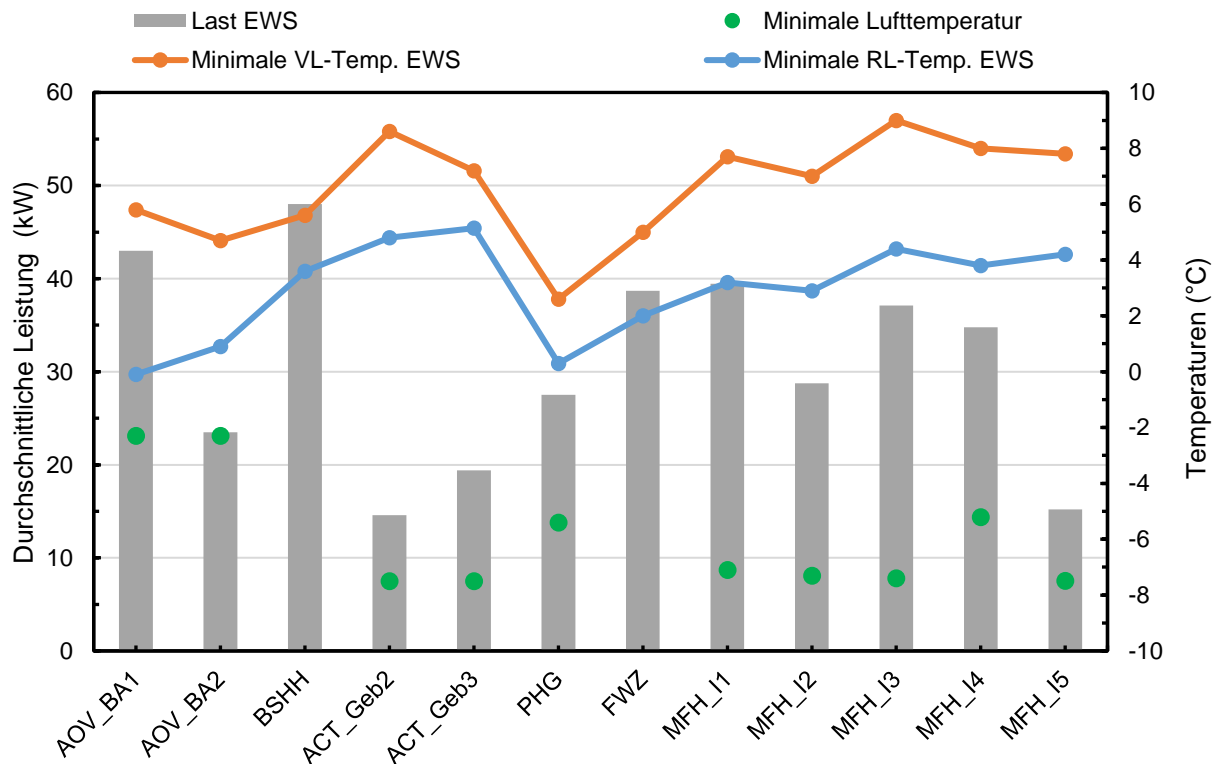


Abbildung 6: Durchschnittliche Entzugsleistung der EWS und Temperaturminima während des Heizbetriebs

Die durchschnittliche Last des Wärmeentzugs der EWS-Felder lag zwischen 15 kW in ACT_Geb2 und 48 kW in BSHH, dem größten System. Die Mindestrücklauftemperaturen aller Anlagen lagen über dem vom LBEG für Niedersachsen festgelegten Grenzwert von -3 °C . Die minimale Vorlauftemperatur für die Standorte war immer höher als die minimale Außentemperatur, was darauf hindeutet, dass die Wärmepumpen im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen, falls verwendet, höhere Temperaturen am Verdampfer erhalten. Die Außentemperatur ist für BSHH und FWZ nicht in den Daten enthalten.

4.3 Langzeitverhalten

Ein Langzeit-Performance-Monitoring von EWS-Systemen ist für einen optimalen Betrieb und zur Einhaltung der Grundwassertemperaturen innerhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte sehr wichtig. Ein langfristig ineffizienter Betrieb verkürzt nicht nur die Lebensdauer des Systems, sondern verschlechtert auch die Eigenschaften des Erdreichs. Zur Untersuchung des Langzeitverhaltens der Systeme wurden drei Anlagen mit Monitoringdaten aus mindestens sechs Jahren ausgewählt, nämlich AOV_BA1, AOV_BA2 und BSHH. Abbildung 7 (oben), zeigt den Wärmeentzug und -eintrag ab dem Jahr 2011. Das untere Diagramm zeigt die stündlich gemittelten mittleren Fluidtemperaturen der Erdwärmesonden und die Grundwassertemperatur in verschiedenen Tiefen für die jeweiligen Anlagen.

