



Abschlussbericht 15. November 2010

Tiefen-EWS Oftringen (706 m):

Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PE- Tiefen-Erdwärmesonde

*– Bestimmung und Interpretation der
thermodynamischen Eigenschaften bei
variierenden Durchflussraten und
Entzugsleistungen*

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

EBERHARD & Partner AG
General Guisan-Strasse 2
5000 Aarau
www.eberhard-partner.ch

Autor(en):

Dr. Oliver Sachs, sachs@eberhard-partner.ch
Dr. Mark Eberhard, eberhard@eberhard-partner.ch

BFE-Bereichsleiter: Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter: Rudolf Minder

BFE-Vertrags- und Projektnummer (alt): 154'408 bzw. 103'342

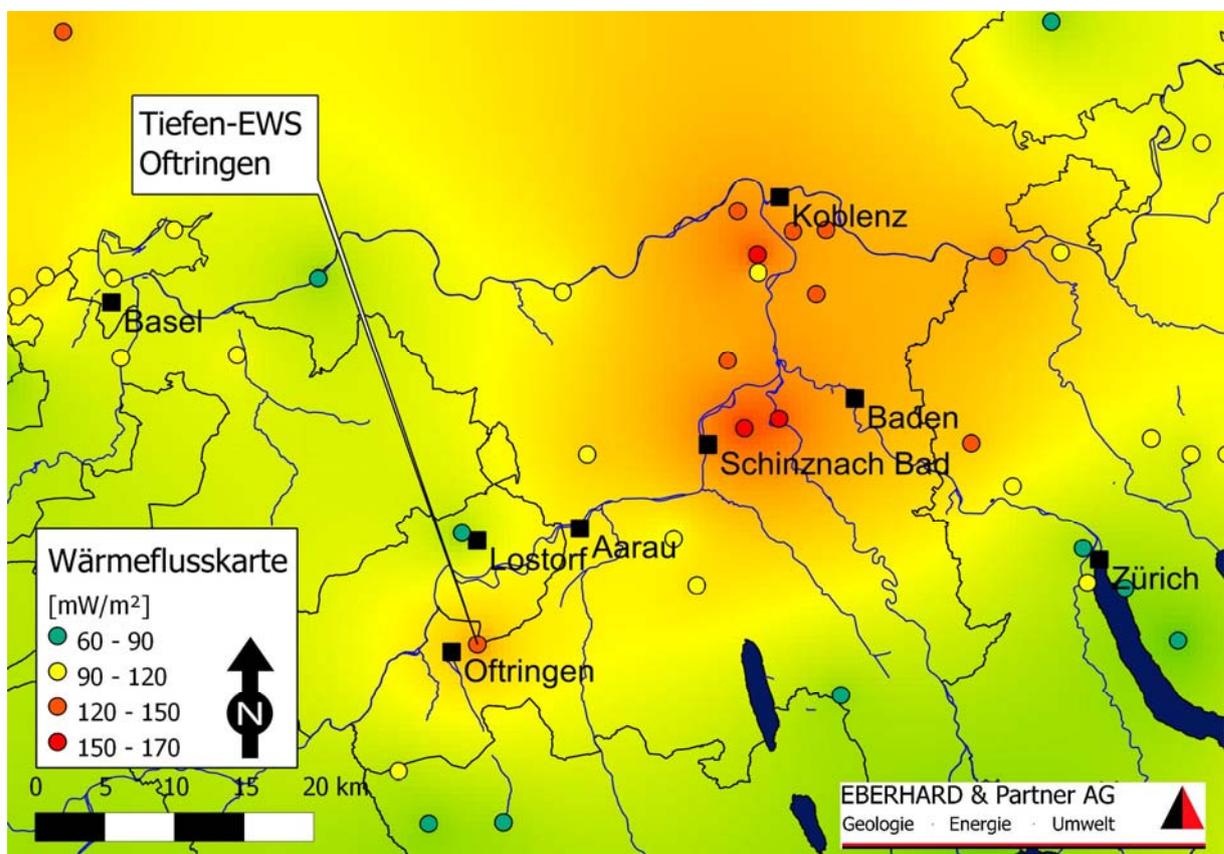
BFE-Vertrags- und Projektnummer (mit PSP-Element): SI/500248 bzw. SI/500'248-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Tiefen-EWS Oftringen (706 m):

Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PE-Tiefen-Erdwärmesonde

– Bestimmung und Interpretation der thermodynamischen Eigenschaften bei variierenden Durchflussraten und Entzugsleistungen



INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	2
1. EINLEITUNG	3
2. AUSGANGSLAGE	6
2.1. AUFTRAG	7
2.2. ZIEL DER ARBEIT	7
2.3. VORARBEITEN – INSTALLATION UND MODELLIERUNG DER ERDWÄRMESONDE	7
3. ANSCHLUSS AN VORGÄNGIGE MESSERGEBNISSE	9
4. FUNKTIONSPRINZIP DER FORSCHUNGSANLAGE	10
5. INSTALLATION DER PILOTANLAGE	11
6. GEMESSENE PARAMETER	12
7. INBETRIEBNAHME	13
7.1. KALKPLÄTTCHEN IM WÄRMETRÄGERMEDIUM	15
7.2. SPORADISCHER AUSFALL EINES TEMPERATURFÜHLERS	15
8. MESSPROGRAMM	16
9. MESSDATEN	18
9.1. 1.5 m ³ /h DURCHFLUSSMENGE	19
9.2. 2.5 m ³ /h DURCHFLUSSMENGE	21
9.3. 3.5 m ³ /h DURCHFLUSSMENGE	24
10. MESSERGEBNISSE / INTERPRETATION	28
10.1. DURCHFLUSSMENGE 1.5 m ³ /h	28
10.2. DURCHFLUSSMENGE 2.5 m ³ /h	29
10.3. DURCHFLUSSMENGE 3.5 m ³ /h	31
11. ENERGIEBILANZEN	33
11.1. GRUNDLAGEN	33
11.2. VERLUSTE UND FEHLER	34
11.3. WÄRMEUMVERTEILUNG DURCH ZIRKULATION (OHNE ENTZUGSLEISTUNG)	35
11.4. UNTERSCHIEDLICHE DRUCHFLÜSSE UND ENTZUGSLEISTUNGEN	36
11.5. TEMPERATURENTWICKLUNG NACH DER HEIZPHASE 2009/2010	37
12. FAZIT	39
GRUNDLAGEN / LITERATUR	41
ANHANG	42
BEILAGEN	43

ZUSAMMENFASSUNG

Gut zwei Jahre nach der Installation einer 706 m tiefen konventionellen Doppel-U-Sonde bei Oftringen wurde die Erdwärmesonde (EWS) zur Pilotanlage „Tiefen-EWS Oftringen“ ausgebaut. Ziel war es, *in situ*-Temperaturdaten vom Vor- und Rücklauf in 0, 50, 225, 500 und 700 m bei unterschiedlichen Entzugsleistungen und Durchflussraten zu erhalten. Die vorliegende Projektstudie befasst sich mit der Möglichkeit der Nutzung einer Tiefen-EWS als Wärmequelle für eine Direktheizung – also ohne den Einsatz einer Wärmepumpe.

Zu diesem Zweck wurde eine Heizungsanlage konzipiert, welche eine kontrollierte Entnahme einer bestimmten Wärmemenge bei gleichbleibendem Durchfluss erlaubt. Die Wärme wurde über einen Lüfterhitzer an die Aussenluft abgegeben, wodurch der Leistungsentzug stark von der Aussentemperatur abhängig war. Dadurch war es notwendig, die Wärmeabgabe kontinuierlich zu überwachen und über eine speicherprogrammierbare Steuerung laufend nachzuführen. Das abgekühlte Arbeitsmedium wurde über ein 3-Wege-Mischventil in den Sondenkreislauf zurück gegeben. Damit der Lüfterhitzer- sowie der Sondenkreislauf den gleichen hydraulischen Widerstand haben wurden beide Kreisläufe noch vor Inbetriebnahme mittels Drosselventile eingestellt.

