

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

„Praxistauglichkeit mitteltiefer Erdwärme- Thermosyphons zur Gebäudeenergieversorgung“

Antragsteller:

Wöltjen GmbH Umwelttechnik & Brunnenbau
Auf dem Kampe 3a
31582 Nienburg/Weser
Dirk.fennekoldt@ub-woeltjen.de
Tel: 05021 60390

Projektleiter:

Herr Fennekoldt
dirk.fennekoldt@ub-woeltjen.de

Kooperationspartner:

Institut für Thermodynamik
Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac
An der Universität 1, Gebäude G3
30823 Garbsen
kabelac@ift.uni-hannover.de
Tel: 0511 762 2877

Verfasser: Janina Hagedorn, Robin Kahlfeld, Bernd Werfelmann, Dirk Fennekoldt,

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | IV |
| Formelzeichen..... | V |
| Zusammenfassung | 1 |
| 1 Einleitung..... | 2 |
| 2 Hauptteil | 5 |
| 2.1 Beschreibung von bestehender Anlage und Umbau | 5 |
| 2.2 Methodik und Grundlagen zur Auswertung der Messdaten | 10 |
| 2.3 Messsystem und Datenerfassung | 13 |
| 2.3.1 Wärmepumpen..... | 13 |
| 2.3.2 Faseroptische Temperaturmessung der Erdreichtemperatur..... | 14 |
| 2.3.3 Heizungsanlage..... | 15 |
| 2.4 Auswertung der Messdaten..... | 15 |
| 2.4.1 Heizsaison 2021/2022 (Glattrohrsonde) | 15 |
| 2.4.2 Heizsaison 2022/2023 (Glattrohrsonde) | 16 |
| 2.4.3 Heizsaison 2023/2024 (Wellrohrsonde) | 23 |
| 2.4.4 Zusammenfassende Bewertung der Messungen | 27 |
| 2.5 Erkenntnisse bezüglich der Vorhabensfragen..... | 28 |
| 2.6 Veröffentlichungen..... | 30 |
| 3 Fazit | 31 |
| Literaturverzeichnis | 34 |
| Anhang..... | 35 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Funktionsprinzip einer CO ₂ -Phasenwechsel-Erwärmesonde mit nachgeschaltetem Wärmepumpenkreislauf..... | 3 |
| Abbildung 1-2: Lage der beiden Erwärmesonden (GT1 und GT2) sowie der Heizzentrale des Gebäudes auf dem Firmengeländer der Wöltjen GmbH Umwelttechnik & Brunnenbau [Goo20, aus Antrag] | 4 |
| Abbildung 2-1: Aufbau von Sondenrohr und gemessene geologischen Eigenschaften über die Bohrlochtiefe der Wellrohrsonde..... | 6 |
| Abbildung 2-2: Leitungsgaben zum Gebäude (links) und zwischen den Wärmepumpen (rechts) | 6 |
| Abbildung 2-3: Pufferpeicher (links) und Anschluss an Gebäudeheizung (rechts)..... | 7 |
| Abbildung 2-4: Frischwasserstation mit Nachheizung | 7 |
| Abbildung 2-5: Wärmepumpe GT2 mit abgehenden Leitungen zur Gebäudeheizung inklusive Zirkulationspumpe..... | 8 |
| Abbildung 2-6: Fließschema mit des Wärmepumpencontainers GT2 der Glattrrohrsonde [Roe22]..... | 8 |
| Abbildung 2-6: Fließschema mit der Heizungsanlage des Bürogebäudes [Roe22]..... | 9 |
| Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der verlegten faseroptischen Temperaturmessung um die Sonden [nötig da IfT?]..... | 14 |
| Abbildung 2-8: Vergleich der Betriebszeit, Messzeit und der durchschnittlichen Zyklendauer für den Oktober 2022 | 17 |
| Abbildung 2-9: Eintrittstemperatur vom CO ₂ , Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und das mittlere COP im Oktober 2022..... | 17 |
| Abbildung 2-10: Betriebszeit, Messzeit und Tagesmittel der Zyklendauer im November 2022..... | 18 |
| Abbildung 2-11: Eintrittstemperatur des CO ₂ , Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und die Arbeitszahl im November 2022 | 19 |
| Abbildung 2-12: Betriebszeit, Messzeit und Tagesmittel der Zyklendauer im Dezember 2022 und Januar 2023 | 20 |
| Abbildung 2-13: Eintrittstemperatur des CO ₂ , Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und die Arbeitszahl | 21 |
| Abbildung 2-14: Betriebszeit, Messzeit und Tagesmittel der Zyklendauer im Februar 2023 | 21 |
| Abbildung 2-15: Eintrittstemperatur des CO ₂ , Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und die Arbeitszahl | 22 |
| Abbildung 2-16: Messung der Wandtemperaturen von September 2022 bis Februar 2023 | 23 |
| Abbildung 2-17: Gemittelte Erdreichtemperaturprofile der Wellrohrsonde für gelistete Daten und Referenztemperaturprofil vom 28.09.2022..... | 24 |
| Abbildung 2-18: Tagesarbeitszahl für Glattrrohr (oben) und Wellrohr (unten) | 25 |
| Abbildung 2-19: mittlere Taktung (rot) und mittlerer Gütegrad (grün)..... | 25 |
| Abbildung 2-20: Gütegrad und Temperaturen für den 22.11.2022 (Glattrrohrsonde, oben) und den 07.03.2024 (Wellrohrsonde, unten) | 26 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-21: Gütegrad und Temperaturen für den 04.01.2023 (Glattrohrsonde, oben) und den 04.03.2024 (Wellrohrsonde, unten) | 27 |
|---|----|

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2-1: Messgrößen an den Wärmepumpen | 13 |
| Tabelle 2-2: Auswertung der Heizsaison 2021/2022 | 16 |
| Tabelle 2-3: Kostenvergleich Phasenwechselsonde/Standardsonde für 30 kW Wärmeentzugsleistung | 29 |
| Tabelle 0-1: Auswertung der Wärmepumpe Heizsaison 2022/2023 | 35 |
| Tabelle 0-2: Auswertung der Zähler Heizsaison 2022/2023 | 36 |

Formelzeichen

| Symbol | Bezeichnung | Einheit |
|-----------------|------------------------------|-------------------|
| c_p | Spez. Isobare Wärmekapazität | J/(kg K) |
| E | Energie | J |
| g | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| h | Spez. Enthalpie | J/kg |
| \dot{m} | Massenstrom | kg/s |
| P | Leistung | W |
| Q | Wärme | J |
| \dot{Q} | Wärmestrom | W |
| T | Temperatur | K |
| t | Zeit | s |
| \dot{V} | Volumenstrom | m ³ /s |
| W | Arbeit | J |
| w | Geschwindigkeit | m/s |
| z | Höhe | m |
| η | Wirkungsgrad | - |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| ϑ | Temperatur | °C |
| ab | abgeführt | |
| a/ aus | austretend | |
| CO ₂ | CO ₂ | |
| e/ ein | eintretend | |
| el | elektrisch | |
| Heiz | Heizung | |
| m | Mittel | |
| rev | reversibel | |
| W | Wasser | |
| zu | zugeführt | |

Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Praxistauglichkeit mitteltiefer CO₂-Phasenwechsel-Erdwärmesonden in Kombination mit Wärmepumpen zur verbrauchsgesteuerten Gebäudewärmeerzeugung geprüft. Dazu wurden über die drei Heizperioden, 2021/2022, 2022/2023 und 2023/2024, jeweils einzeln eine 368 m und eine 388 m tiefe Sonde mit nachgeschalteter Wärmepumpe zur Beheizung eines 1600 m² großen Bürogebäudes mit zwei Einliegerwohnungen eingesetzt und dabei messtechnisch überwacht. Das beheizte Gebäude verfügt über konventionelle einfache Heizkörper und benötigt eine eher hohe Vorlauftemperatur von ca. 40 – 55°C. Zielsetzung war im Zeitraum von drei Heizperioden durch messtechnische Überwachung von Sonden, Wärmepumpen, Gebäude und Erdreich um die Sonden nachzuvollziehen, ob die Sonden immer zuverlässig und ohne zu starkes Auskühlen des Erdreichs Wärme bereitstellen. Weiterhin wurde geprüft, wie der Wärmeentzug durch die Sonden rein über die Gebäudewärmeanforderung regelbar ist. Im Rahmen der betrachteten Heizperioden wurde außerdem die Effizienz der Sonde-Wärmepumpen-Kombination und der gesamten Anlage über charakteristische Kennzahlen wie COP und Gütegrad beurteilt.

Die Glattrohrsonde lieferte ab Dezember der ersten Heizperiode 2021/2022 bis Februar der dritten Heizperiode 2023/2024 jederzeit genug Wärme um den Bedarf des Gebäudes zu decken. Die thermischen Entzugsleistungen lagen dabei im Bereich von 20 – 30 kW. Ein unzulässiges Auskühlen des Erdreichs trat nicht ein und eine Regeneration innerhalb der Heizperiode konnte beobachtet werden. Im Zeitraum von Februar 2024 bis April 2024 wurde die Wellrohrsonde betrachtet, die den Wärmebedarf des Gebäudes ebenfalls zuverlässig vollständig decken konnte. Beide Sonden konnten verbrauchsgesteuert genauso über den Wärmebedarf geregelt werden wie konventionelle Solesonden. In der ersten Heizperiode lag die mittlere Leistungszahl der Wärmepumpe und Glattrohrsonde bei 2,95 und in der zweiten bei 2,85. Im Zeitraum von Februar bis April 2024 lag die mittlere Leistungszahl der Wärmepumpe mit Wellrohrsonde bei 3. Die Gütegrade beider Systeme lagen etwa im Bereich von 0,3 bis 0,4, wobei die Wellrohrsonde tendenziell höhere Gütegrade aufweist.

Das beschriebene Vorhaben wurde gefördert durch die DBU - Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

Aktenzeichen: 36086/01 – 24/0

Der Abschlussbericht kann über die Wöltjen GmbH Umwelttechnik & Brunnenbau bezogen werden.

Dirk.fennekoldt@ub-woeltjen.de

1 Einleitung

Das durchgeführte Projekt hatte die Zielsetzung zu untersuchen, inwieweit mitteltiefe CO₂-Erdwärmesonden in Kombination mit Wärmepumpen verbrauchsgesteuert zur Beheizung von Mehrfamilienhäusern, Gewerbeimmobilien sowie perspektivisch auch für Nahwärmenetze eingesetzt werden können. Dabei ist die Erdwärmesonde eine passiv, ohne zusätzlich Pumpe arbeitende Quelle von Erdwärme, die einen sehr niedrigen Flächenbedarf aufweist und somit für dichter besiedelte Gebiete eine alternative darstellt.

Die Motivation für die Durchführung des Projektes ergibt sich aus dem Ziel der Dekarbonisierung des Energiesektors. Neben Industrie- und Verkehrssektor besteht ein Großteil des Energiebedarfs in Deutschland aus der Gebäudeenergieversorgung. Im Jahr vor Projektbeginn, 2019, entfielen 84% der in Haushalten benötigten Endenergie auf Niedertemperaturwärme, also etwa Heizung und Warmwasser, wovon noch 71% durch fossile Energieträger abgedeckt wurden [Schm20], an diesen Größenordnungen hat sich keine signifikante Änderung ergeben. Folglich ergab und ergibt sich hier die Notwendigkeit in Bestandsgebäuden und auch in Neubauten auf fossilen Energien basierende Heizungssysteme durch weitgehend CO₂-neutrale Heizungskonzepte, insbesondere durch Wärmepumpen, zu ersetzen.

Wärmepumpen benötigen eine Wärmequelle, welche die aus der Umwelt aufgenommene Wärme bereitstellt, die durch die Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht wird. Hierfür kann Umgebungsluft, Erdwärme sowie wenn möglich Grund- oder Flusswasser in Frage kommen. Bei der Auswahl der Wärmequelle müssen zum einen die, besonders flächentechnische, Verfügbarkeit sowie das Temperaturniveau der Wärmequelle berücksichtigt werden, welches möglichst hoch sein sollte. Erdwärme bietet hier den Vorteil, dass diese im Gegensatz zu Außenluft ein konstantes Temperaturniveau stellt und im Gegensatz zu Wasser nahezu überall verfügbar ist. Allerdings ist der Flächenbedarf verschiedener Erdwärmekollektoren und -sonden sehr unterschiedlich. Oberflächennah in bis zu ca. 1,5 m Tiefe verlegte Erdwärmekollektoren haben einen hohen Flächenbedarf, wohingegen die Leistung von Erdwärmesonden, die vertikal in den Boden eingebracht werden, weitestgehend mit der Tiefe skaliert [Stor15]. Diese Bauart eignet sich folglich besonders für dichtbesiedelte Gebiete. Erdwärmesonden und auch -kollektoren werden in der gängigen Bauform durch eine Pumpe mit einem flüssigen Wärmeträgermedium durchströmt. Die untersuchte Bauform von CO₂-Phasenwechsel-Erdwärmesonden ist ebenfalls vertikal im Boden verbaut, allerdings erfolgt der Wärmetransport bzw. die Zirkulation des Wärmeträgermediums durch sogenannten Naturumlauf. Das CO₂ verdampft im unteren Teil der Sonde durch die Wärmezufuhr aus dem Erdreich, steigt dampfförmig in der Sonde auf und kondensiert oben im Kondensator aus, gibt die Wärme an den Kreislauf der Wärmepumpe ab und läuft flüssig an der Rohrwand der Sonde herab, wie in

Abbildung 1-1 dargestellt. Vorteil dieser Sondenbauart ist, dass keine zusätzliche Energie benötigt wird um das Wärmeträgermedium durch die Sonde zu Pumpen und nur ein niedriger Platzbedarf entsteht, da die Leistung der Sonde in die Tiefe skaliert werden kann. Durch die immer höhere Tiefe der Sonde wird

allerdings auch die Dynamik der Flüssigkeitszirkulation geändert, da diese durch den geodätischen Druck der Dampfsäule wie auch durch den Temperaturgradienten zwischen den Enden des Sondenrohrs beeinflusst wird.

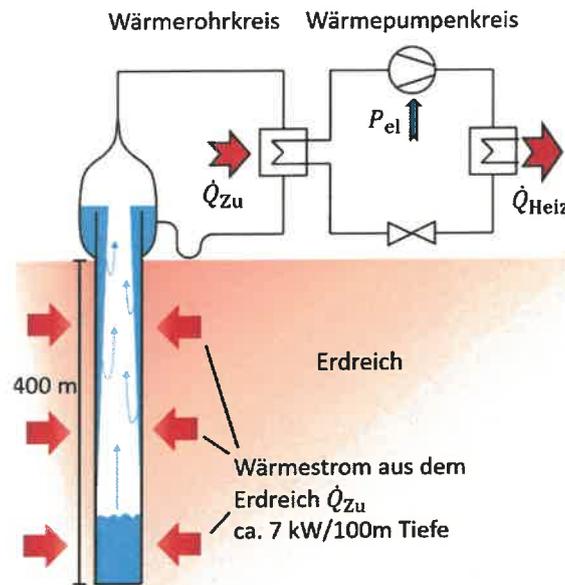


Abbildung 1-1: Funktionsprinzip einer CO₂-Phasenwechsel-Erwärmesonde mit nachgeschaltetem Wärmepumpenkreislauf

Phasenwechselsonden sind in Tiefen bis zu etwa 100 m [Ana24] etablierte und relativ gut untersuchte Apparate, welche zeitweise auch am Markt verfügbar waren. Die in diesem Projekt betrachteten Sonden haben allerdings eine Tiefe von 368 m und 388 m und zählen somit nach jetzigem Kenntnisstand zu den tiefsten existierenden Phasenwechsel-Erdwärmesonden, solche Sonden werden momentan noch im Rahmen von Forschungsvorhaben untersucht. Eine der verbauten Sonden ist dabei ein beidseitig glattes aus Abschnitten verschraubt und verschweißtes Rohr und die andere ein gewelltes Endlosrohr. Die Sonden inklusive nachgeschalteter Wärmepumpen wurden in einem vorhergehenden Projekt (BMW-Projekt, Förderkennzeichen 03ET-1050B) in das Erdreich auf dem Firmengelände der Wöltjen GmbH Umwelttechnik & Brunnenbau in Nienburg eingebracht. Im Rahmen dieses Projektes wurde die generelle Funktions- und Leistungsfähigkeit sowie die Dynamik der Sonden untersucht, siehe hierzu die Veröffentlichungen von Ebeling et al. [Ebe17a, Ebe17b].

Aufbauend auf dieses Projekt wurde im Rahmen dieses Vorhabens nun der realtechnische Einsatz dieser Erdwärmesonden zur Gebäudebeheizung untersucht. Dabei wurden beide Sonden bzw. Wärmepumpen an die Heizungsanlage des ca. 1600 m² großen Bürogebäudes mit zwei Einliegerwohnungen der Wöltjen GmbH angeschlossen, ein Lageplan der Anlage ist in Abbildung 1-2 dargestellt, welches bisher mittels einer Ölheizung beheizt wurde. Ziel der über drei Heizperioden laufenden Untersuchungen war es zu prüfen, inwieweit die Sonden jeweils einzeln tauglich sind. Sie sollen verbrauchsgesteuert zuverlässig den Heizenergiebedarf des Gebäudes decken, ohne dass die Dynamik der Sonden oder ein Auskühlen des umliegenden Erdreichs zu einer unzureichenden Heizleistung führt. Ein weiteres Ziel des Projektes

war es, zu untersuchen in wieweit die beiden unterschiedlichen Sondenrohre die Effizienz der Sonde beeinflussen. Die angestellten Untersuchungen sollen die Eignung der untersuchten Sondentechnologie im praktischen Einsatz als kommerziell verfügbare Lösung für Wärmepumpensysteme nachweisen.