Im Allgemeinen zeigt Abbildung 7 (oben) Schwankungen bei der über die Jahre entzogenen und eingetragenen Wärme, die auf einen variierenden Heiz- und Kühlenergiebedarf zurückzuführen sind. Außerdem haben übermäßiger Wärmeentzug und -eintrag zu einem Anstieg und Abfall der Grundwassertemperaturen geführt. Beim System AOV_BA1 (im oberen Diagramm mit A1 bezeichnet) dominierte der Wärmeeintrag 6 Jahre lang weitgehend den Wärmeentzug, was zu einem Anstieg der Grundwassertemperaturen von $11,1\text{ °C}$ auf $13,55\text{ °C}$ führte, d. h. zu einem Anstieg um fast 2,5 K. Auch der Wärmeentzug war in diesen Jahren meist geringer als geplant. Im Jahr 2017 wurde die Kühllast (Serverkühlung) entfernt und die Heizlast erhöht. Dies führte nach 2017 zu einer graduellen Wiederherstellung der ungestörten Grundwassertemperaturen. Für das zweite Gebäude der AOV-Anlage (AOV_BA2) ist die saisonale Schwankung der mittleren Fluidtemperatur und der Grundwassertemperatur sichtbar. Für den Standort BSHH ist die Grundwassertemperatur nahezu konstant, aber die saisonale Schwankung der mittleren Fluidtemperatur ist deutlich sichtbar.