Das Messprogramm beinhaltete drei verschiedene Durchflussraten (1.5, 2.5 und 3.5 m³/h) mit einem dauerhaften Leistungsentzug von 0, 5, 10, 15, 20 und 30 kW. Die jeweilige Einstellung wurde bis zum Erreichen eines thermischen Gleichgewichtszustandes beibehalten. Ein Gleichgewichtszustand wurde nicht immer erreicht. Die energetische Auswertung hat einerseits die thermischen Verlustzonen der Tiefen-EWS Oftringen beleuchtet, andererseits zeigte sich, dass niedrige Entzugsleistungen von 5 oder 10 kW mit sehr ungünstigen Arbeitszahlen (COP) von 7.8 bis 17.0 verbunden sind. Lohnender sind Entzugsraten von 15 bzw. 20 kW. Hier werden COP-Werte von 23.2 bis 31.1 erreicht, allerdings fallen die Sondenaustrittstemperaturen auf etwa 20 °C ab.

Die Daten der vorliegenden Studie belegen, dass mit den entsprechenden Durchflussmengen und Entzugsleistungen eine Direktheizung mit einer rund 700 m langen Tiefensonde in ausgewählten Zonen der Schweiz durchaus Sinn macht. Hierfür wäre es im Sinne einer Effizienzsteigerung ideal, bei der Realisierung einer Tiefen-EWS weitere bauliche Verbesserungen vorzunehmen (Isolation der Sonde vom Sondenaustritt bis zum Haus und Isolation des Sondenvorlaufs bis in tiefere Bereiche allenfalls kombiniert mit einer zusätzlichen Vertiefung der Sonde).

Unter den Voraussetzungen, wie sie in der Tiefensonde in Oftringen vorliegen, können zurzeit Austrittstemperaturen von über 20 °C erreicht werden. Diese Vorlauftemperaturen ermöglichen eine Direktheizung von Gewächshäusern, Lagerhallen, stark isolierten Häusern oder Gebäuden deren Fremdwärme durch Büromaschinen wie z. B. Computer, Kopierer etc. relativ hoch ist. Eine andere Betrachtungsweise ist der Einsatz einer Wärmepumpe, welche das Temperaturniveau auf konventionelle Vorlauftemperaturen von 25 bis 30 °C anhebt. Hierdurch kann die Entzugsleistung der Sonde wesentlich erhöht werden und grössere Gebäudekomplexe beheizt werden. Die bei einer Direktversorgung vorliegenden sehr hohen COP-Werte würden dadurch natürlich wieder sinken. Das Einsatzgebiet, der Verwendungszweck der Sonde bzw. das Kosten-Nutzen-Verhältnis muss schlussendlich darüber entscheiden, welchen Weg man mit der geplanten Anlage geht.

1. EINLEITUNG

Das Prinzip der Tiefen-Erdwärmesonde (Tiefen-EWS) wurde Anfang der 1990er Jahre erstmals in der Schweiz erprobt (Tiefen-EWS Weggis und Weissbad, beide Koaxialsonden). Damit handelt es sich um eine „echte“ Schweizer Entwicklung. Zwar hat sich die Technik seit jenen Tagen weiter entwickelt, trotzdem stellt dieser Sondentyp bis heute ein Sonderfall der geothermischen Nutzung dar.

Je nach Bautyp der Sonde zirkuliert in einem geschlossenen Rohrsystem ein Wärmeträgermedium (meist Wasser) welches die Wärme des umgebenden Gebirges aufnimmt und wegführt (Fig. 1). Das erwärmte Fluid wird anschliessend an der Erdoberfläche gekühlt und mittels Sondenkreispumpe zurückgeführt. Effizienzuntersuchungen an bestehenden Koaxialsonden haben gezeigt, dass die mittlere Entzugsleistung aufgrund der grösseren Tiefe höher ist als bei flachen Erdwärmesonden (Kohl et al., 2002; Rognon, 2010).