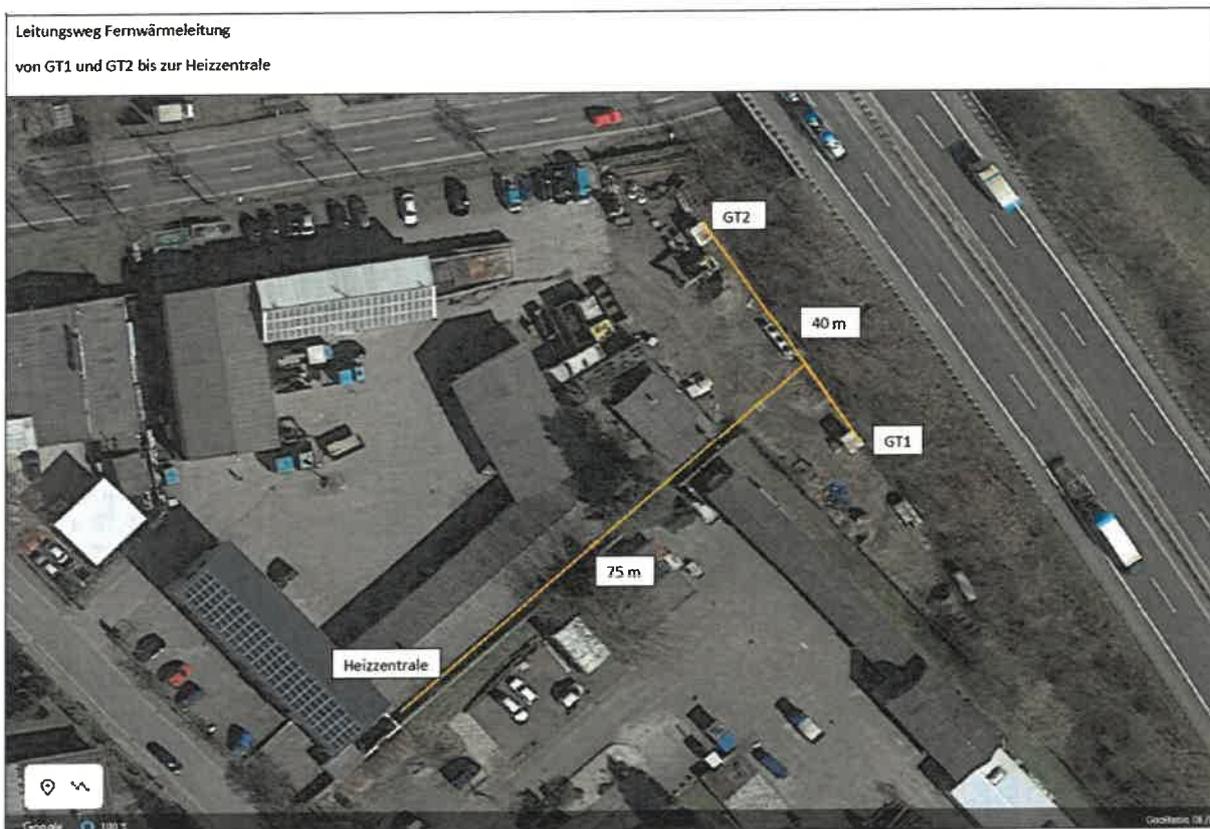


Abbildung 1-2: Lage der beiden Erwärmesonden (GT1 und GT2) sowie der Heizzentrale des Gebäudes auf dem Firmengelände der Wöltjen GmbH Umwelttechnik & Brunnenbau [Goo20, aus Antrag]

Im Vorfeld und zu Beginn der ersten Heizsaison wurde die Nahwärmeleitung zwischen den beiden Sonden bzw. Wärmepumpen und dem zu heizenden Gebäude verlegt und inklusive eines 1000 l Pufferspeichers an die Gebäudeheizung angeschlossen. Ferner wurde die für die Anlagenüberwachung nötige Messtechnik zur Datenerfassung aufgebaut, getestet und ergänzt. In der ersten Heizsaison 2021/2022 wurden die Betriebsdaten der Glattrohrsonde und Wärmepumpe sowie der Gebäudeheizung aufgezeichnet und ausgewertet. Vor Beginn der zweiten Heizsaison 2022/2023 wurden Versuche zur Optimierung des Wärmepumpenbetriebs der Glattrohrsonde durchgeführt. Anschließend wurden wieder der Betrieb der Wärmepumpe und der Gebäudeheizung messtechnisch überwacht. In dieser Heizperiode wurde ebenfalls die Erdreichtemperatur um die Sonde überwacht und in regelmäßigen Abständen sowie in Tagesmessungen aufgezeichnet. In der dritten Heizperiode 2023/2024 wurde die Wellrohrsonde an die Gebäudeheizung angeschlossen und nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Wärmepumpe konnte für einen Teil der Heizsaison auszuwertende Betriebsdaten sowie Erdreichtemperaturen erfasst werden. Ein Vergleich der Effizienz beider Anlagen konnte angestellt werden.

Im Rahmen des Projekts wurden die Ergebnisse in Form einer Veröffentlichung, zweier Posterpräsentationen sowie eines Vortrags auf einer Fachtagung der Öffentlichkeit präsentiert.

2 Hauptteil

Im folgenden Abschnitt werden die Umbaumaßnahmen an der bestehenden Anlage beschrieben, welche durchgeführt wurden um die beiden Sonden aus der vorherigen Versuchsanlage an das Heizungssystem des Gebäudes anzuschließen. Anschließend werden zu beantwortende die Forschungsfragen sowie die dafür notwendige Methodik und Grundlagen erläutert. Weiterhin werden die verbaute Messtechnik und Datenerfassung sowie die Auswertung und Beurteilung der Messdaten aus den drei betrachteten Heizperioden beschrieben.

2.1 Beschreibung von bestehender Anlage und Umbau

Zu Projektbeginn bestand die aus dem Vorgängerprojekt vorhandene Anlage aus zwei Containern, die, wie in Abbildung 1-2 gezeigt, auf dem Firmengelände angeordnet sind. Unterhalb dieser Container befinden sich die beiden Erdwärmesonden und in den Containern die zugehörigen Wärmepumpen, dargestellt in Abbildung 2-5 und als Fließschema in Abbildung 2-6. In bzw. unter Container GT1 befindet sich die 388m tiefen Wellrohrsonde, verbaut ist hier eine Stiebel Eltron Wärmepumpe Typ WPF 27 HT (Kältemittel R134a). Unter Container GT2 befindet sich die 368 m tiefe Glattrohrsonde, die zugehörige Wärmepumpe ist eine Viessmann Vitocal 300-G Typ BW 301.A29 (Kältemittel R410a). Neben der Bohrungstiefe ist im Rahmen der Bohrungen auch eine Vermessung der geologischen Eigenschaften es Erdreichs erfolgt, dargestellt in Abbildung 2-1. Der effektive Innendurchmesser der Wellrohrsonde beträgt 103 mm und der der Glattrohrsonde 114 mm.

Da die Sonden sowie die zugehörigen Wärmepumpen im vorausgegangenen Projekt zu Versuchszwecken betrieben wurden, wobei die Wärmeabfuhr mittels eines externen Kühlers an die Umgebung erfolgt ist, musste ein Anschluss mittels ca. 115 m Fernwärmeleitung an das des Heizsystems des Gebäudes erfolgen.

Die bestehende Heizungsanlageanlage war eine Ölheizung, die für die Beheizung und Warmwasserversorgung des Gebäudes genutzt wurde. Für die Einbindung der beiden Wärmepumpenanlagen GT1 und GT2 waren die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen erforderlich. Als erstes wurde eine Fernwärmeleitung von den Wärmepumpen GT1 und GT2 mit folgender Spezifikation verlegt: CALPEX PUR-KING Fernwärmeleitung Heizung DUO 50+50/162 (50x4,6 SDR11) DN 40+40, 1 ½“ PEX 6 bar. Parallel zur Fernwärmeleitung wurde in den Leitungsgraben Stromversorgungskabel, Steuerkabel und Datenleitungen für Datenübertragung verlegt und angeschlossen. Die unverfüllten Leitungsgräben mit Fernwärme, Strom- und Signalleitungen sind in Abbildung 2-2 (und im Anhang unter Abbildung 0-1 und Abbildung 0-2) dargestellt.

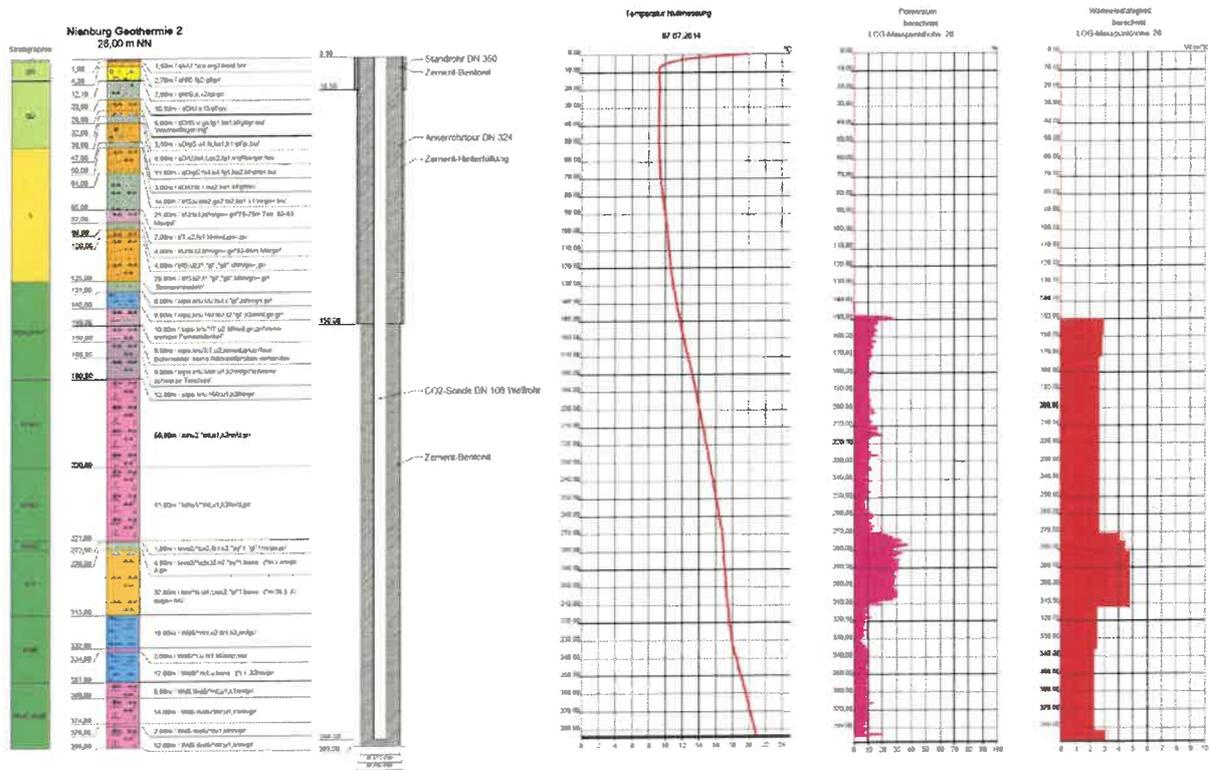


Abbildung 2-1: Aufbau von Sondenrohr und gemessene geologischen Eigenschaften über die Bohrlochtiefe der Wellrohrsonde (vgl. Abbildung 0-1 und Abbildung 0-2)



Abbildung 2-2: Leitungsgraben zum Gebäude (links) und zwischen den Wärmepumpen (rechts)

In der Heizzentrale, Fließschemadargestellt in Abbildung 2-7, ist ein Systempufferspeicher Typ KaMo SPS 1000/50-G10 mit V-Dämmung Label D aufgestellt und in der Heizzentrale integriert worden, siehe Abbildung 2-3. Für die Warmwasserbereitung wurde ein COSMO Frischwassermodul max. 36 l/min Durchfluss elektronisch geregelt installiert. Nach dem Frischwassermodul ist eine elektrische Nachheizung Typ: Stiebel Eltron SHZ 30 LCD electronic comfort nachgeschaltet, dargestellt in

Abbildung 2-4. Die Nachheizung dient dazu die vom Systemspeicher zur Verfügung gestellte Warmwassertemperatur auf eine Brauchwasserwassertemperatur von ca. 55°C anzuheben.



Abbildung 2-3: Pufferpeicher (links) und Anschluss an Gebäudeheizung (rechts)



Abbildung 2-4: Frishwasserstation mit Nachheizung

In den Wärmepumpencontainer wurde eine Zirkulationspumpe Typ: Grundfos Magna 3 25-120 installiert. Diese ist erforderlich für den Transport des erwärmten Heizungswasser zum Systemspeicher in der Heizzentrale, dargestellt als Fließschema in Abbildung 2-7.

Nachdem die beschriebenen Umbauten der Anlage durchgeführt wurden, wurde für die Heizperiode 2021/2022 die Glattrohrsonde in Betrieb genommen. Diese lief während der gesamten Betriebszeit ohne nennenswerte Störungen. Für die Heizperiode 2023/2024 sollte die Inbetriebnahme der Wellrohrsonde erfolgen. Aufgrund eines Defekts an der Wärmepumpe der zur Beschädigung der Anlaufwiderstände führte, konnte die Inbetriebnahme erst im Februar 2024 erfolgen. Ersatzteilbeschaffung und Reparatur konnten nicht schneller durchgeführt werden. Bis Februar 2024 wurde aus diesem Grund die Glattrohrsonde betrieben.



Abbildung 2-5: Wärmepumpe GT2 mit abgehenden Leitungen zur Gebäudeheizung inklusive Zirkulationspumpe

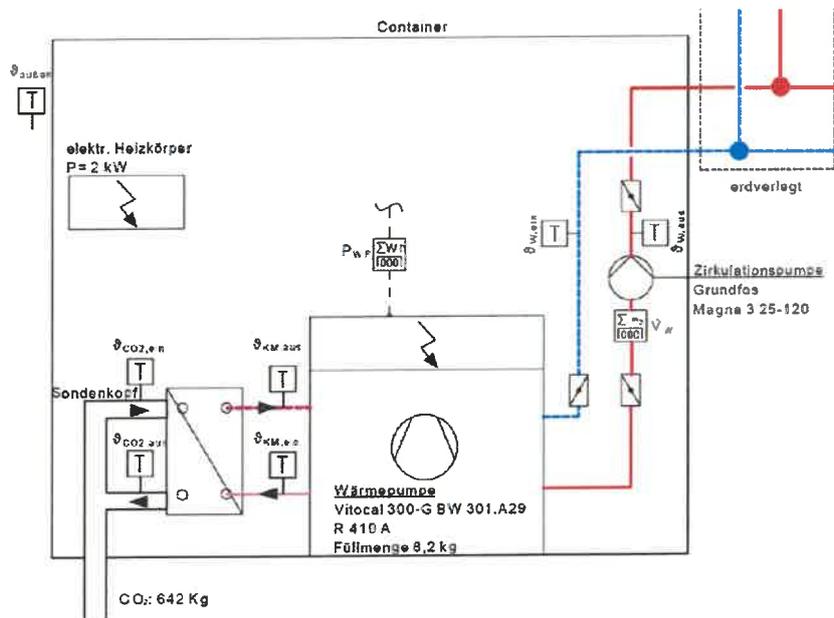


Abbildung 2-6: Fließschema mit des Wärmepumpencontainers GT2 der Glattrohrsonde [Roe22]

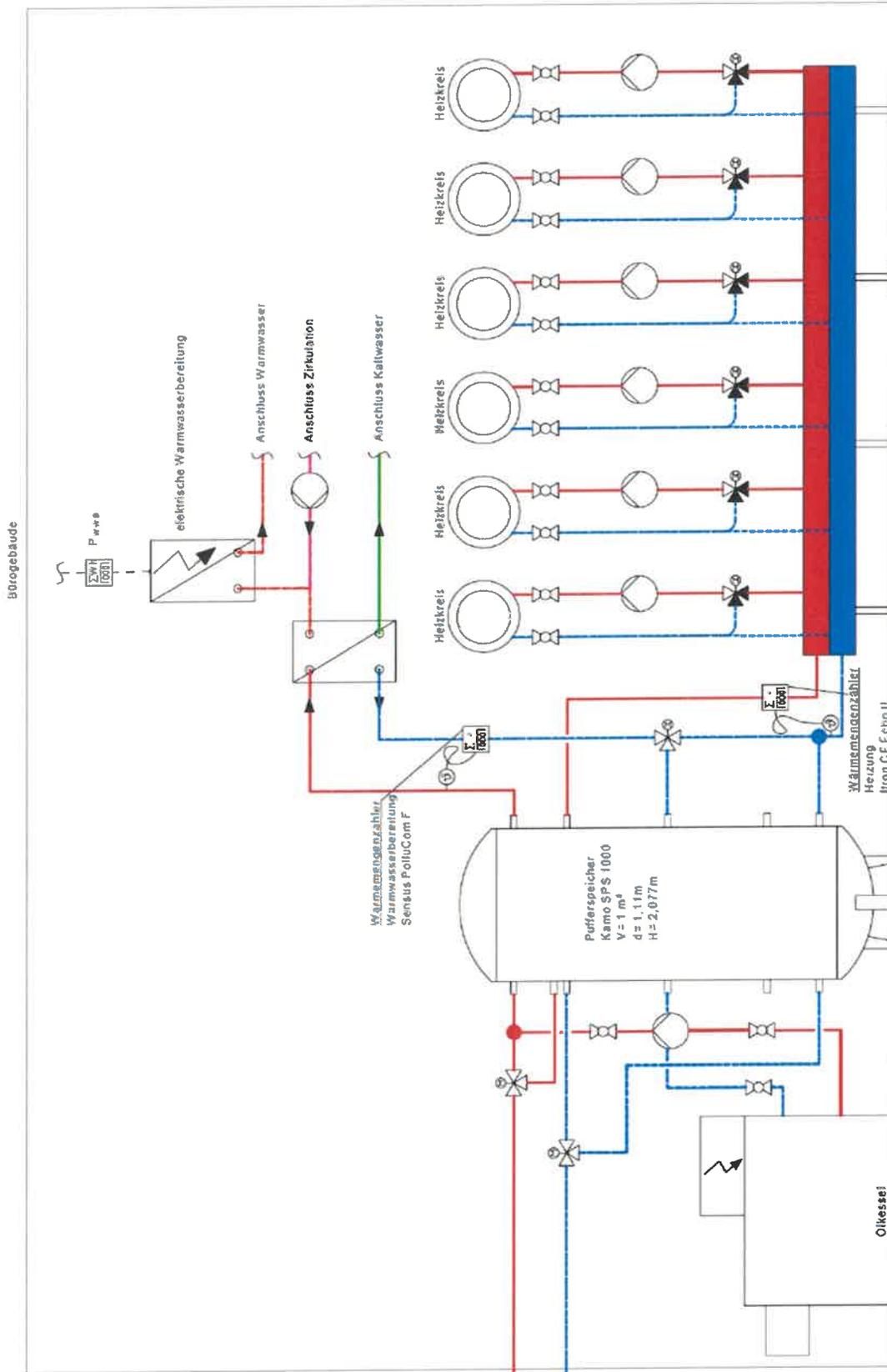


Abbildung 2-7: Fließschema mit der Heizungsanlage des Bürogebäudes [Roe22]

2.2 Methodik und Grundlagen zur Auswertung der Messdaten

Zielsetzung des Vorhabens war, wie bereits beschrieben, über einen längeren Zeitraum von drei Heizperioden die durch den Bedarf des Gebäudes verbrauchsgesteuerte Nutzung der Sonden/Wärmepumpen-Kombination zu untersuchen und ihre Eignung für den praktischen Einsatz als kommerzielle Lösung zu untersuchen und, wenn zulässig, nachzuweisen. Zu diesem Zweck sind folgende Fragestellungen zu betrachten:

- Liefert eine der Sonden einzeln jederzeit genügend thermische Energie um den Bedarf des Gebäudes zu decken?
- Kühlt das die Sonde umgebende Erdreich über eine Heizperiode unzulässig aus und führt dies zu einer Minderung der Sondenleistung?
- Ist es möglich die Phasenwechsellsonden wie konventionelle Erdwärmesonden oder Kollektoren nur verbrauchsgesteuert über den Bedarf des Gebäudes zu belasten?
- Wie Effizient ist die der Sonde nachgeschaltete Wärmepumpe und das Gesamtsystem. Ist diese Technologie vergleichbar Leistungsfähig wie andere Wärmequellen für Wärmepumpen?