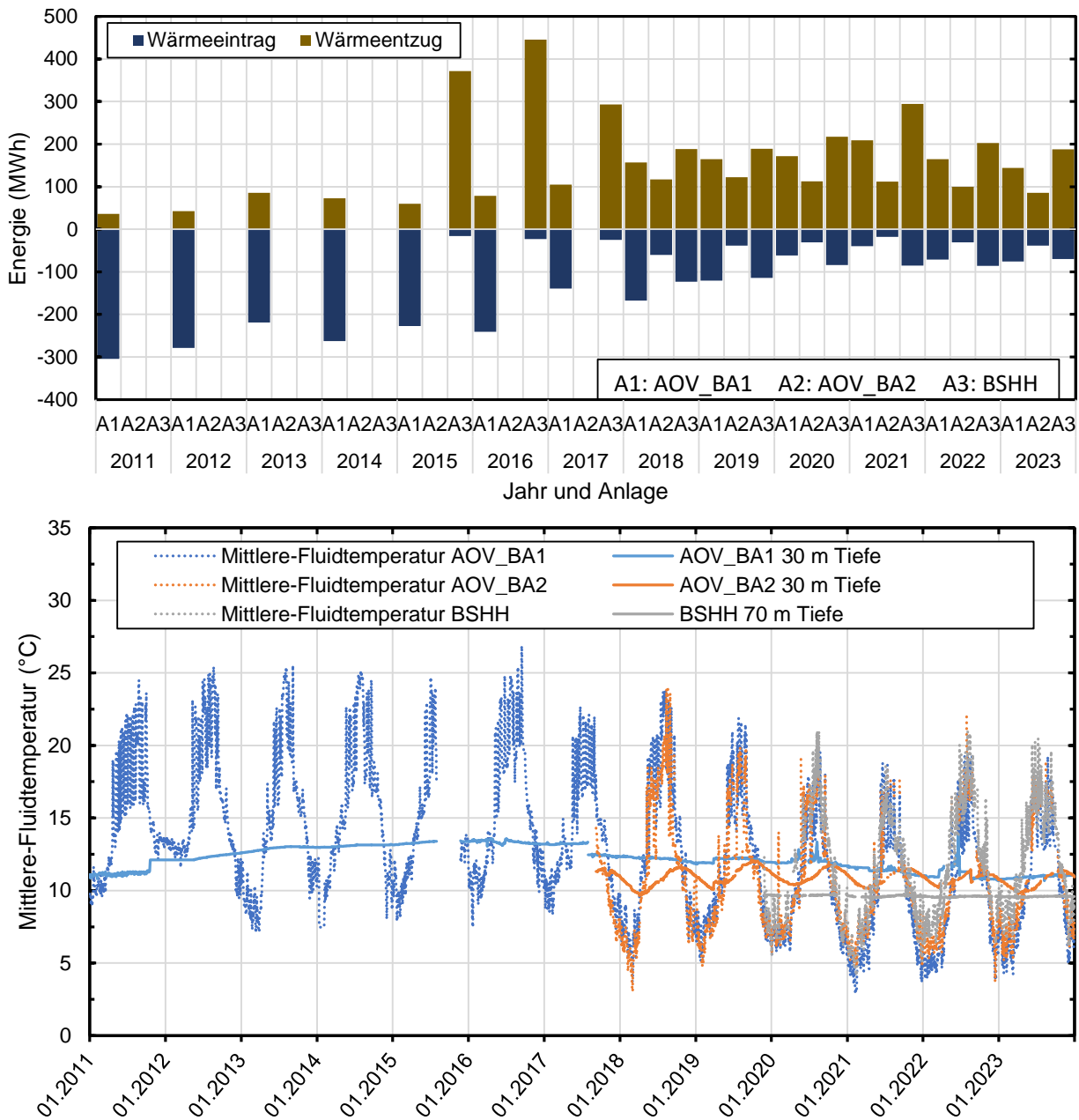


Abbildung 7: Energiebilanz in EWS (oben) und Langzeit -Temperaturverlauf (unten) für drei Anlagen

5. Jahresarbeitszahlen der betrachteten Systeme

Die Jahresarbeitszahl (JAZ_{bst}) ist das Verhältnis der erzeugten Wärmeenergie der Wärmepumpe am Kondensator (\dot{Q}_{WP}) und dem gesamten Stromverbrauch der Wärmepumpe (\dot{E}_{WP}) und der Umwälzpumpen (\dot{E}_{Pumpen}). Es ist eine wichtige Kennzahl zur Bestimmung der Effizienz eines Wärmepumpensystems. Im Folgenden wird nur der Heizfall (Index: H) betrachtet:

$$JAZ_{bst,H} = \frac{\int \dot{Q}_{WP} dt}{\int (\dot{E}_{WP} + \dot{E}_{Pumpen}) dt} \quad (2)$$

Für den Effizienzvergleich der im Monitoring betrachteten Systeme wurde eine Vergleichsstudie für Luft-Wärmepumpen und erdgekoppelte Wärmepumpen [6] zu Rate gezogen. Abbildung 8 zeigt die Abhängigkeit der JAZ von der gemittelten Vorlauftemperatur der Wärmepumpe.

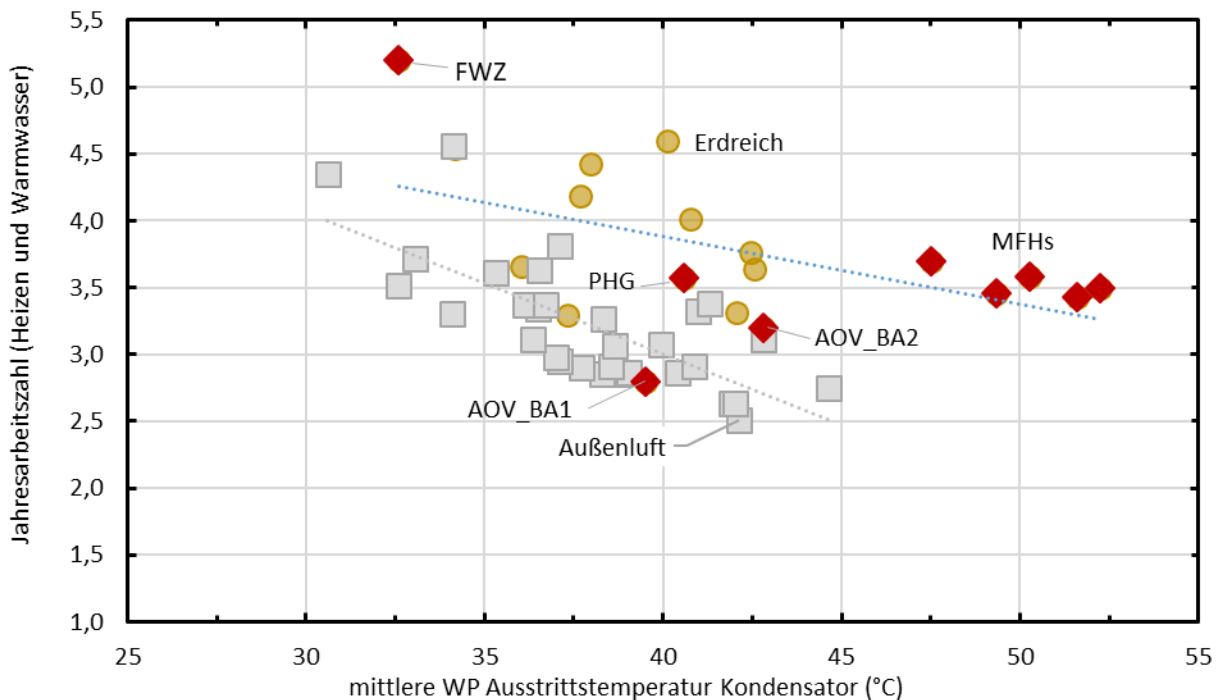


Abbildung 8: Jahresarbeitszahl der Geo-Resume-Anlagen mit Literaturwerten über der WP-Vorlauftemperatur