Im Bereich der oberflächennahen geothermischen Wärmeengewinnung (<400 m) werden fast immer Einfach- oder Doppel-U-Rohre aus Polyethylen (PE) eingesetzt. U-Rohrsonden für Tiefen-EWS (>400 m) wurden bislang nicht eingesetzt. Ein Grund hierfür ist der erhöhte technische Aufwand für den Einbau einer solchen Sonde. Noch stellt das Einbringen einer gleichmässigen Hinterfüllung bis in Tiefen von >350 m eine technische Herausforderung dar. Mit zunehmender Tiefe wird beim „normalen“ Einbringen der Zement hinterfüllung ein so starker hydrostatischer Aussendruck auf das Sondenrohr aufgebaut, dass die Belastungsgrenze (i. e. „Beuldruck“) des PE-Rohrs deutlich überschritten wird. Damit sind besondere Verfahren für die Installation einer U-Rohrsonde notwendig. Weiter wird angenommen, dass koaxiale Sonden gegenüber konventionellen U-Rohrsonden bessere thermische und hydraulische Eigenschaften aufweisen (Kohl et al., 2000; Huber, 2005).

Für Tiefen-EWS vom Bautyp Koaxialsonde liegen von verschiedenen Anlagen Messreihen über einige Jahre vor. Zu einer Tiefen-EWS vom Bautyp U-Rohrsonde gab es bislang keine echten Messwerte. Insbesondere war nicht bekannt, wie sich die Sonde bei definierter Entzugsleistung bzw. unterschiedlichen Durchflüssen wirklich verhält. Das vorliegende Forschungsprojekt behandelt in der ersten Projektphase den direkten Wärmeentzug aus dem Wärmeträgermedium ohne Verwendung einer Wärmepumpe. Modellhaft wurde diese Art der Wärmenutzung einer tiefen Doppel-U-Sonde in verschiedenen Arbeiten behandelt (Huber 2005, Wagner et al., 2008). Die Studien kommen zum Schluss, dass sich eine tiefe EWS aufgrund des hohen Wärmeverlustes als Energiequelle für eine Direktheizung nicht eignet.

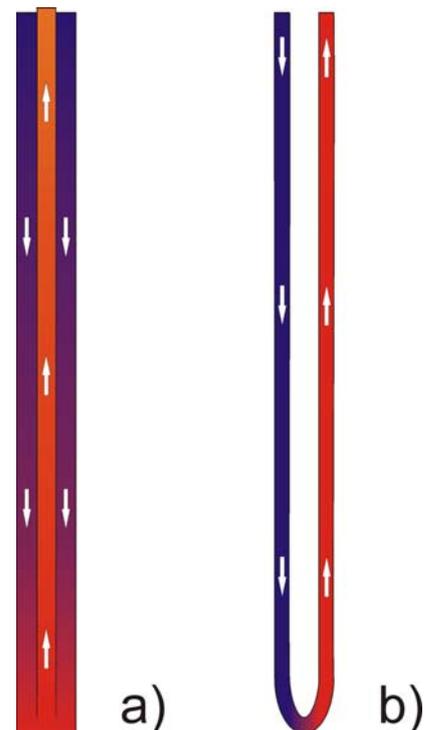


Fig. 1: Schema der zwei häufigsten Bautypen: a) Koaxialsonde, b) U-Rohrsonde

Die ersten beiden Anlagen von Weggis und Weissbad (beide Schweiz, Tab. 1) wurden in trockenen Thermalwasserbohrungen installiert, d. h. die Fehlbohrungen wurden sinnvoll weiter genutzt. Gleiches gilt für die erfolglose, weil trockene, Geothermiebohrung im Triemli-Quartier (Zürich). In das 2708 m tiefe Bohrloch soll eine Erdwärmesonde installiert werden (NZZ, 2010). Ebenso steht ein geothermisches Nutzungskonzept als mögliche Variante für die derzeit durchgeführte Erdöl- / Erdgasexplorationsbohrung im Bereich des Genfersees zur Diskussion (Schwendener, 2010). Bei nicht fruchtigen Öl-, Gas- oder Thermalwasserbohrungen sowie geologischen Erkundungsbohrungen kann das Bohrloch auf diese Weise lange Zeit als Energiequelle weiter genutzt werden. Falls geeignete Wärmeabnehmer vorhanden sind, stellt der Ausbau einer Tiefbohrung zur Tiefen-EWS auch von ökonomischer Seite eine interessante Alternative dar, denn selbst die einfache Wiederverfüllung eines Bohrloches kann mit relativ hohen Kosten verbunden sein.