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage ist im ersten Schnitt nur zu berücksichtigen, ob ein zusätzlicher Einsatz der Ölheizung im Rahmen der Projektlaufzeit notwendig wird. Da die Anforderungen an die Verlässlichkeit von Heizungssystemen allerdings sehr hoch sind, soll auch quantitativ über die Auslastung der Sonde betrachtet werden. Bei 50%iger Auslastung würde die Wärmepumpe die Hälfte eines Heiztages laufen um den Pufferspeicher auf der geforderten Temperatur zu halten und entsprechend Reserve vorsehen. Bei 100%iger Auslastung würde die Wärmepumpe dauerhaft laufen und eine weitere Erhöhung des Wärmebedarfs würde zu einem Absinken der Speichertemperatur führen. Fällt diese zu tief, kann das Gebäude nicht mehr ausreichend beheizt werden. Für die zweite Forschungsfrage wird das Auskühlverhalten des Erdreichs über die Heizperiode betrachtet, welches aus dem dauerhaften Entzug thermischer Energie folgt. Hierzu kann die Erdreichtemperatur um die Sonden mittels eines bereits vorhandenen faseroptischen Messsystems ortsaufgelöst zu verschiedenen Zeiträumen aufgenommen werden. Daraus kann abgeleitet werden wie sich die thermische Situation im Erdreich über die Heizperiode verändert und anhand der Anlagenüberwachung auch darauf geschlossen werden, wie diese darauf reagiert. Kühlt das Erdreich zu weit aus, sinkt die Entzugsleistung der Sonden ggf. zu stark ab.

Ein weiterer betrachteter Punkt ist die Dynamik der Sonden bezüglich der Bedarfsanforderung des Gebäudes. Grundsätzlich ist für den richtigen Betrieb von Phasenwechsellsonden die Taktung, also das Verhältnis zwischen Entzugszeit und Stillstand, ein wichtiger Parameter [Stor20]. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob eine Taktung der Sonde rein über die Anforderung von Wärme durch das Gebäude möglich ist oder ob eine spezielle Regelung erarbeitet werden muss.

Sind die ersten drei Forschungsfragen positiv zu beantworten, ist also eine zuverlässige Deckung des Wärmebedarfs des Gebäudes jederzeit gegeben, so stellt sich weiterhin die Frage nach der Effizienz des betrachteten Systems. Um diese zu bewerten, muss eine Energiebilanz des Gesamtsystems aus Sonde, Wärmepumpe und Gebäude sowie der Wärmepumpe alleine aufgestellt werden. Weiterhin müssen die Temperaturen von zu- und abgehenden Wärmeströmen bekannt sein. Im Folgenden werden die Kennzahlen und Bilanzen präsentiert, welche als Grundlage für die Bewertung der Effizienz der Anlage dienen.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist die Basis für die Energiebilanz des Systems sowie einzelner Komponenten und beschreibt, dass die Änderung der Energie eines Systems der Summe aus den Wärmeströmen \dot{Q} , der Summe der Leistungen P und der Differenz der Energien der ein- und austretenden Massenströmen (Enthalpie h , Geschwindigkeit w , Erdbeschleunigung g , Höhe z) multipliziert mit deren Massenströmen \dot{m}_e und \dot{m}_a entspricht.

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} + \sum P + \sum_e \dot{m}_e \left(h + \frac{w^2}{2} + g \cdot z \right)_e - \sum_a \dot{m}_a \left(h + \frac{w^2}{2} + g \cdot z \right)_a \quad 2.1.$$

Sowohl die gesamte Anlage, als auch die Wärmepumpe einzeln können als geschlossene Systeme bilanziert werden, da weder das der Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe noch der Heizkreislauf des Gebäudes untereinander noch nach außen Massenströme vorweisen. Weiterhin kann der stationäre Fall betrachtet werden. Die Bilanz vereinfacht sich also zu

$$\frac{dE}{dt} = 0 = \sum \dot{Q} + \sum P \quad 2.2.$$

Die Effizienz einer gesamten Anlage oder der Wärmepumpe einzeln kann daraus mit der Leistungszahl oder auch dem COP (Coefficient of Performance) bestimmt werden. Für eine Wärmepumpe oder ein Wärmepumpensystem ist dies das Verhältnis der abgeführten thermischer Heizleistung, \dot{Q}_{Heiz} , und der dafür benötigten elektrischen Leistung P .

$$COP = \frac{-\dot{Q}_{\text{Heiz}}}{P} \quad 2.3.$$

Während elektrische Leistung und Energie direkt messbare Größen sind, muss für den Wärmeübertrager zwischen Heizungssystem und Wärmepumpe der an das Heizungswasser abgegebene Wärmestrom \dot{Q}_{Heiz} bilanziert werden. Dies erfolgt durch Bilanzierung des durch die Umwälzpumpe bereitgestellte Wassermassenstrom, welcher beim durchströmen des Wärmeübertragers die thermische Abgabeleistung der Wärmepumpe aufnimmt. Es gilt ein stationärer Zustand $\frac{dE}{dt} = 0$ sowie keine Änderung des Massenstroms $\dot{m}_e = \dot{m}_a$ in der Wärmepumpe. Änderung der potenziellen und kinetischen Energie können hier vernachlässigt werden. Es ergibt sich daraus folgende Bilanz für den Wärmeübertrager:

$$\frac{dE}{dt} = 0 = \dot{Q}_{\text{Heiz}} + \dot{m}(h_{\text{ein}} - h_{\text{aus}}) \quad 2.4.$$

Die Heizleistung \dot{Q}_{Heiz} lässt sich aus den an der Anlage messbaren Größen und der Energiebilanz 2.4 dann sich wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_H = \dot{V}_W \cdot \rho(\vartheta_m) \cdot c_p(\vartheta_m) \cdot \Delta\vartheta_W \quad 2.5.$$

Dabei wird der Volumenstrom des Wassers \dot{V}_W , die Dichte von Wasser bei der mittleren Temperatur $\rho(\vartheta_m)$, die spezifische isobare Wärmekapazität bei der mittleren Temperatur $c_p(\vartheta_m)$ und die Temperaturdifferenz des Wassers $\Delta\vartheta_W$ verwendet. Die mittlere Temperatur wird als arithmetischer Mittelwert zwischen der aus- und eintretenden Wassertemperatur gebildet.

Die Arbeitszahl AZ wird in der Praxis häufiger verwendet, da sie für die Bewertung der Effizienz über einen definierten Zeitraum eines Wärmepumpensystems besser geeignet ist. Sie ist beschrieben durch Verhältnis der abgegebenen Wärmeenergie Q_{Heiz} und der aufgenommenen elektrischen Energie W_{el}

$$AZ = \frac{Q_{\text{Heiz}}}{W_{\text{el}}} \quad 2.6.$$

Erfolgt die Bewertung über die Leistungszahl nur für die Wärmepumpe so wird die Heizleistung welche die Wärmepumpe abgibt und die Verdichterleistung der Wärmepumpe betrachtet. Wird die gesamte Anlage betrachtet, so ist die Heizleistung zu berücksichtigen, welche auch wirklich an der Gebäudeheizung ankommt, sowie die nötige elektrische Leistung aller Verbraucher im Heizsystem.

Soll eine weitere, differenzierte Betrachtung der Effizienz der Wärmepumpe vorgenommen werden, so kann unter Anwendung des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik die physikalisch theoretisch maximale Leistungszahl COP_{rev} bestimmt werden. Für den reversiblen Fall ist dies nur durch die Temperatur des Wärmestroms im Kondensator der Wärmepumpe T_{ab} und den Temperaturhub $T_{\text{ab}} - T_{\text{zu}}$ zwischen Kondensator und Verdampfer begrenzt.

$$COP_{\text{rev}} = \frac{T_{\text{ab}}}{T_{\text{ab}} - T_{\text{zu}}} \quad 2.7.$$

Aus diesem Zusammenhang wird ersichtlich, dass die Temperatur im Kondensator der Wärmepumpe, welche direkt durch die benötigte Vorlauftemperatur vorgeben ist, einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe hat. Sollen trotzdem verschiedene Betriebszustände der Wärmepumpen verglichen werden, so kann dafür der Gütegrad verwendet werden. Der Gütegrad ist das Verhältnis zwischen der Leistungszahl und der reversiblen Leistungszahl und beschreibt, wie nah die Wärmepumpe an den bestmöglichen Betriebsfall herankommt. [Bae16]

$$\eta = \frac{COP}{COP_{\text{rev}}} \quad 2.8.$$

Über ihn lässt sich der Einfluss der veränderten Vorlauftemperatur zwischen den Heizperioden herausrechnen und einen Vergleich der Sonden kann angestellt werden.

2.3 Messsystem und Datenerfassung

Zur Beurteilung des Betriebsverhaltens, der Effizienz und Zuverlässigkeit der Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Kombination sowie der Gesamtanlage sind an allen Komponenten Messtechnik und entsprechende Systeme zur Datenerfassung vorhanden, welche im Rahmen des Projekts aufgebaut bzw. ergänzt und erweitert wurden. An den Sonden selbst ist eine faseroptische Temperaturmessung bereits für das Vorgängerprojekt im Zuge der Einbringung ins Erdreich verlegt worden. Diese erlaubt eine orts aufgelöste Darstellung der Temperatur des Erdreichs an der Sonde.

Beide Wärmepumpen sind mit Messtechnik versehen, die die dauerhafte Erfassung der Temperaturen, Drücke, Volumenströme sowie Leistungen gewährleistet, welche für die Beurteilung von Betriebsverhalten und Anlageneffizienz benötigt werden. Die Heizungsanlage des Gebäudes ist mit Zählern für Wärmemenge sowie elektrische Leistung versehen und die Gesamtanlage zu betrachten. Im Folgenden wird die Messtechnik der einzelnen Komponenten beschrieben.

2.3.1 Wärmepumpen

Zur Bewertung von Betriebsverhalten und Effizienz der Wärmepumpe ist es nötig zu wissen, bei welchen Temperaturniveaus die Wärmepumpe welches Verhältnis aus aufgewendeter elektrischer Energie zu abgegebener Heizleistung bereitstellt, um Leistungszahlen und Gütegrad zu bestimmen. Die Messstellen sind für beide Wärmepumpen identisch angeordnet und in Abbildung 2-6 gekennzeichnet.

Tabelle 2-1: Messgrößen an den Wärmepumpen

| | Messgröße | Typ |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|
| $\vartheta_{w,ein}$ in °C | Heizwasser-Vorlauftemperatur | PT100-Widerstandsthermometer |
| $\vartheta_{w,aus}$ in °C | Heizwasser-Rücklauftemperatur | PT100-Widerstandsthermometer |
| $P_{Verdichter}$ in W | Verdichterleistung Wärmepumpe | 3P-Leistungsmesser (EGZ-S01/5, AMS) |
| $\dot{V}_{Heizwasser}$ in l/min | Volumenstrom Heizwasser | Turbinendurchflussmesser (IDMW 500, alpha Redline) |
| $\vartheta_{CO_2,ein}$ in °C | CO ₂ -Eintrittstemperatur | Thermoelement Typ K |
| $\vartheta_{CO_2,aus}$ in °C | CO ₂ -Austrittstemperatur | Thermoelement Typ K |
| $\vartheta_{KM,ein}$ in °C | Kältemittel-Eintrittstemperatur | Thermoelement Typ K |
| $\vartheta_{KM,aus}$ in °C | Kältemittel-Austrittstemperatur | Thermoelement Typ K |
| ϑ_{aussen} in °C | Außentemperatur | Thermoelement Typ K |
| p_{Sonde} in bar | Druck am Sondenkopf | Piezoelektrischer Druckaufnehmer |

In Tabelle 2-1 sind die an den Wärmepumpen bzw. Sonden aufgenommenen Messgrößen aufgeführt. Von besonderer Wichtigkeit sind dabei die Heizwasservorlauf und -rücklauf Temperaturen, der Volumenstrom sowie die aufgenommene Verdichterleistung. Hieraus errechnet sich die Leistungszahl der Wärmepumpe. Die weiteren gemessenen Größen dienen dem Aufstellen von Vergleichsparametern wie dem Gütegrad sowie der Bewertung des Betriebsverhaltens der Sonde und der Wärmepumpe.

2.3.2 Faseroptische Temperaturmessung der Erdreichtemperatur

Zur Messung der orts aufgelösten Erdreichtemperatur an den Sonden ist, wie in Abbildung 2-8 dargestellt, ein Lichtwellenleiter verlegt. Der Effekt der Temperaturmessung dieses Systems beruht auf einer der Temperaturänderung folgenden minimalen Änderung des Kristallgitters des Lichtwellenleiters. Auf einen Lichtimpuls folgt daraus eine charakteristische, temperaturabhängige Rückstreuung. Aus dieser Rückstreuung kann dann auf eine orts aufgelöste Temperatur des Lichtwellenleiters geschlossen werden [Ber14]. Dieses System wird Distributed Temperature Sensing (DTS) genannt. Die verbaute Messtechnik inklusive Auswertungs elektronik und Software stammen von dem Hersteller *AP Sensing*. Der verlegte Lichtwellenleiter ist 1647 m lang und ist an beiden Sonden absteigend und aufsteigend verlegt.

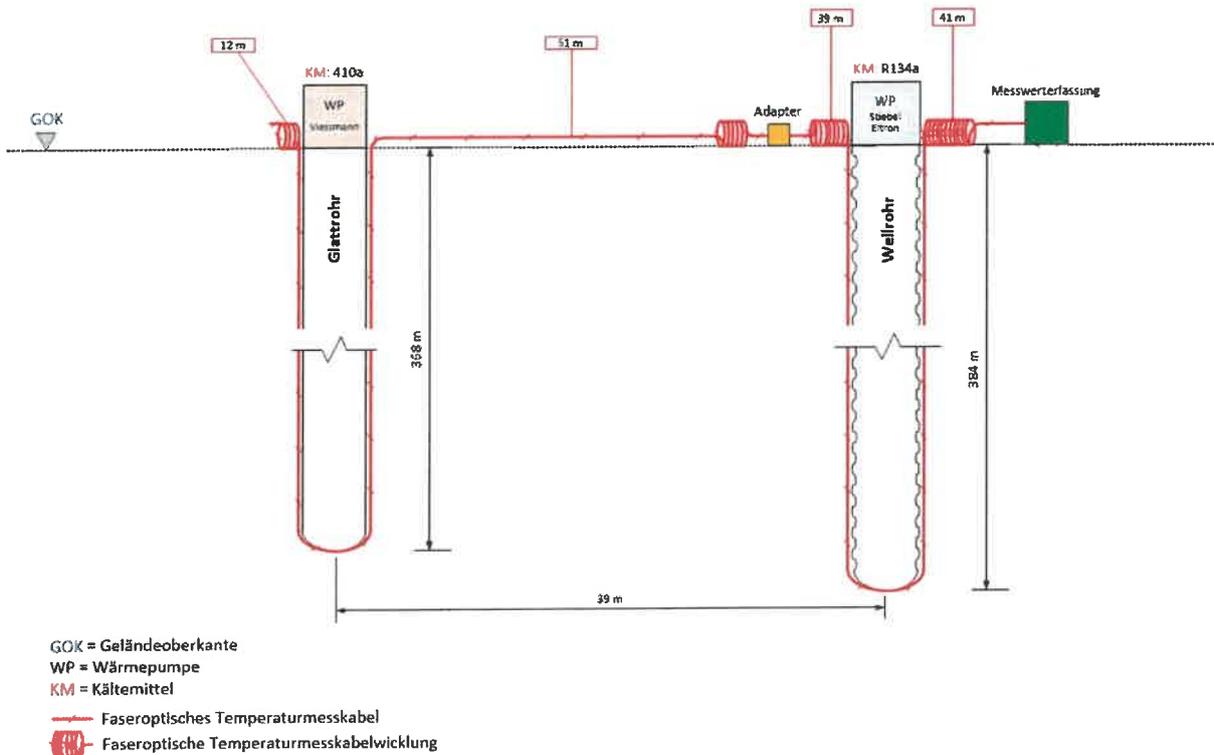


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der verlegten faseroptischen Temperaturmessung um die Sonden

2.3.3 Heizungsanlage

Zur Bilanzierung und Effizienzbewertung der gesamten Anlage sind der Aufwand der benötigten elektrischen Energie für die Wärmepumpe sowie alle weiteren Nebenaggregate (Frostschutzheizung der Container, Steuerung, Beleuchtung, Umwälzpumpe) sowie der elektrischen Nachheizung zu erfassen. Weiterhin ist die von der Wärmepumpe am Gebäude zur Heizung bereitgestellte Wärmemenge zu erfassen. Zu diesem Zwecke sind Leistungszähler für elektrische Energie an der Versorgung der Container sowie an der Brauchwassernachheizung angebracht. Weiterhin wurde ein Wärmemengenzähler, Typ *Sensus PolluCom F*, vor dem Nachheizler am Brauchwasseranschluss und ein Wärmemengenzähler, Typ *Itron CF Echo II*, direkt vor der Heizungsanlage des Gebäudes ergänzt. Beide Wärmemengenzähler erfassen die tatsächlich am Gebäude ankommende Wärmemenge und berücksichtigen so im Gegensatz zur an der Wärmepumpe gemessenen Wärmemenge Verluste in Leitungen und Speicher.