Die in dieser Arbeit vermessenen Systeme sortieren sich im Feld der aus der Vergleichsliteratur bekannten EWS-Systeme ein. Fünf Systeme fallen durch vergleichsweise hohe mittlere Vorlauftemperaturen von über 47 °C auf. Diese stellen die fünf MFH dar. Die anderen vier Punkte sind die Nichtwohngebäude, die alle über niedrigere Vorlauftemperaturen verfügen. Die in den vorherigen Abschnitten besprochenen höheren Eintrittstemperaturen am Verdampfer könnten der Grund für die hohe Effizienz der MFHs trotz der vergleichsweise hohen Vorlauftemperaturen sein. Insgesamt sinkt die Arbeitszahl mit steigender Vorlauftemperatur der Wärmepumpe. Beim Vergleich der Trendlinie zwischen allen erdgekoppelten und Luft-Wärmepumpen ist die Abhängigkeit der Arbeitszahl von der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe bei erdgekoppelten Wärmepumpen geringer, da die Trendlinie flacher verläuft. Die Arbeitszahl ist im Durchschnitt um etwa 0,8 höher als bei der Luft-Wärmepumpe, wobei es aber auch einen Ausreißer nach unten gibt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben die Monitoringergebnisse von 12 EWS-Anlagen, die im Rahmen des Projekts Geo-Resume für das Jahr 2023 überwacht wurden, vorgestellt. Die Temperaturen bei EWS liegen innerhalb der regulatorischen Grenzen. Die jährliche durchschnittliche Wärmelast der Systeme lag zwischen 15 kW und 49 kW. Der Vergleich der Jahresarbeitszahlen zeigt, dass die erdgekoppelten Wärmepumpen im Durchschnitt effizienter sind als die Luft-Wärmepumpen. Die JAZ der überwachten Systeme lag zwischen 2,9 und 5,2. Der Vergleich der ermittelten Leistung der Erdwärmesonden mit der Planung

zeigt eine große Abweichung. Das zeigt die Notwendigkeit, die Auslegung von Systemen, die länger in Betrieb sind, mittels Monitoring zu überprüfen und gegebenenfalls angepasste Betriebsstrategien zu verwenden. Die Verfügbarkeit der erforderlichen Mindestmesstechnik und entsprechender Datenpunkte sollte zu Beginn des Betriebs gegeben sein, um eine mögliche Abweichung von der Planung von Anfang an verfolgen und früh erkennen zu können. Schließlich zeigen die Ergebnisse der Langzeitüberwachung, dass die Erdreichtemperaturen auch nach Jahreszeit variieren und empfindlich auf den Wärmehaushalt des Erdreichs reagieren. Erst durch die Langzeitüberwachung ist es tatsächlich möglich, einen Drift der Grundwassertemperaturen sicher zu erkennen und durch Änderung der Heiz-/Kühllasten und Betriebsmodi zu steuern.

Danksagung

Das der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Vorhaben „Geo-Resume“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE4021A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Wir danken unserem Verbundpartner dem Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen sowie den involvierten geologischen Diensten, insbesondere dem LBEG, sowie den Betreibern.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Stene, K. Midttømme, H. Skarphagen, und B. Gleditsch Borgnes, „Design and Operation of Ground-Source Heat Pump Systems for Heating and Cooling of Non-Residential Buildings“, gehalten auf der 9th International IEA Heat Pump Conference, Zürich, 2008.
- [2] D. Günther *u. a.*, „WPsmart im Bestand: Felduntersuchung optimal abgestimmter wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid)“, Fraunhofer ISE, Freiburg, Abschlussbericht, 2020.
- [3] B. Chhugani, P. Pärish, S. Helmling, und F. Giovannetti, „Comparison of PVT - heat pump systems with reference systems for the energy supply of a single-family house“, *Solar Energy Advances*, Bd. 3, S. 100031, 2023, doi: 10.1016/j.seja.2022.100031.
- [4] F. Bockelmann und M. N. Fisch, „It Works—Long-Term Performance Measurement and Optimization of Six Ground Source Heat Pump Systems in Germany“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 24, S. 4691, Dez. 2019, doi: 10.3390/en12244691.
- [5] W. T. Sommer *u. a.*, „Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy storage“, *Hydrogeol J*, Bd. 22, Nr. 1, S. 263–279, Feb. 2014, doi: 10.1007/s10040-013-1066-0.
- [6] K. S. Kramer, S. Mehnert, G. Munz, S. Helmling, und M. Lämmle, „Photovoltaic Thermal Technology Collectors, Systems, and Applications“, *Energy Tech*, Bd. 11, Nr. 12, S. 2300378, Dez. 2023, doi: 10.1002/ente.202300378.