2.4 Auswertung der Messdaten

Im folgenden Abschnitt werden die nach der oben beschriebenen Methodik ausgewerteten Messdaten der drei betrachteten Heizperioden dargestellt und im Anschluss bezüglich ihrer Aussagekraft betreffende der formulierten Forschungsfragen bewertet

2.4.1 Heizsaison 2021/2022 (Glattrohrsonde)

Die Daten in diesem Kapitel sind der Arbeit von Roeddeke [Roe22] entnommen. In der Heizsaison 2021/2022 wurde die Glattrohrsonde für den Heizbedarf in Betrieb genommen. Die Tabelle 2-2 führt die Auswertung der ersten Heizsaison auf.

In der ersten Heizsaison lag die Vorlauftemperatur zunächst bei 60°C und wurde am 23.12. angepasst auf 50°C. Diese Anpassung in einem Anstieg des COPs um 0,25 zu erkennen. Die Messungen der Temperaturen $\vartheta_{\text{CO}_2,\text{aus}}$, $\vartheta_{\text{KM},\text{ein}}$, $\vartheta_{\text{KM},\text{aus}}$ am Wärmeübertrager wurden vor dem 03.02.2022 nicht gemessen.

Die Leistungszahl der Wärmepumpe konnte über die Betriebszeit zu 2,95 bestimmt werden. Dabei wurde im Durchschnitt eine Wärmemenge zwischen 11 kWh und 13 kWh pro Stunde Messzeit entzogen. Ein Anstieg des COPs ist bei steigender Außentemperatur, bei einem geringeren Wärmebedarf und bei kürzeren und längeren Heizvorgängen zu beobachten. Es konnte ein maximales COP von 4,49 im betrachteten Zeitraum erfasst werden. Dies ist ein Spitzenwert, der durch günstige Umstände aufgetreten ist. Das COP lag zu Beginn im Bereich zwischen 3 und 4. Einfluss auf das COP hat unter anderem eine längere Regenerationszeit zwischen den Entzugszeiten sowie ein geringerer Wärmebedarf

im Vorfeld. Je länger die Entzugszeit (und damit der Wärmebedarf) und die je geringer der Startwert ist, desto geringer wird das COP. Während des Heizvorgangs fiel das COP teilweise auf 2,1 bis 3,0 ab.

Tabelle 2-2: Auswertung der Heizsaison 2021/2022

| | Betrieb [h] | \dot{Q} [W] | P_{WP} [W] | COP | $\vartheta_{\text{außen}}$ [°C] | $\Delta\vartheta_w$ [K] | $\vartheta_{\text{CO}_2,\text{ein}}$ [°C] | $\vartheta_{\text{CO}_2,\text{aus}}$ [°C] | $\vartheta_{\text{KM},\text{ein}}$ [°C] | $\vartheta_{\text{KM},\text{aus}}$ [°C] |
|---------------|----------------|------------------|-----------------|------|------------------------------------|----------------------------|--|--|--|--|
| 20.12.-23.12. | 29 | 23.488 | 8.500 | 2,62 | | 6,93 | 5,99 | - | - | - |
| 14.01.-20.01. | 76 | 24.335 | 8.000 | 2,87 | | 7,48 | 4,80 | - | - | - |
| 26.01.-03.02. | 98 | 24.250 | 7.783 | 3,13 | 4,95 | 7,47 | 4,39 | - | - | - |
| 03.02.-08.02. | 56 | 24.335 | 7.739 | 3,16 | 5,13 | 7,50 | 4,30 | -7,65 | -8,69 | -4,97 |
| 24.02.-02.03. | 76 | 23.165 | 8.308 | 2,82 | 3,00 | 7,00 | 4,34 | -7,27 | -9,10 | -5,72 |
| 02.03.-08.03. | 79 | 22.732 | 8.422 | 2,74 | 2,04 | 7,14 | 4,56 | -6,95 | -8,69 | -5,19 |
| 07.04.-13.04. | 53 | 24.067 | 8.422 | 2,91 | 7,12 | 7,44 | 5,36 | -6,16 | -7,18 | -3,82 |

2.4.2 Heizsaison 2022/2023 (Glattrohrsonde)

Die Daten und Abbildungen der Auswertung für die Heizsaison 2022/2023 wurden der Arbeit von Nageler [Nag23] entnommen. Die Auswertung für die Wärmepumpe und die Zählerstände der einzelnen Wochen dieser Heizsaison sind im Anhang in Tabelle 0-1 und Tabelle 0-2 zu finden.

Oktober 2022

Der Oktober 2022 war mit durchschnittliche 19°C der wärmste bis zu dem Zeitpunkt gemessene Oktober seit Beginn der Wetteraufzeichnung. Die Heizung war bei diesen Temperaturen nicht in Betrieb, was in den Betriebszeiten und den durchschnittlichen Zyklendauern in Abbildung 2-9 zu erkennen ist. Die Wärmepumpe war aufgrund des Warmwasserbedarfs trotz der Außentemperaturen in Betrieb.

In Abbildung 2-9 sind die durchschnittliche Zyklendauer und die Betriebszeit über einen Zeitraum von einem Monat aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass durch die hohen Außentemperaturen vom 14.10.2022 bis zum 18.10.2022 der Heizbedarf und somit auch die Betriebszeit sinken. Die Zyklendauer wird kaum durch die veränderte Betriebszeit beeinflusst. Dies deutet auf eine ausreichende Regenerationszeit bei erhöhtem Verbrauch und erhöhter Vorlauftemperatur. In Abbildung 2-10 sind für den Oktober die Tages-COPs, die CO₂-Eintrittstemperatur und die mittlere Austrittstemperatur des Heizwassers aufgetragen. Eine höherer Wärmebedarf führt zu einer vermehrten Wärmeentnahme an kalten Tagen.

Es ist zu erkennen, dass dies jedoch nicht die Eintrittstemperatur des CO₂ beeinflusst, was auf lange Regenerationszeiten (und kurze Betriebszeiten) zurückzuführen ist.

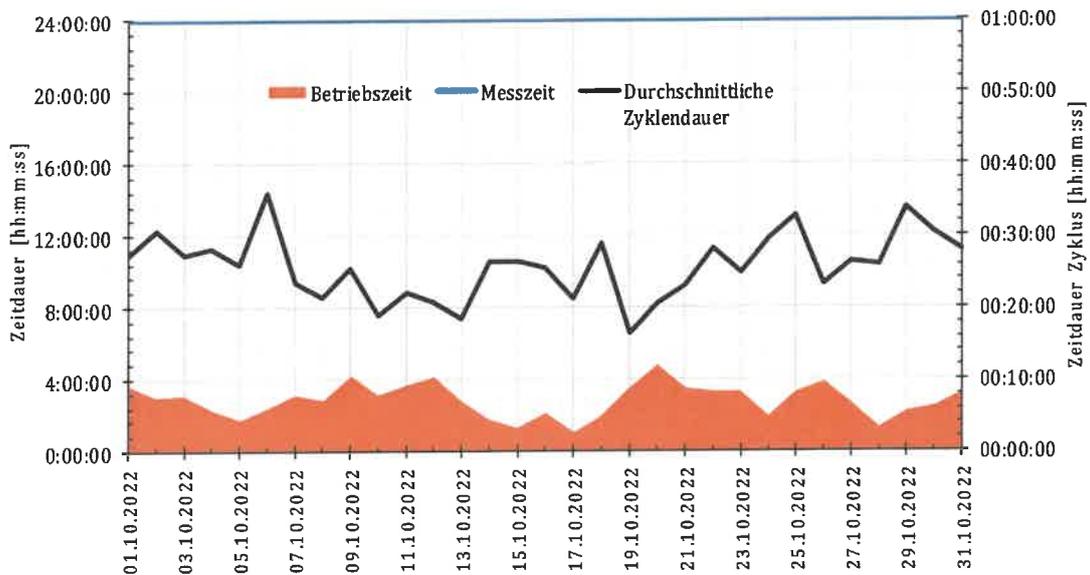


Abbildung 2-9: Vergleich der Betriebszeit, Messzeit und der durchschnittlichen Zyklendauer für den Oktober 2022

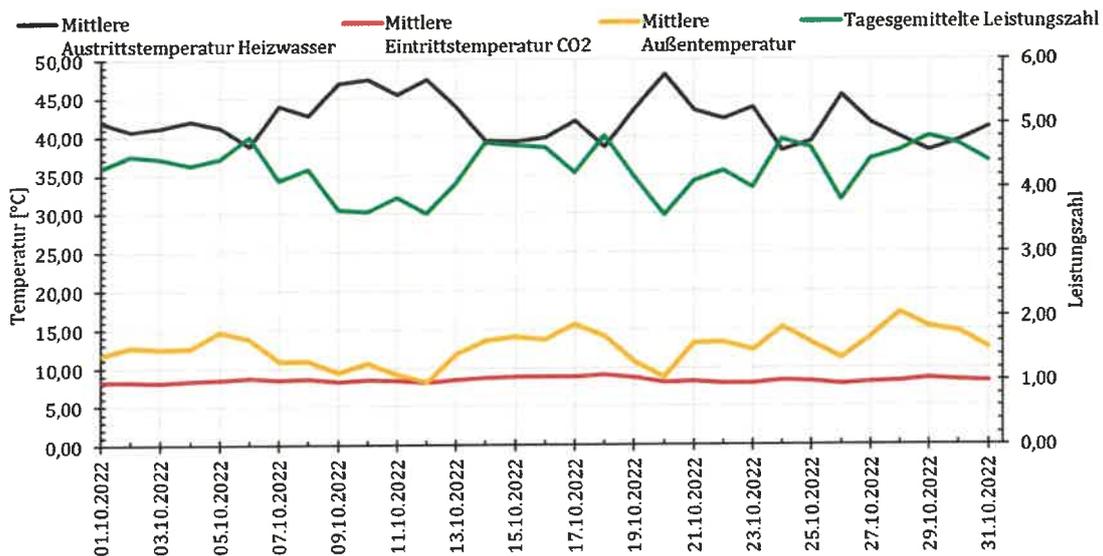


Abbildung 2-10: Eintrittstemperatur vom CO₂, Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und das mittlere COP im Oktober 2022

Die Heizleistung der Wärmepumpe lag im Oktober zwischen 24,75 kW und 27,01 kW. Durch die relativ geringe Betriebszeit deutet dies auf kurze, starke Entzugszeiten mit längerer Regenerationsphase hin. Die Leistungszahl wird erst in Monaten mit Heizleistung bestimmt.

Im Oktober lag die mittlere tagesgemittelte Leistungszahl der Wärmepumpe bei 4,22. Es ist eine Abweichung zwischen der Arbeitszahl (AZ) der Anlage und der tagesgemittelten Leistungszahl der Wärmepumpe wie in der Woche vom 14.10.2022 bis zum 20.10.2022 zu erkennen (vgl. Tabelle 0-1 und Tabelle 0-2), die Differenz liegt hier bei 1,81. In diesem Zeitraum lag die tägliche Wärmemenge bei 45,71 kWh/d.

Für das Brauchwarmwasser wird immer etwa die gleiche Menge an elektrischer Arbeit benötigt, da die Wärmepumpe dies nicht bedient. Wird weniger Heizwasser benötigt, sinkt auch die elektrische Arbeit der Wärmepumpe. Dies führt dazu, dass der Anteil der elektrischen Nachheizung mehr ins Gewicht fällt und die tagesgemittelte Leistungszahl verringert wird. Wird nur der Heizbedarf von der Wärmepumpe gedeckt, würde die tagesgemittelte Leistungszahl 2,35 bis 2,9 liegen.

November 2022

Auch der November 2022 war zu warm, die Temperatur sank jedoch zu Mitte des Monats. Dies wird als Start der Heizperiode 2022/2023 betrachtet. Ab Mitte November steigt die Betriebszeit der Sonde, was in Abbildung 2-11 zu sehen ist. Zwischen dem 09.11.2022. und dem 15.11.2022 kam es zu einer Unterbrechung der Aufzeichnung durch einen Stromausfall.

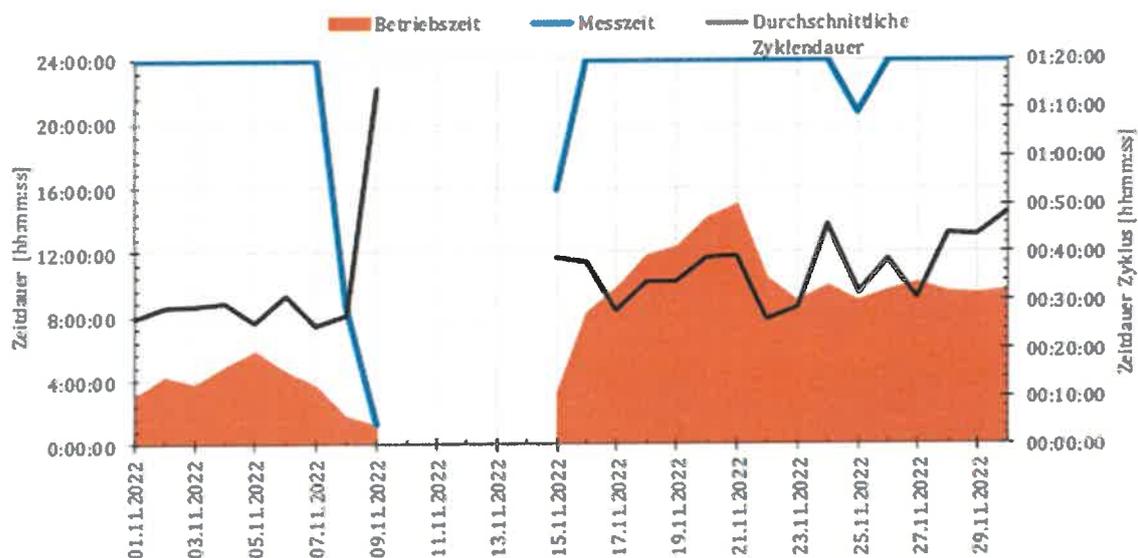


Abbildung 2-11: Betriebszeit, Messzeit und Tagesmittel der Zyklendauer im November 2022

Ab dem 15.11.2022 ist eine Steigerung der Betriebszeit zu erkennen. Der Höchstwert ist am 21.11.2022 zu erkennen, dort gab es den größten Heizbedarf für diesen Monat (Außentemperatur < 0°C). Die Vorlauftemperatur steigt in dieser Zeit an, während die Leistungszahl von Werten um 4 auf unter 3 absank. Hier ist der Einfluss der Vorlauftemperatur auf die Effizienz der Wärmepumpe gut zu sehen.

Zwar sinkt die Eintrittstemperatur des CO₂ um 1 K ab, bleibt jedoch recht konstant, wie in Abbildung 2-12 zu erkennen ist

Durch die gesunkenen Außentemperaturen ist die Wärmemenge des Brauchwassers größer als die elektrische Energie der Nachheizung. Dies ist auf höhere Vorlauftemperaturen und die Speichertemperatur zurückzuführen. Die mittlere Heizleistung sinkt von 26,7 kW auf 21,8 kW, die relative Entzugszeit steigt auf 46,67% an, die Regenerationszeiten verkürzen sich. Durch die gesunkene Regenerationszeit sinkt auch der Wärmestrom, den das CO₂ abgeben kann. Durch den geringeren Wärmestrom sinkt auch die tagesgemittelte Leistungszahl auf 2,9, die reale Arbeitszahl der gesamten Anlage auf unter 2. Die reale Arbeitszahl der gesamten Anlage bezieht Verluste durch Leitungen und ähnliches mit ein. Ein Anstieg der Außentemperatur nach dem 21.11.2022 ist auch in dem Absinken der Betriebszeit zu erkennen, die tagesgemittelten Leistungszahlen der Wärmepumpe liegen zwischen 3 und 4, die Arbeitszahl der gesamten Anlage liegen zwischen 2,2 und 2,35.

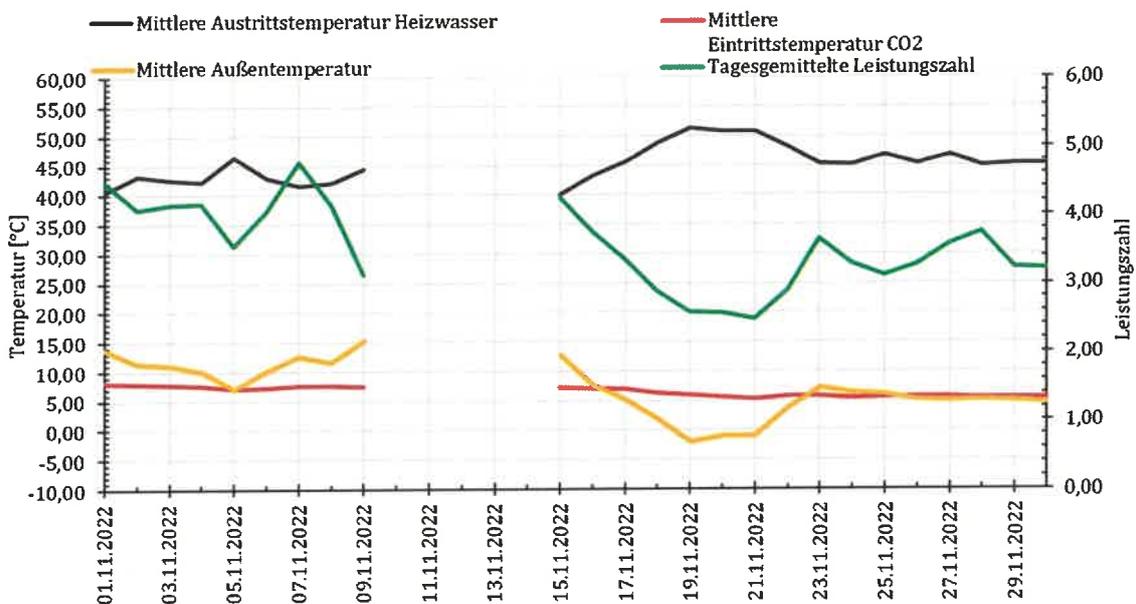


Abbildung 2-12: Eintrittstemperatur des CO₂, Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und die tagesgemittelte Leistungszahl im November 2022

Dezember 2022, Januar 2023

In der Winterpause zwischen dem 23.12.2022 und dem 10.01.2023 wurden keine Zählerstände abgelesen, weshalb die Ergebnisse des Dezembers 2022 und Januars 2023 zusammengefasst wurden.

Diese beiden Monate hatten die tiefsten Außentemperaturen der Heizperiode 2022/2023. Bei besonders kalten Außentemperaturen Mitte Dezember ist in Abbildung 2-13 die höchste Auslastung der beiden Monate mit über 80% zu erkennen.

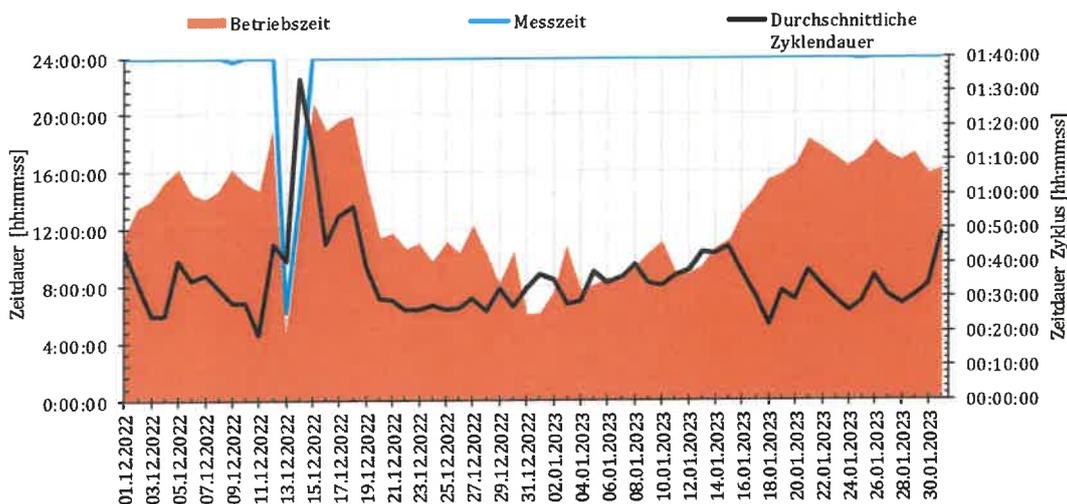


Abbildung 2-13: Betriebszeit, Messzeit und Tagesmittel der Zyklendauer im Dezember 2022 und Januar 2023

Die tagesgemittelten Leistungszahlen sanken bis Mitte Dezember wegen der erhöhten Vorlauftemperaturen (vgl. Abbildung 2-14) und dem dadurch größeren Temperaturhub auf 2,2 bis 2,6. Die hohe Auslastung der Wärmepumpe zwischen dem 09.12.2022 und dem 22.12.2022 spiegelt sich in den benötigten Wärmemengen wider, die zwischen 290 kWh/d und 322,5 kWh/d lagen. Die hohe Betriebszeit am 14.12.2022 lässt sich auf den hohen Heizbedarf und der geringeren Heizleistung des CO₂ zurückführen (vgl. Erdreichmessung vom 14.12.2022 in Abbildung 2-17). Die Sonde hatte wenig Zeit sich zu regenerieren, wodurch das Erdreich ebenfalls nicht genügend Zeit zur Regeneration hatte. Die tagesgemittelte Leistungszahl lag hier nur bei 2,27, die Arbeitszahl der gesamten Anlage sogar nur bei 1,64. Ab dem 18.12.2022 stiegen die Außentemperaturen wieder an, was in einem Absinken der Betriebszeit resultiert.

Zwischen dem 20.12.2022 und dem 13.01.2023 lag die Außentemperatur um die 10°C. In dieser Zeit war der Bedarf an Heizwärme gering, da während der Urlaubszeit die Büroräume nicht genutzt und somit kaum geheizt wurden der Bedarf lag zwischen dem 23.12.2022 und dem 09.01.2023 lediglich bei 188,83 kWh/d. Die tagesgemittelten Leistungszahlen bzw. Arbeitszahl lagen bei 2,52 (Wärmepumpe) und 2,4 (gesamte Anlage). Mitte Januar sank die Außentemperatur wieder ab, wodurch die Sonde wieder häufiger in Betrieb war und die Vorlauftemperatur anstieg. Dadurch sank auch wieder die tagesgemittelte Leistungszahl auf Werte unter 3. Es ist in Abbildung 2-14 auch zu erkennen, dass trotz sinkender Außentemperatur die Eintrittstemperatur des CO₂ relativ konstant zwischen 4°C und 6°C liegt.

Der Bedarf an Brauchwasser ist konstant über alle Zeitperioden, im Gegensatz zum Bedarf an Heizwasser.

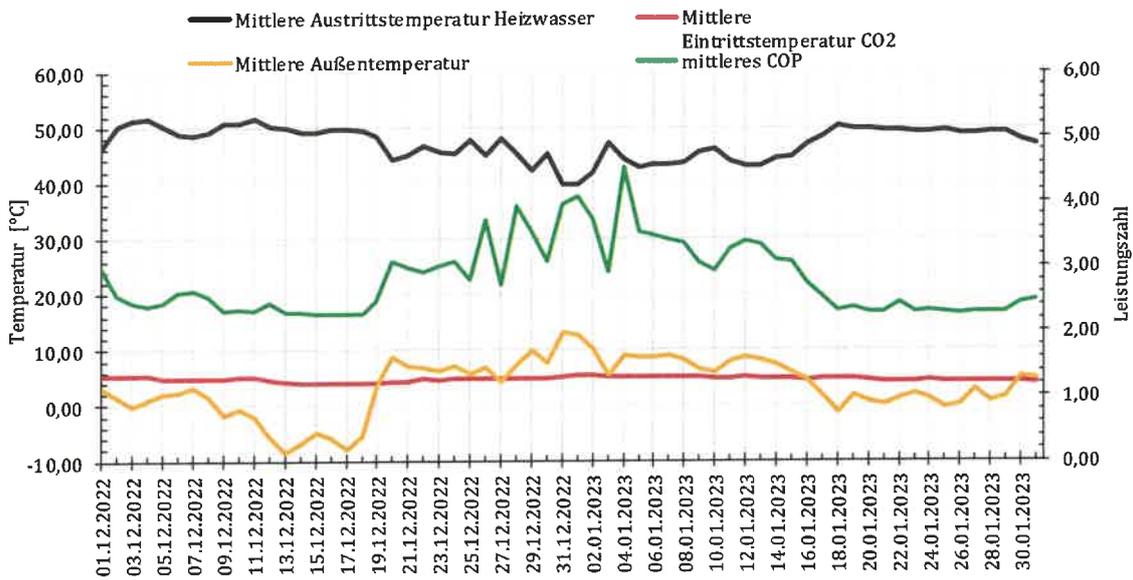


Abbildung 2-14: Eintrittstemperatur des CO2, Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und die tagesgemittelte Leistungszahl

Mitte Januar stieg der Heizwärmebedarf durch die fallenden Außentemperaturen wieder auf 295 kWh/d, was ein vergleichbarer Wert wie Anfang Dezember ist. Auch die tagesgemittelte Leistungszahlen und die relative Betriebszeit sind ähnlich. Die Regenerationsphase über die Urlaubszeit begünstigt eine kurzfristige Effizienzsteigerung.

Februar 2023

Im Februar 2023 wurden die Messdaten nur bis zum 16.02. erfasst. Die Betriebszeit lag phasenweise bei 16 h (rel. Entzugszeit 75%), siehe Abbildung 2-15.

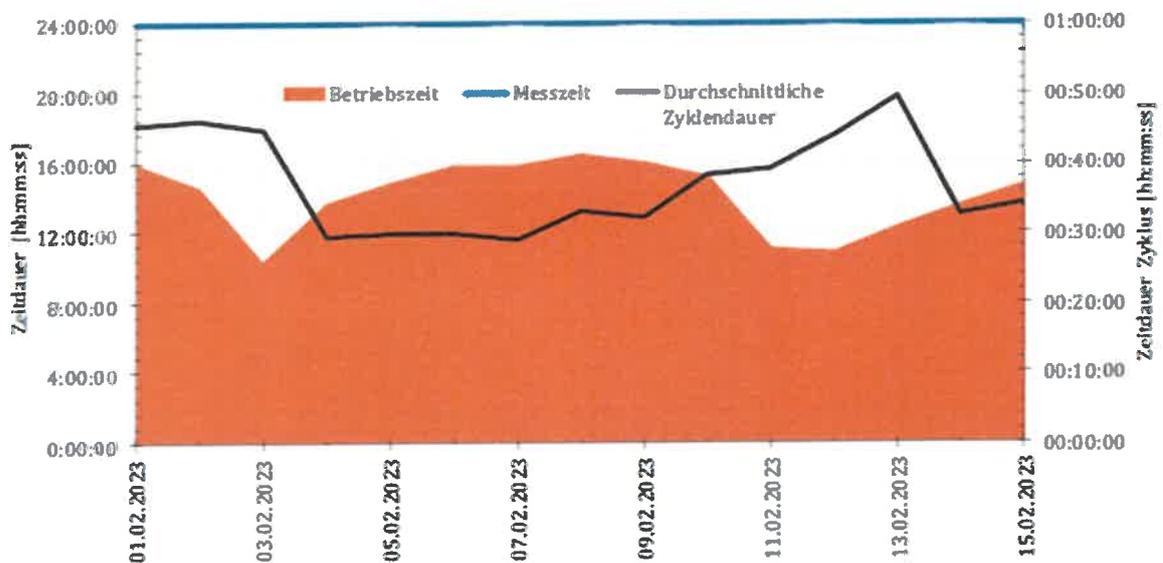


Abbildung 2-15: Betriebszeit, Messzeit und Tagesmittel der Zyklendauer im Februar 2023

Die Temperatur lag wieder um die 0°C, siehe Abbildung 2-16. Es ließ sich ein Betriebsverhalten ähnlich zu den vorherigen Monaten beobachten. Die tagesgemittelten Leistungszahlen lagen zwischen 2,4 und 3. Der Durchschnitt lag bei 2,55 und 2,69, die Werte für die reale Arbeitszahl der Wärmepumpe bezogen auf die Bilanz der gesamten Anlage zwischen 1,8 und 2.

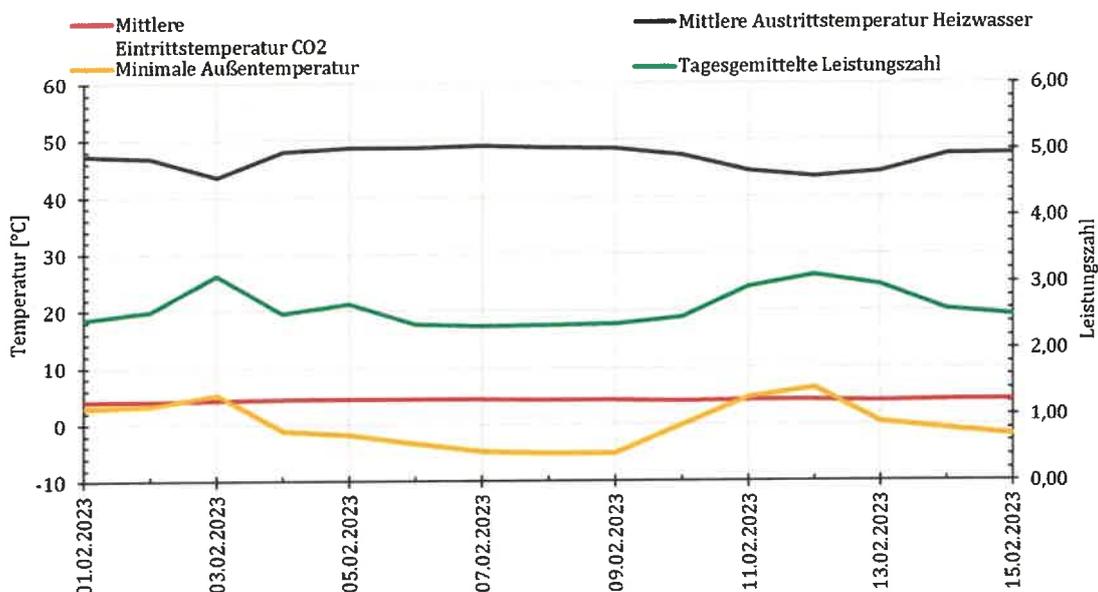


Abbildung 2-16: Eintrittstemperatur des CO₂, Austrittstemperatur des Heizwassers, Außentemperatur und die Tagesgemittelte Leistungszahl

Entlang der glatten und der gewellten Sonde wurde beim Einbau ein Lichtleiter zur Messung der Temperatur verbaut. Das verwendete Messsystem wurde in Kapitel 2.3.2 erläutert. Die Messung der Erdreichtemperatur aus der Heizperiode 2022/2023 ist in Abbildung 2-17 zu sehen. Dargestellt ist der Mittelwert für alle Messpunkte aus dem absteigenden und dem aufsteigenden Kabelarm. Eine Übereinstimmung der Temperaturen beider Kabelarme ist zuvor bestätigt worden.

Als Referenzwert für die Erdreichmessung wurde die Temperatur vor Beginn der Heizperiode am 28.09.2022 aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt arbeitete die Sonde nur für den Warmwasserbedarf, noch nicht als Heizung. Die erste Messung der Erdreichtemperatur während der Heizperiode erfolgte am 09.11.2022.

Über die Saison 2022/2023 wurde circa alle zwei Wochen die Erdreichtemperatur gemessen. In Abbildung 2-17 ist eine Abkühlung des Erdreichs bis zu den Weihnachtstagen zu erkennen (14.12.2022). Während der Weihnachtsruhe ist zwischen den Messungen vom 14.12.2022 bis 11.01.2023 eine Regenerierung des Erdreichs aufgrund des geringen Entzugs zu erkennen. Im weiteren Verlauf der Heizsaison sinkt die Temperatur nicht weiter als vor den Weihnachtsfeiertagen ab. Im Bereich von circa. 280 m bis 330 m ist eine Anomalie des Erdreichs zu erkennen. In diesem Bereich ist die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs auch deutlich größer als im restlichen Erdreich entlang der Sonde (vgl. Abbildung 2-1). Die höhere Wärmeleitfähigkeit in diesen Schichten sorgt für einen größeren

Wärmestrom, welcher von dem nicht beeinflusste Erdreich ausgeht und somit für eine schnellere Regeneration in diesen Schichten. Ab einer Tiefe von 305 m sinkt die Wärmeleitfähigkeit wieder ab, weswegen in den Temperaturverläufen eine Abnahme ab dieser Tiefe zu erkennen ist. Die Temperatur passt sich wieder dem linearen Verlauf gemäß dem thermischen Gradienten an.

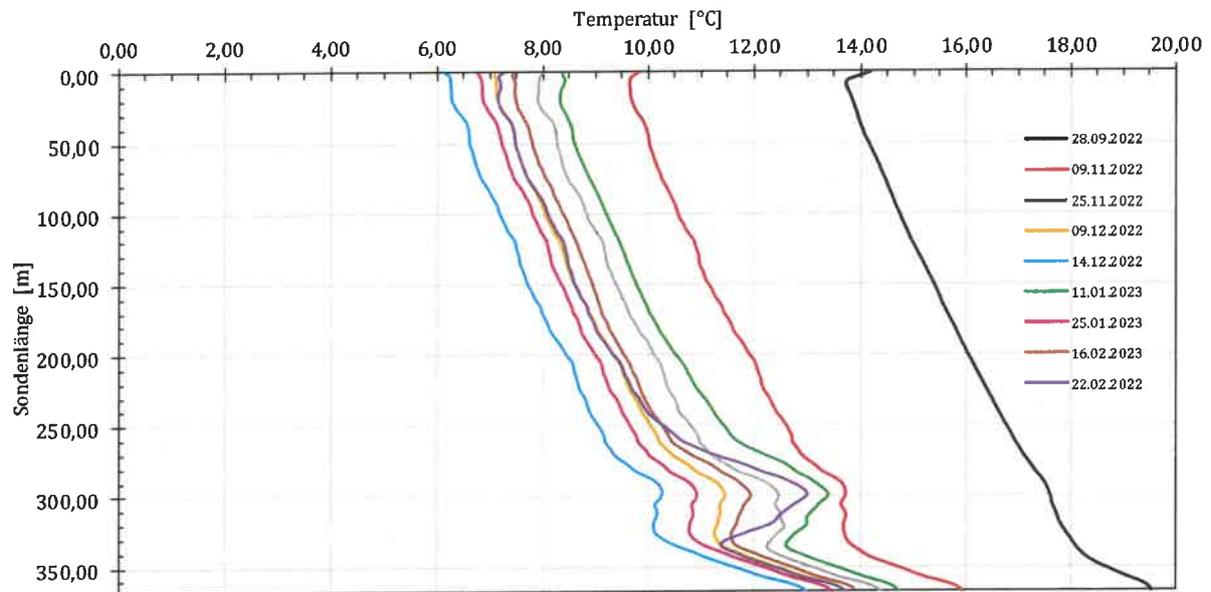


Abbildung 2-17: Messung der Wandtemperaturen von September 2022 bis Februar 2023

Es ist ebenfalls in Abbildung 2-17 zu erkennen, dass nach dem Bereich der Anomalie und auch in der Nullmessung vom 28.09.2022 der Temperaturverlauf einen Knick macht und danach deutlich langsamer absinkt. Dies deutet auf den Flüssigkeitspool hin, welcher die Wärme dem Erdreich langsamer entzieht als ein an einer Wand herabfließender Flüssigkeitsfilm, der die Wärme aufnimmt und verdampft.

Insgesamt konnte die Glattrohrsonde den Heizbedarf decken über die gesamte Heizperiode decken. Das Erdreich kühlte über die Saison sichtbar aus, deckte aber dennoch den Heizbedarf, was auch auf die immer folgenden (kurzen) Regenerationsphasen zurückzuführen ist. Es konnte in dieser Heizsaison ebenfalls nachgewiesen werden, dass der Wärmeentzug der Glattrohrsonde keinen Einfluss auf die Erdreichtemperatur der sich 40 m entfernt verbauten Wellrohrsonde hat.

2.4.3 Heizsaison 2023/2024 (Wellrohrsonde)

Die Daten und Abbildungen der Heizsaison 2023/2024 sind der Arbeit von Duchan [Duc24] entnommen. In der Heizsaison 2023/2024 wurde die Wellrohrsonde zur Gebäudebeheizung in Betrieb genommen. Aufgrund von Problemen beim Umbau, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, konnte die Funktionalität der Wellrohrsonde erst im März getestet werden. Aufgrund der Probleme wurde bis zum 01.03.2024 noch mit der Glattrohrsonde geheizt. Aus diesem Grund liegen auch keine Messdaten des Erdreichs zu Beginn der Heizperiode 2023/2024 vor. Es wurde auf die Nullmessung aus der vorherigen Heizperiode vom 28.09.2022 zurückgegriffen. Der Verlauf der Erdreichtemperatur ist in Abbildung

2-18 dargestellt. Die starke Abweichung ist auf den Testlauf der Wellrohrsonde zurückzuführen, der bereits am 07.02.2024 begonnen hat, jedoch ohne Erdreichmessung. Dem Erdreich wurde schon Wärme entzogen, bevor die Messungen gestartet haben.

Der niedrigsten Erdreichtemperaturen sind am 13.03.2024 erreicht worden. Danach regenerierte sich das Erdreich. Die Temperaturanomalie, die bei der Glattrohrsonde beobachtet werden konnte, ist auch bei der Wellrohrsonde zwischen 260 m und 365 m zu erkennen (siehe Abbildung 2-18). Hier ist die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs höher als bei dem restlichen Erdreich (vgl. Abbildung 2-1). Die Anomalie zwischen 320 und 365 m ist im Temperaturverlauf der Glattrohrsonde nicht zu erkennen, da dort bereits der Pool vermutet wird.

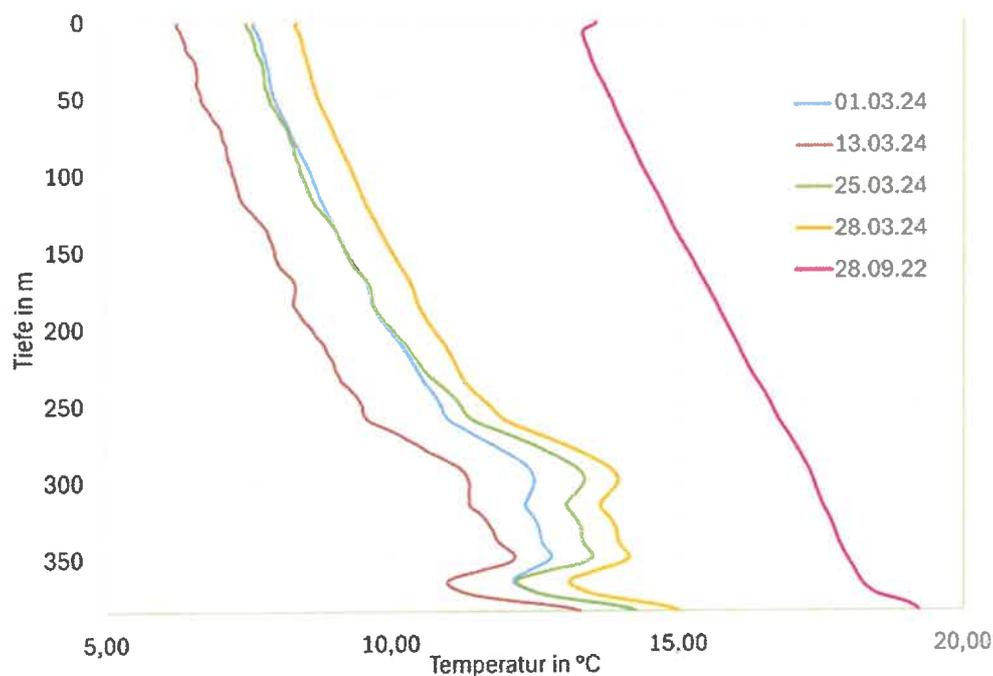


Abbildung 2-18: Gemittelte Erdreichtemperaturprofile der Wellrohrsonde für gelistete Daten und Referenztemperaturprofil vom 28.09.2022

Abbildung 2-19 zeigt die Tagesarbeitszahlen für die zweite und dritte Heizperiode. Es ist zu erkennen, dass die Tagesleistungszahlen 2024 relativ konstant bei ungefähr 3 lagen. Die Tagesleistungszahlen aus 2023 und 2024 weisen größere Schwankungen auf. Im Vergleich zum Februar 2023 ($LZ = 2,5$) liegen die tagesgemittelten Leistungszahlen etwas höher bei 3. Diese Werte sind schlecht vergleichbar mit Februar 2024, da es andere Randbedingungen zu diesem Zeitpunkt gab.

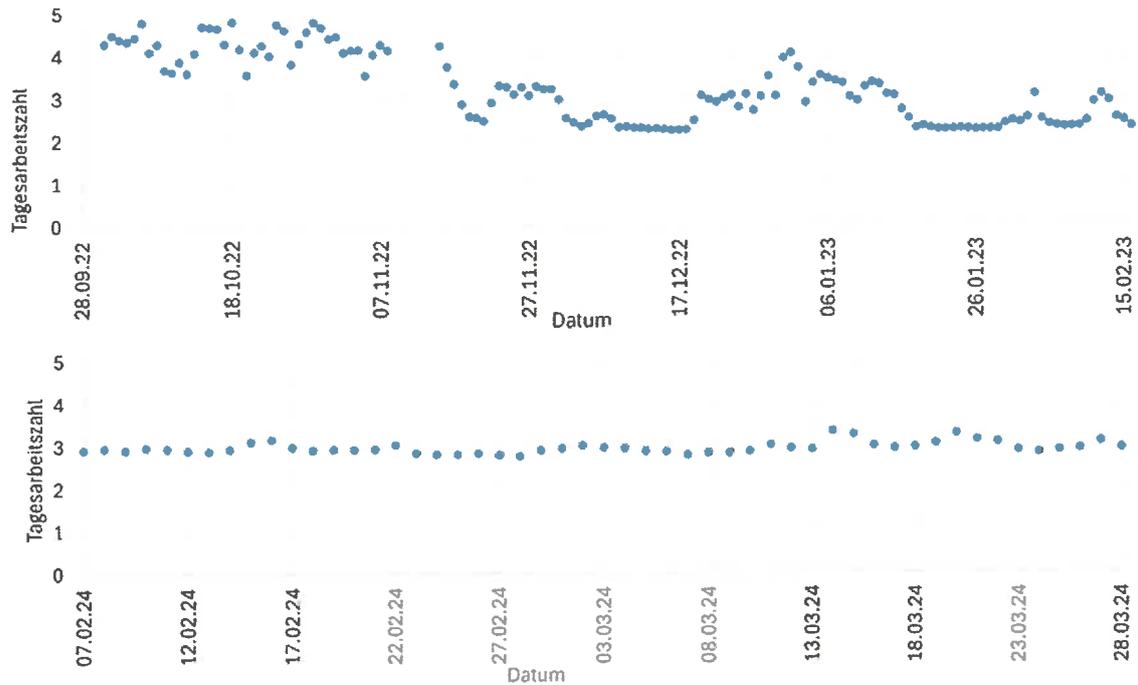


Abbildung 2-19: Tagesgemittelte Leistungszahl bzw. Tagesarbeitszahl für Glattrohr (oben) und Wellrohr (unten)

Zum Effizienzvergleich der Glattrohr- und der Wellrohrsonde wird der mittlere Gütegrad (Gleichung 2.8.) verwendet. Die Leistungszahl kann aufgrund unterschiedlicher Einstellungen der Wärmeanforderungen nicht verwendet werden, da diese den Einfluss unterschiedlicher Vorlauftemperaturen nicht berücksichtigt.

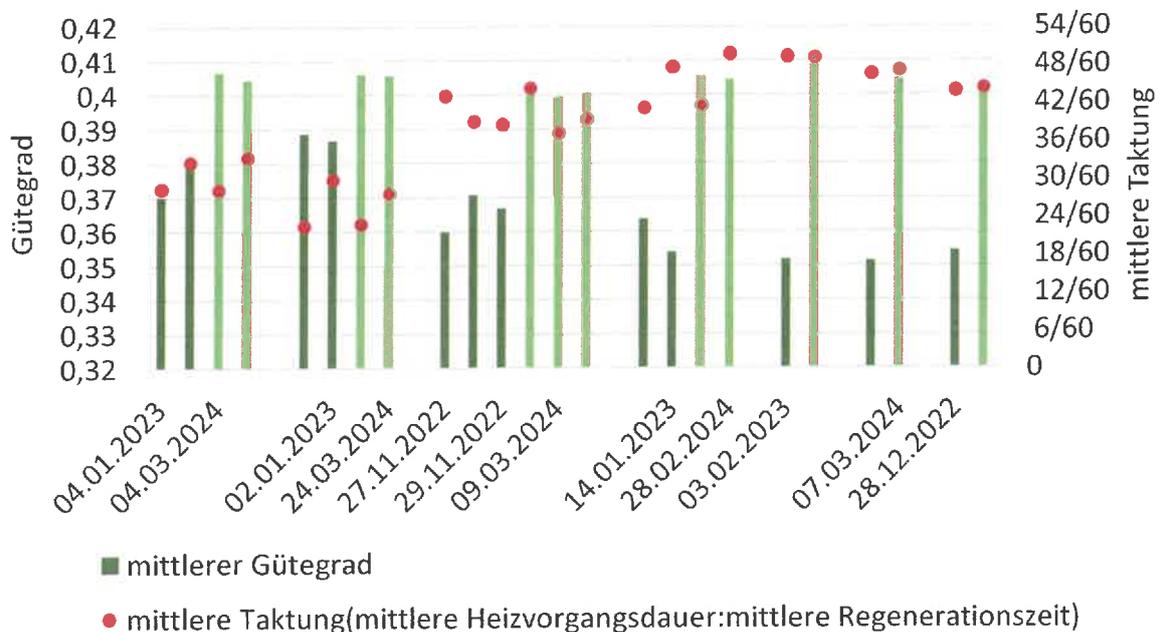


Abbildung 2-20: mittlere Taktung (rot) und mittlerer Gütegrad (grün)

Da die Messung in der Heizsaison 2023/2024 erst spät gestartet ist, ist ein direkter Vergleich der Monate März nicht möglich. Um dennoch einen Vergleich anstellen zu können, werden Tage mit ähnlichen mittleren Taktungen ausgewählt. Hierfür wurden die Häufigkeit und Dauer von Entzugs- und Regenerationszeit gezählt und ein Verhältnis aus den mittleren Zeiten gebildet. In Abbildung 2-20 sind diese Verhältnisse mit dem zugehörigen Gütegrad aufgetragen.

In Abbildung 2-20 sind für die ausgewählten Tage der Gütegrad und die mittlere Taktung aufgetragen. Für die dargestellten Tage ist zu sehen, dass die Wellrohrsonde einen höheren, konstant verlaufenden Gütegrad aufweist als die Glattrohrsonde. Für die Wellrohrsonde liegt dieser zwischen 0,4 und 0,41, das Glattrohr zwischen 0,34 und 0,39. Je höher die Taktung ist, desto größer wird die Differenz zwischen Glatt- und Wellrohrsonde.

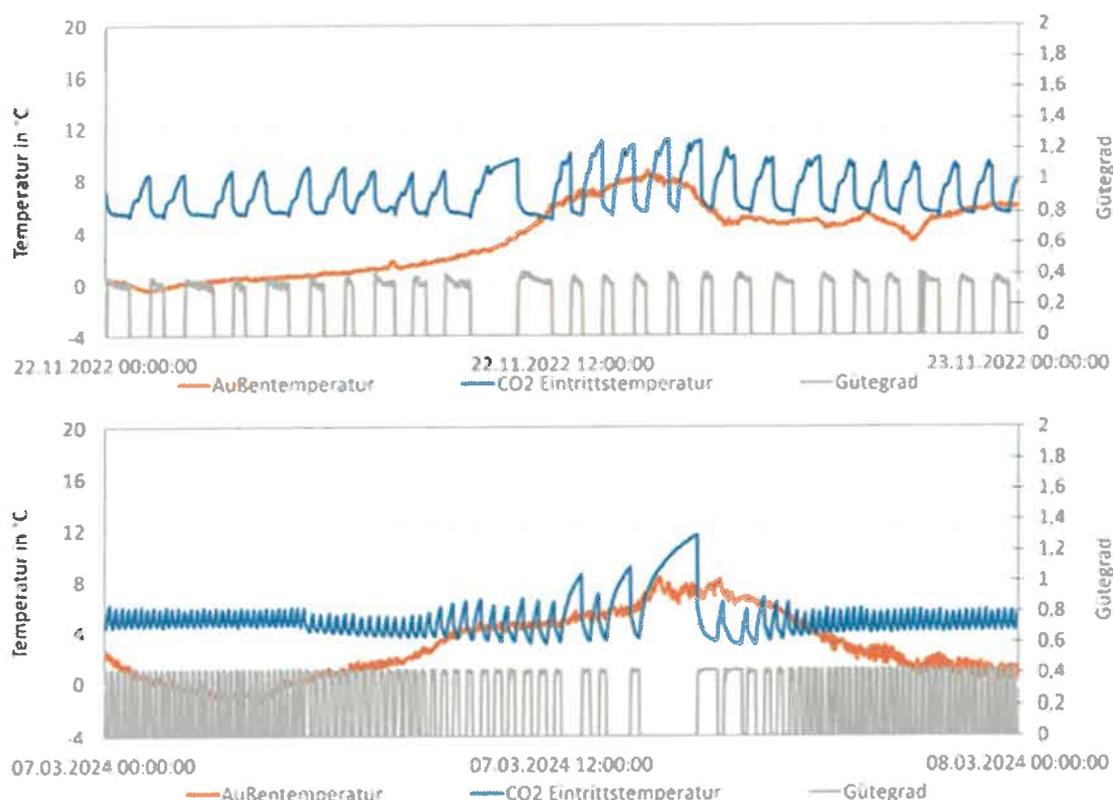


Abbildung 2-21: Gütegrad und Temperaturen für den 22.11.2022 (Glattrohrsonde, oben) und den 07.03.2024 (Wellrohrsonde, unten)

In Abbildung 2-21 sind beispielhaft für den 22.11.2022 (Glattrohr) und den 07.03.2024 (Wellrohr) der Gütegrad, die Außentemperatur und die CO₂-Eintrittstemperatur aufgetragen. Die Taktung betrug 47/60. Bei der Wellrohrsonde sind deutlich kürzere Entzugs- und Regenerationszeiten zu erkennen. Im Vergleich zu einer geringeren Taktung in Abbildung 2-22 bleibt die Effizienz der Wellrohrsonde relativ konstant (mittlere Taktung von 0,405), während die Effizienz der Glattrohrsonde dadurch abnimmt (mittlere Taktung von 0,375 zu 0,35). Es ist zu Beginn des 04.03.2024 eine besonders kurze Taktung zwischen Entzug und Regeneration zu erkennen. Dadurch ist auch ein leichtes Absinken der CO₂-

Eintrittstemperatur zu beobachten. Mit steigenden Zeiten des Entzugs und der Regeneration steigt auch die Eintrittstemperatur wieder.

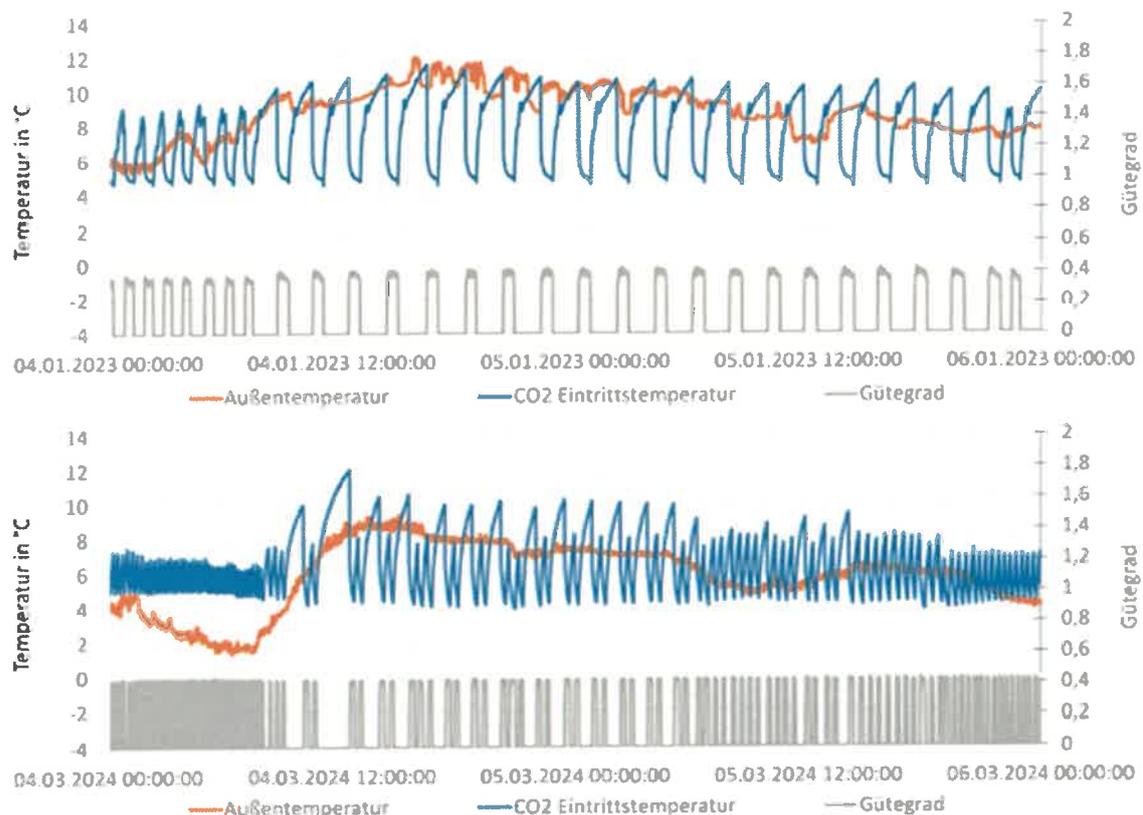


Abbildung 2-22: Gütegrad und Temperaturen für den 04.01.2023 (Glattrohrsonde, oben) und den 04.03.2024 (Wellrohrsonde, unten)

Die auf die gesamte Anlage bezogene Arbeitszahl für die Wellrohrsonde wurde vom 05.02.2024 bis zum 02.05.2024 aufgezeichnet und betrug 2,18. Die Arbeitszahl für den Monat März betrug 1,85.

2.4.4 Zusammenfassende Bewertung der Messungen

In den Heizperioden 2022/2023 und 2023/2024 konnte die Glattrohrsonde für die Gebäudebeheizung auch bei kalten Außentemperaturen über einen längeren Zeitraum gut untersucht werden. Es war zu keiner Zeit eine Zusatzbeheizung der Gebäude durch die verbaute Ölheizung oder andere Wärmequellen nötig. Die Dynamik der Sonde bei Betrieb durch verbrauchsgesteuerte Nutzung konnte unter verschiedenen Lastzuständen untersucht werden. Auch das Auskühlungsverhalten des umgebenen Erdreichs wurde entsprechend betrachtet.

Der Einsatz der Wellrohrsonde konnte nicht ausreichend getestet werden. In der betrachteten Zeitspanne ist allerdings bezüglich der Wärmebereitstellung, der verbrauchsgesteuerten Taktung sowie des Verhaltens des Erdreichs kein signifikant von der Glattrohrsonde abweichendes Verhalten zu betrachten. Zur Untermauerung der Erkenntnisse zur Wellrohrsonde soll die Heizperiode 2024/2025

ebenfalls noch betrachtet werden. Die daraus gewonnen Erkenntnisse können auch im Zusammenhang mit dem laufenden Forschungsvorhaben zur Untersuchung solcher Sonden im Technikumsmaßstab (*Strömungsformen und Wärmeübergang in einer senkrechten Zweiphasen-Erdwärme-Wellrohrsonde* Förderkennzeichen KA 1211/39-1) am Institut für Thermodynamik Anwendung finden und diese Technologie nochmals vorantreiben.

2.5 Erkenntnisse bezüglich der Vorhabensfragen

Die zu Beginn des Abschnitts angestellten Fragestellungen zu diesem Projekt sollen im Folgenden aus den präsentierten Messdaten und Erkenntnissen einschätzend beantwortet werden. Weiterhin wird die Möglichkeit einer kommerziellen Verwertung beurteilt.

Die zuverlässige Wärmebereitstellung der Wärmepumpe mit Glattrohrsonde wurde im Rahmen dieses Projektes für den Wärmebedarf des betrachteten Gebäudes nachgewiesen. Ab Dezember der ersten Heizperiode 2021/2022 bis Februar der dritten Heizperiode 2023/2024 kam es zu keinem Ausfall des Heizungssystems und es wurde keine zusätzliche Beheizung mittels der vorgehaltenen Ölheizung benötigt. Innerhalb der Heizperiode 2022/2023 sanken die mittleren Tages-Außentemperaturen dabei auf bis -9°C . In dem kürzeren Zeitraum der Betrachtung der Wellrohrsonde war ebenfalls eine zuverlässige Wärmeversorgung und ein ähnliches Anlagenverhalten gegeben. Beide Sonden waren weiterhin ohne eine speziell auf ihre Dynamik angepasste Wärmepumpenregelung zu betreiben. Die Wärmeanforderung erfolgte, gesteuert durch den Bedarf des Gebäudes, über die Temperatur des Schichtenspeichers, was zu keinerlei Problemen führte. Hier besteht keine Notwendigkeit der Anpassung gegenüber konventionellen Erdwärmesonden oder -kollektoren. Ein unzulässiges Auskühlen des Erdreichs konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Dabei stützen sich die Erkenntnisse besonders auf die vollständig erfasste Heizperiode 2022/2023.

Die mittlere Leistungszahl der Wärmepumpe für die erste Heizperiode liegt bei 2,95. Zu zweiten Heizsaison ist die mittlere Leistungszahl der Glattrohrsonde leicht abgefallen auf 2,85. Die mittlere Leistungszahl der Wärmepumpe der Wellrohrsonde lag bei 3 für den gemessenen Zeitraum, höher als die Leistungszahlen der Glattrohrsonde. Die mittleren realen Leistungszahlen der gesamten Anlage beziehen unter anderem Wärmeverluste in Rohrleitungen und Speicher sowie zusätzliche nötige elektrische Leistungen wie Containerbeheizung und Warmwassernachheizung mit ein und sind daher niedriger als die Leistungszahlen der Wärmepumpe. Für die erste Heizperiode liegt diese bei 2,34, für die zweite Heizperiode bei 1,95 und für das Wellrohr in der dritten Heizperiode bei 2,18. Die Größenordnung der Leistungszahlen der Wärmepumpe sind im Zusammenhang mit der Heizungsanlage des Gebäudes zu betrachten. Die hohen notwendigen Vorlauftemperaturen sind darauf zurückzuführen, dass es sich um ein Bestandsgebäude handelt, welches noch mit einfachen konventionellen Heizkörpern beheizt wird. Eine Modernisierung des Heizsystems im Gebäude würde zu einer Verringerung der

notwendigen Vorlauftemperatur führen, wodurch die Leistungszahl steigen kann. Trotz der kurzen Laufzeit der Wellrohrsonde ließ sich eine Funktionalität der Sonde nachweisen und deutete sogar auf einen gegebenenfalls leicht besseren Betrieb als bei der Glattrrohrsonde hin. Die Betrachtung der mittleren Leistungszahl der gesamten Anlage ist nur bedingt aussagekräftig, da es durch relativ hohe Entfernung zwischen Wärmepumpen und Gebäude sowie durch die zusätzlich notwendige Beheizung der Container zu zusätzlichen Verlusten kommt, welche auf die umgebaute Versuchsanlage zurückzuführen sind. Für eine Realanlage würde dies passender gelöst werden.

Das Marktumfeld für CO₂ - Phasenwechselsonden besteht aus Standardsonden, welche in der Regel mit einer Tiefe von 100 – 150 m errichtet werden. Diese Sonden bestehen aus einfachen (U-Sonden) oder doppelten (Duplex-Sonden) aus HDPE Rohren, welche von einer Spindel aus endlos in die abgeteufte Bohrung hinabgelassen und dann mit thermisch aktivierten (Grafit) Ton-Zement Suspensionen gegen den umgebenden Boden abgedichtet werden. Diese Standardsonden werden anschließend in der Regel mit einem Wasser-Glykol-Gemisch gefüllt, um ein Gefrieren in extremen Betriebszuständen zu verhindern. Infolge der Dichte der Sole in den Sonden von rund 1,15 g/cm³, ist der Stromverbrauch gegenüber mit reinem Wasser betriebenen Standardsonden um circa 15% erhöht. Allerdings werden für Anlagen, welche mit reinem Wasser betrieben werden deutlich mehr Sonden benötigt. Überschlägig beträgt die Entzugsleistung in Abhängigkeit von den anstehenden Böden und deren Wärmeleitfähigkeiten circa 30 – 35 W/m. Für eine 100 m tiefe Standardsonde ergibt sich somit eine Wärmeentzugsleistung von 3,0 – 3,5 kW. Die Wärmeentzugsleistung der Forschungssonden liegt jeweils bei 30 kW. Somit sind im direkten Vergleich zur Bereitstellung dieser 30 kW Entzugsleistung 9 - 10 Standardsonden in einem Mindestabstand von 6,0 m zueinander zu errichten. Aktuell kostet eine Standardsonde zwischen 10.000 € – 14.000 €. Addiert werden müssen zu diesen Kosten noch die Tief- und Rohrleitungsbauarbeiten für den horizontalen Anschluss der Sonden an einen Vorlaufverteiler / Rücklaufsammler, welcher in der Regel in einem Schachtbauwerk vor dem Heizungsraum installiert wird. Erfahrungsgemäß betragen die Kosten für die Horizontalanbindung einschließlich Sammelschacht, Verteiler und Befüllung mit Sole rund 40% der Kosten für die Herstellung der Standardsonden.

Tabelle 2-3: Kostenvergleich Phasenwechselsonde/Standardsonde für 30 kW Wärmeentzugsleistung
Standardsonden (Mittelwerte)

| | |
|--|----------------------------|
| 9,5 · 12.000 € | 114.000 € |
| 40 % Horizontalanbindung | 45.600 € |
| Summe Standardsonden: | <u>159.600 €</u> |
| <u>CO₂ - Phasenwechselsonde</u> | |
| Komplett | <u>160.000 – 180.000 €</u> |

Außerdem muss dem Flächenverbrauch beziehungsweise vorhandenem Flächenangebot, insbesondere innerhalb urbaner Räume mit engständigen Bestandsgebäuden, besondere Beachtung zu Teil werden. Sondenfelder aus mehreren Standardsonden sind filigrane Objekte, welche nur sehr bedingt überbaut werden können. Oftmals behindern vorhandene Infrastruktur in den urbanen Räumen wie Kanäle, Leitungen, Kabel etc. die Planungen und treiben die Kosten in die Höhe. CO₂ - Phasenwechsellsonden werden mit handelsüblichen vollhydraulischen, fahrbaren Drehbohranlagen mit einem Gesamtgewicht von ca. 50-65 to hergestellt. Die Maschinen erfüllen alle Anforderungen für den Betrieb in innerstädtischen Bereichen und können im Grunde auf jedem Garagenhof oder Parkplatz aufgestellt werden. Bei annähernd gleichen Herstellungskosten kann für jeweils 10 Standardsonden a 100 m Tiefe eine CO₂-Phasenwechsellsonde errichtet werden.

CO₂ - Phasenwechsellsonden sind hinsichtlich ihrer Tiefe skalierbar, das heißt die mögliche Wärmeentzugsleistung steigt mit zunehmender Tiefe an. Wir gehen davon aus, dass aus einer 800 m Phasenwechsellsonde mindestens 60 kW und aus einer 1200 m Phasenwechsellsonde mindestens 90 kW skalierbar sind. Mit diesen Optionen ergeben sich weitere Einsatzfelder, wie zum Beispiel die Nachnutzung von stillgelegten Erdgas- und Erdölbohrungen, sowie Rückfallvarianten für nicht fündige hydrothermale Bohrungen (z.Bsp. Hamburg Wilhelmsburg).

2.6 Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden zu folgenden Veranstaltungen öffentlich präsentiert:

- Postervortrag beim Tag der Energieforschung 2023 Life2050 an der Leibniz Universität Hannover, 09.05.2023
- Fachvortrag beim 8. GWE Technik-Forum „Brunnenbau und Geothermie“ in Peine, 25.01.2024
- Posterpräsentation und Veröffentlichung im Rahmen der Eurotherm 2024 (06.2024): *Investigation of the Operating Characteristic of a Demand-Controlled 368 m Deep CO₂ Thermosyphon Geothermal Borehole Heat Exchanger for Building Heating*

Journal of Physics Conference Series 2766(1):012106, DOI: 10.1088/1742-6596/2766/1/012106

Die gesamten Projektergebnisse sollen weiterhin zeitnah in einem zusammenfassenden Artikel in einer entsprechenden Fachzeitschrift veröffentlicht werden.

3 Fazit

Das in diesem Abschlussbericht beschriebene Vorhaben „Praxistauglichkeit mitteltiefer Erdwärmethermosyphons zur Gebäudeenergieversorgung“ hatte die Zielsetzung in einem dreijährigen Zeitraum die praxisbezogene Nutzung von CO₂-Erdwärmesonden zur Gebäudewärmeversorgung zu untersuchen. Damit sollte für die zukünftige realtechnische Nutzung solcher Sonden ein Funktionsnachweis erbracht werden. Das Projekt wurde als Kooperationsprojekt zwischen dem Institut für Thermodynamik der Leibniz Universität Hannover und der Wöltjen GmbH Umwelttechnik & Brunnenbau, welches die zukünftige Verwirtschaftlichung dieser Technik anstrebt, durchgeführt. Der Vorteil von Sonden dieser Bauart liegt darin, dass sie durch ihre vertikale Bauweise auf wenigen Quadratmetern Grundfläche eine hohe thermische Entzugsleistung bereitstellen können und diese Entzugsleistung weitgehend mit der Tiefe skaliert. Daraus bietet sich deren Einsatz in dicht besiedelten urbanen Gebieten an. Weiterhin arbeiten diese Sonden im Naturumlaufprinzip, wobei mittels verdampfendem und kondensierendem CO₂ Erdwärme an die Oberfläche transportiert wird, sodass zusätzliche Pumpenarbeit zur Umwälzung der Sole entfällt.

Die betrachteten Erdwärmesonden und zugehörigen Wärmepumpen sind auf dem Betriebsgelände der Wöltjen GmbH verortet und stammen aus einem Vorgängerprojekt, welches den grundsätzlichen Funktionsnachweis der Sonden erbrachte (BMWI-Projekt, Förderkennzeichen 03ET-1050B). Bei den Sonden handelt es sich um eine 368 m tiefe Glattrohrsonde und eine 388 m tiefe Wellrohrsonde. Die Temperatur des Erdreichs um die Sonden sind mittels Faseroptischer-Temperaturmessung ortsausgelöst erfasst werden. Vor Beginn der ersten Heizperiode 2021/2022 wurde die Sonden mit Wärmepumpe über eine Fernwärmeleitung und einen 1000 l Pufferspeicher an das Heizungssystem des 1600 m² großen Bürogebäudes (mit zwei Einliegerwohnungen) der Wöltjen GmbH angeschlossen. Wärmepumpen und Gebäude sind mit entsprechender Messtechnik versehen worden, um die Effizienz und das Betriebsverhalten der Wärmepumpen-Sonden-Kombination sowie der gesamten Anlage bewerten zu können. Die Sonden wurden dabei jeweils einzeln betrieben.

Um die genannte Zielsetzung des Projekts zu erreichen mussten im Rahmen der drei betrachteten Heizperioden, 2021/2022, 2022/2023 und 2023/2024, verschiedene Punkte bezüglich des Betriebsverhaltens der Anlage analysiert werden. Besonderes Augenmerk lag in der Sicherstellung der Zuverlässigkeit des Systems, um jederzeit eine ausreichende Wärmebereitstellung zu garantieren. Dazu muss neben dem möglichen Ausfall der Heizungsanlage auch das Auskühlverhalten des Erdreichs betrachtet werden. Weiterhin ist von Interesse zu klären, inwieweit die Sonden-Wärmepumpen-Kombination verbrauchsgesteuert betrieben werden kann, also lediglich über den Wärmebedarf des Gebäudes gesteuert, da sich die Dynamik einer Phasenwechselsonde von der einer konventionellen Solesonde unterscheidet. Letztlich sollte natürlich die Effizienz der Wärmepumpen bei Betrieb mit Sonden dieses Typs als Wärmequelle untersucht werden.

Im Rahmen des dreijährigen Betriebs konnte die zuverlässige Wärmebereitstellung mit großer Versorgungssicherheit nachgewiesen werden. Sowohl die Glatt- als auch die Wellrohrsonde lieferten eine konstante Wärmequelle für die angeschlossene Wärmepumpe und sorgten somit für eine zuverlässige Beheizung der Gebäude. Während des gesamten Zeitraums wurden die Sonden allein über den Wärmebedarf des Gebäudes mittels der Temperatur im Pufferspeicher geregelt. Es kam zu keinem Zeitpunkt zu einem Ausfall der Heizungsanlage und auch nicht zu einer 100%igen Auslastung einer der Sonden. Ebenfalls wurde kein unzulässiges Auskühlen des Erdreichs beobachtet, vielmehr kam es schon innerhalb der jeweils betrachteten Heizperiode zu einer Regeneration, also zu einem Wiederanstieg der Erdreichtemperatur, vor Ende der Heizperiode. Die in den Heizperioden untersuchte Glatt- und Wellrohrsonde sind zur Beheizung von Bestandsgebäuden geeignet, wobei hohe Vorlauftemperaturen von 40°C bis 55°C für das Heizungssystem im Gebäude kein Problem darstellen. Die Wärmepumpe mit Glattrohrsonde wies dabei mittlere Leistungszahlen von 2,95 und 2,85 in den ersten beiden Heizperioden aus, die Wellrohrsonde eine mittlere Leistungszahl von 3 im betrachteten Zeitraum von Februar bis April 2024. Für Neubauten oder Bestandsgebäude mit effizienteren Heizkörpern oder mit einer Fußbodenheizung kann voraussichtlich durch Absenkung der Vorlauftemperatur eine bessere Leistungszahl erwartet werden.

Es ließ sich eine leicht erhöhte Leistungszahl der Wellrohrsonde im Vergleich zur Glattrohrsonde erkennen. Dieses Verhalten soll in einer weiteren, vollständigen Heizperiode im laufenden Jahr nochmals genauer (außerhalb des Projekts) untersucht werden.

Nach dem Test der Glattrohrsonde über zwei Heizsaisons zeigt sich, dass die hier verbaute Sonde zur Gebäudebeheizung geeignet ist und eingesetzt werden kann. Das Einbringen einer 400 m tiefen Glattrohrsonde ist Stand der Technik. Es wird allerdings die Vermutung aufgestellt, dass eine Isolierung des oberen Bereiches der Sonde eine Leistungssteigerung bewirken könnte. Da durch den Temperaturunterschied zwischen kühlerem Erdreich und aufströmendem Gas bereits ein ungewollter Wärmeentzug stattfindet und ein Teil des Dampfes kondensiert kann weniger Wärme an die Wärmepumpe abgegeben werden, so dass die thermische Leistung der Sonde sinkt. Je nach finanziellem Aufwand dieser Maßnahme kann sich die Wirtschaftlichkeit der Glattrohrsonde somit nochmals steigern. Auch müssten gut handhabbare Auslegungsunterlagen für zukünftige, der jeweiligen Aufgabenstellung angepasste Glattrohr-Erdwärmesonden in etwas verallgemeinerter Form erarbeitet werden.

Die Wellrohrsonde bedarf weiterer Untersuchungen. So hat sich beim Einbau gezeigt, dass die Druckfestigkeit des verwendeten Edelstahlrohres für den Einbau problematisch ist, weshalb kein thermisch aktivierter Beton wie bei der glatten Sonde verwendet werden konnte. Ein Lösungsansatz würde hier die Innenstrukturierung eines klassischen Glattrohres bieten, etwa durch das Einbringen spiralförmiger Rillen. Dies würde sowohl den Einsatz thermisch aktivierten Betons ermöglichen wie auch eine bessere Anpassung der Rohrringeometrie auf die Sondenanwendung. Die Ausarbeitung

solcher optimierten Strukturen findet im Labormaßstab derzeit im Rahmen des DFG-Projekts *Strömungsformen und Wärmeübergang in einer senkrechten Zweiphasen-Erdwärme-Wellrohrsonde* statt, sie könnten anschließend unter Beteiligung eines geeigneten Rohrherstellers in Realanwendungen zum Einsatz kommen.

Literaturverzeichnis

- [Ana24] ANAND, R.S., et al.: Super-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation – A comprehensive review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 193 (2024) 114286
- [Bae16] BAEHR, H.D., KABELAC, S.: Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendung, (2016) Springer Verlag
- [Ber14] Bernhard F.: Handbuch der Technischen Temperaturmessung, Springer Publishing, 2014
- [Duc24] DUCHAN, L.: Messtechnische Überwachung und Analyse einer gewellten CO₂-Phasenwechsellsonde zur Gebäudebeheizung mittels Wärmepumpe, Bachelorarbeit am Institut für Thermodynamik der Leibniz Universität Hannover, Hannover 2024
- [Ebe17a] EBELING, J.-C.; KABELAC, S.; LUCKMANN, S.; KRUSE, H.: Simulation and experimental validation of a 400 m vertical CO₂ heat pipe for geothermal application. In: Heat and Mass Transfer 53 (2017), Nr. 11, S. 3257–3265
- [Ebe17b] EBELING, J.-C.; LUO, X.; KABELAC, S.; LUCKMANN, S.; KRUSE, H.: Dynamic simulation and experimental validation of a two-phase closed thermosyphon for geothermal application. In: Propulsion and Power Research 6 (2017), Nr. 2, S. 107–116
- [Goo20] GOOGLE LLC: Google Maps (Ausschnitt), 12.2020
- [Nag23] NAGELER, M.: Messtechnische Überwachung, Analyse und Optimierung einer Wärmepumpe mit CO₂-Phasenwechsellsonde zur Gebäudebeheizung mittels Geothermie, Bachelorarbeit am Institut für Thermodynamik der Leibniz Universität Hannover, Hannover 2023
- [Schm20] SCHMIDT et. al.: Erstellung der Anwendungsbilanzen 2019 für den Sektor der Privaten Haushalte und den Verkehrssektor in Deutschland, RWI Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Essen 2020
- [Stor20] STORCH, T.: Grundlegende Untersuchungen zum Wirkprinzip von geothermischen Phasenwechsellsonden. 1. Aufl. Göttingen, Niedersachsen: Sierke Verlag, 2015
- [Roe22] ROEDDECKE, S.: Inbetriebnahme, Analyse und Optimierung einer Wärmepumpe mit CO₂ Phasenwechsellsonde zur Gebäudebeheizung mittels Geothermie, Bachelorarbeit am Institut für Thermodynamik der Leibniz Universität Hannover, Hannover 2022

Anhang

Tabelle 0-1: Auswertung der Wärmepumpe Heizsaison 2022/2023

| Zeitraum | Betriebszeit [hh:mm:ss] | Rel. Betriebszeit | AZ _{WP} | AZ _{WP real} | Mittl. Heizvorgangsdauer [hh:mm:ss] | T _{außen} [°C] | Q _{Heiz} [W] |
|---------------------------|----------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|---|----------------------------|--------------------------|
| 01.10.2022- 06.10.2022 | 30:14:35 | 18,00% | 4,11 | 2,70 | 00:27:40 | 10,84 | 26687,74 |
| 07.10.2022- 13.10.2022 | 23:55:25 | 14,24% | 3,86 | 2,35 | 00:21:40 | 10,12 | 25240,58 |
| 14.10.2022- 20.10.2022 | 14:44:23 | 10,24% | 4,18 | 2,37 | 00:21:52 | 12,82 | 24747,78 |
| 21.10.2022- 27.10.2022 | 21:47:18 | 12,97% | 4,24 | 2,82 | 00:26:33 | 13,21 | 26083,11 |
| 28.10.2022- 01.11.2022 | 9:21:27 | 9,65% | 4,60 | 2,90 | 00:29:47 | 14,94 | 27052,95 |
| 01.11.2022- 07.11.2022 | 30:14:35 | 18,00% | 4,11 | 2,75 | 00:27:40 | 10,84 | 26687,74 |
| 08.11.2022- 14.11.2022 | | | | | | | |
| 15.11.2022- 21.11.2022 | 74:37:05 | 46,67% | 2,90 | 1,98 | 00:35:41 | 2,846 | 21834,473 |
| 22.11.2022- 28.11.2022 | 67:26:53 | 40,97% | 3,35 | 2,35 | 00:34:54 | 5,48 | 24022,32 |
| 29.11.2022- 30.11.2022 | 19:02:42 | 39,67% | 3,22 | 2,20 | 00:45:50 | 4,84 | 24124,40 |
| 01.12.2022- 08.12.2022 | 114:07:55 | 59,44% | 2,55 | 1,80 | 00:34:01 | 1,86 | 21488,72 |
| 09.12.2022- 15.12.2022 | 103:04:22 | 73,73% | 2,33 | 1,64 | 00:47:48 | -3,72 | 19975,34 |
| 16.12.2022- 22.12.2022 | 107:45:37 | 64,14% | 2,53 | 1,74 | 00:42:47 | 0,96 | 20456,99 |
| 23.12.2022- 09.01.2023 | 165:46:53 | 38,38% | 3,37 | 2,52 | 00:30:52 | 8,09 | 23359,61 |
| 10.01.2023- 16.01.2023 | 73:17:55 | 43,64% | 3,09 | 2,41 | 00:39:19 | 6,96 | 22982,62 |
| 17.01.2023- 23.01.2023 | 114:32:55 | 68,18% | 2,35 | 1,78 | 00:30:35 | 0,88 | 19633,56 |
| 24.01.2023- 31.01.2023 | 134:31:52 | 70,10% | 2,31 | 1,80 | 00:30:34 | 1,57 | 19350,57 |
| 01.02.2023- 09.02.2023 | 133:49:10 | 61,96% | 2,55 | 1,89 | 00:35:57 | 3,14 | 20229,74 |
| 10.02.2023- 16.02.2023 | 85:55:13 | 54,70% | 2,69 | 2,09 | 00:37:32 | 4,94 | 20931,06 |

Tabelle 0-2: Auswertung der Zähler Heizsaison 2022/2023

| Zeitraum | Wärmemenge Heizwasser [kWh] / Tagesverbrauch [kWh/d] | | Wärmemenge Brauchwasser [kWh] / Tagesverbrauch [kWh/d] | | el. Energie Nachheizung [kWh] /Tagesverbrauch [kWh/d] | | el. Energie Wärmepumpe [kWh] / Tagesverbrauch [kWh/d] | | AZ ^{WP} _{real} | AZ ^{GES} _{real} |
|---------------------------|---|--------|---|-------|--|-------|---|--------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | | | | | |
| 30.09.2022- 06.10.2022 | 400 | 66,67 | 37 | 6,17 | 88 | 14,67 | 148 | 24,67 | 2,70 | 1,85 |
| 07.10.2022- 13.10.2022 | 440 | 62,86 | 55 | 7,86 | 90 | 12,86 | 187 | 26,71 | 2,35 | 1,79 |
| 14.10.2022- 20.10.2022 | 320 | 45,71 | 38 | 5,43 | 92 | 13,14 | 135 | 19,29 | 2,37 | 1,58 |
| 21.10.2022- 27.10.2022 | 460 | 65,71 | 40 | 5,71 | 88 | 12,57 | 163 | 23,29 | 2,82 | 1,99 |
| 28.10.2022- 01.11.2022 | 200 | 50 | 24 | 6 | 55 | 13,75 | 69 | 17,25 | 2,90 | 1,81 |
| 01.11.2022- 07.11.2022 | 650 | 92,86 | 58 | 8,29 | 94 | 13,43 | 236 | 33,71 | 2,75 | 2,15 |
| 08.11.2022- 14.11.2022 | 940 | 134,29 | 63 | 9 | 80 | 11,43 | 412 | 58,86 | 2,28 | 2,04 |
| 15.11.2022- 21.11.2022 | 1440 | 205,71 | 61 | 8,71 | 60 | 8,57 | 726 | 103,71 | 1,98 | 1,91 |
| 22.11.2022- 28.11.2022 | 1360 | 194,29 | 77 | 11 | 67 | 9,57 | 579 | 82,71 | 2,35 | 2,22 |
| 29.11.2022- 30.11.2022 | 710 | 355 | 26 | 13 | 26 | 13 | 323 | 161,50 | 2,20 | 1,87 |
| 01.12.2022- 08.12.2022 | 1020 | 204 | 36 | 7,20 | 42 | 8,40 | 566 | 113,20 | 1,80 | 1,79 |
| 09.12.2022- 15.12.2022 | 1160 | 290 | 46 | 11,50 | 26 | 6,50 | 708 | 177 | 1,64 | 1,62 |
| 16.12.2022- 22.12.2022 | 1290 | 322,50 | 10 | 2,50 | 28 | 7 | 742 | 185,50 | 1,74 | 1,86 |
| 23.12.2022- 09.01.2023 | 3390 | 188,33 | 64 | 3,56 | 98 | 5,44 | 1343 | 74,61 | 2,52 | 2,40 |
| 10.01.2023- 16.01.2023 | 1450 | 207,14 | 42 | 6 | 40 | 5,71 | 601 | 85,86 | 2,41 | 2,33 |
| 17.01.2023- 23.01.2023 | 2050 | 292,86 | 52 | 7,43 | 41 | 5,86 | 1153 | 164,71 | 1,78 | 1,76 |
| 24.01.2023- 31.01.2023 | 2070 | 295,71 | 44 | 6,29 | 40 | 5,71 | 1149 | 164,14 | 1,80 | 1,78 |
| 01.02.2023- 09.02.2023 | 2670 | 267 | 57 | 5,70 | 57 | 5,70 | 1414 | 141,40 | 1,89 | 1,85 |
| 10.02.2023- 16.02.2023 | 1660 | 237,14 | 58 | 8,29 | 40 | 5,71 | 794 | 113,43 | 2,09 | 2,06 |

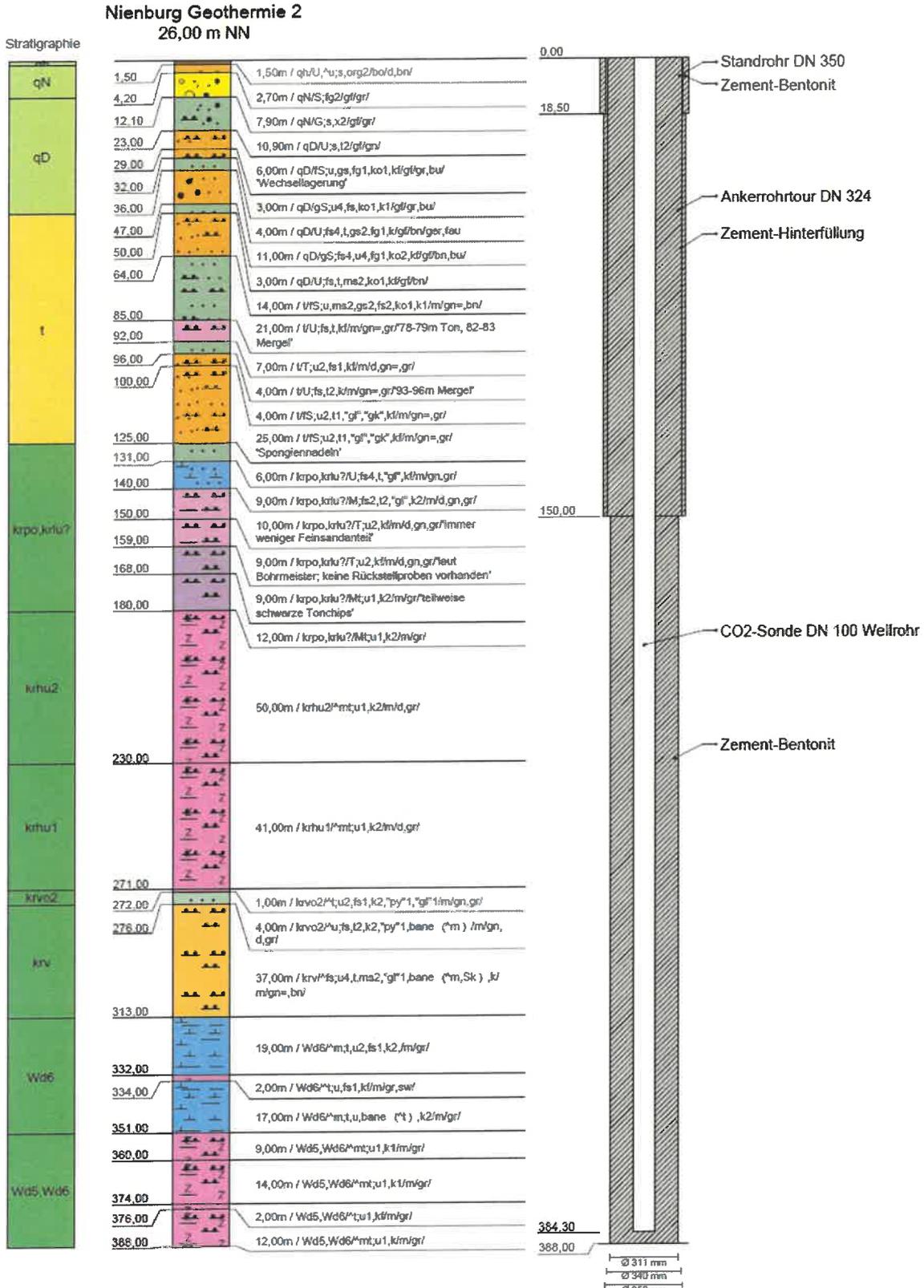


Abbildung 0-1: Bodenbeschaffenheit (links) und Bohrlochinformation (rechts) der Wellrohrsonde am Standort Nienburg

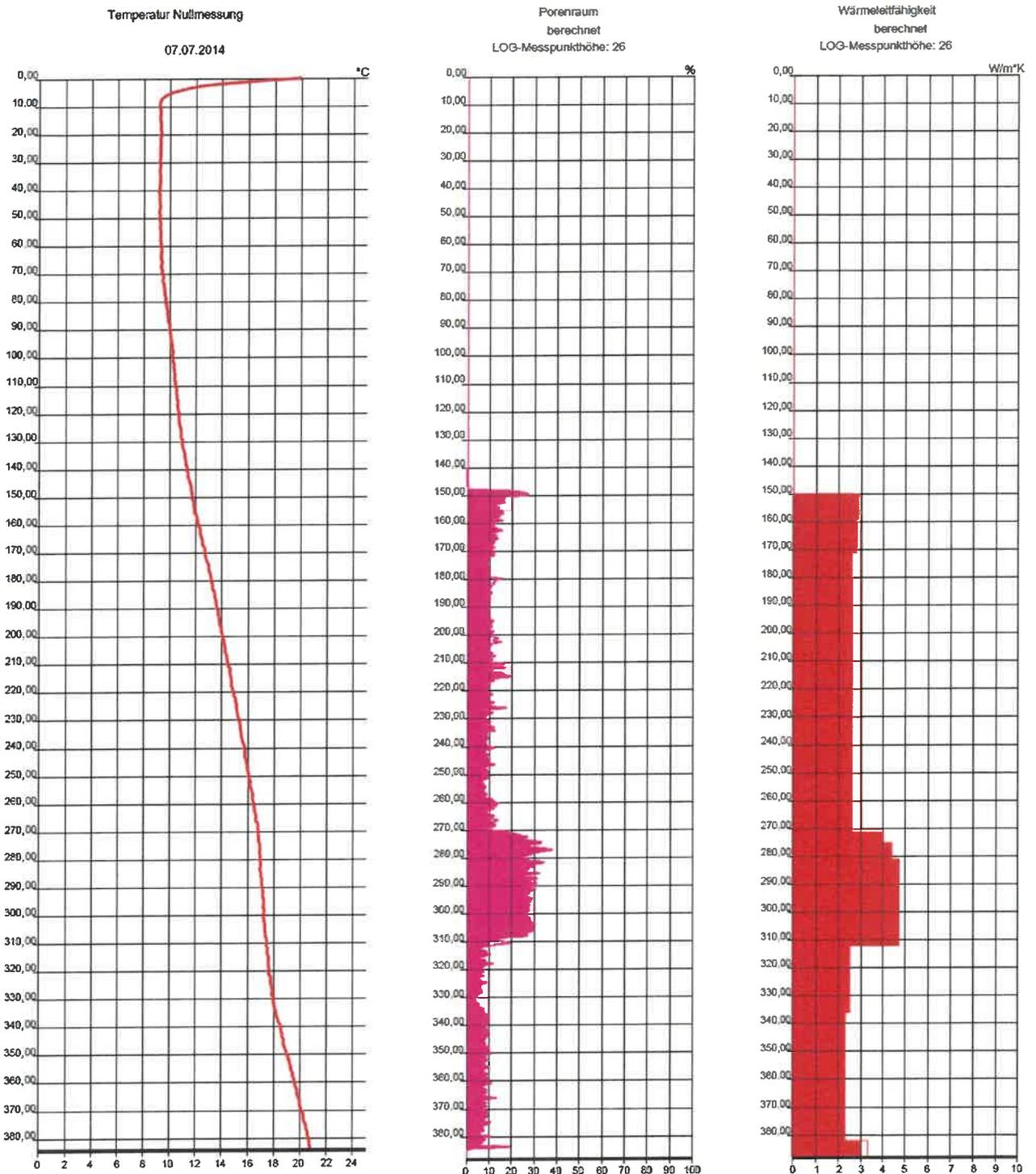


Abbildung 0-2: Temperatur (links), Porenraum (mitte) und Wärmeleitfähigkeit (rechts) der Wellrohrsonde am in Abhängigkeit der Tiefe am Standort Nienburg