Tiefen-EWS	Ort	EWS-Installation	Bautyp	EWS-Endtiefe [m]	ungestörte Temperatur am Sondenfuss [°C]
Weissbad	Weissbad (Appenzell, CH)	1993	Koaxialsonde (Stahl)	1'213	45
Weggis	Weggis (Luzern, CH)	1994	Koaxialsonde (Stahl)	2'295	≈72
Prenzlau	Prenzlau (D)	1994	Koaxialsonde (Stahl, isoliertes Innenrohr)	2'786	>108
Oftringen	Oftringen (Aargau, CH)	2007	2-Kreis PE-Erdwärmesonde	706	49
Saratz	Pontresina (Graubünden, CH)	2010 (im Bau)	Koaxialsonde (Stahl)	1'500	≈43
SuperC	Aachen (D)	2010 (im Bau)	Koaxialsonde (Aussenrohr Stahl, Innenrohr Polypropylen)	≈2'000	≈85
Arnsberg	Arnsberg (D)	2010 (im Bau)	Koaxialsonde (Glasfaserrohr)	2'835	90

Tab. 1: Beispiele für realisierte oder derzeit im Bau befindliche Tiefen-EWS (Stand Juni 2010). In der Schweiz werden die Sonden seit Jahrzehnten erfolgreich für die Wärmegewinnung genutzt.

Ein anderes erfolgreiches Beispiel für die nachträgliche Installation eines geschlossenen Wärme-Kreislaufs ist die Tiefen-EWS Prenzlau (Deutschland). Diese Anlage förderte seit 1987 als geothermische Dublette 42 °C warmes Thermalwasser aus etwa 1'000 m Tiefe (Wetzel & Stutzke, 1999). Nachdem eine starke Schädigung des thermalwasserhaltigen Sandsteinspeichers festgestellt wurde, musste der geothermische Betrieb 1989 eingestellt werden. Aufgrund eines 1991 erstellten Wärmenutzungskonzeptes beschloss die Stadtverwaltung von Prenzlau einen Vorgehensplan für die umweltschonende Nutzung des thermisch nutzbaren Tiefenwassers zu erstellen. Hierfür wurde eine der beiden bestehenden Bohrungen weiter vertieft. Schlussendlich entstand eine Tiefbohrung, in welche eine 2'786 m lange Koaxialsonde mit isoliertem Innenrohr installiert werden konnte (Tab. 1). Die umgebende Gebirgstemperatur beträgt am Sondenfuss etwa 108 °C. Die Koaxialsonde liefert seit 1994 Zirkulationswasser mit einer Temperatur von 60 °C. Je nach Fördermenge be-

nötigt das Wasser für einen vollständigen Zyklus zwischen 4 und 10 Stunden. Mit der Inbetriebnahme der Tiefen-EWS sanken die CO₂-Emissionen am Standort Prenzlau um 20 % (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007). Damit kann die Tiefen-EWS auch von ökologischer Seite her als ein Erfolgsmodell angesehen werden.

In neuerer Zeit wurden vereinzelt Wärmegewinnungsanlagen von Anfang an als Tiefen-EWS (z. B. die Tiefen-EWS Saratz in Pontresina; Tab. 1) geplant und realisiert. Drei Faktoren begünstigen die Verwirklichung einer solchen Anlage: höhere Sondenaustrittstemperaturen ergeben bessere Wirkungsgrade gegenüber flacheren Erdwärmesonden, die in den letzten Jahren gesunkenen Kosten für die Erstellung einer Tiefbohrung sowie der deutlich geringere Platzbedarf (eine Tiefen-EWS kann ein ganzes EWS-Feld ersetzen). So standen für die Deckung des Wärmebedarfs des Hotel Saratz zwei Möglichkeiten zur Auswahl: etwa 20 Erdwärmesonden mit einer Länge von je 150 bis 200 m oder eine Tiefen-EWS mit mehr als 1'000 m Länge. Aufgrund des begrenzten Platzangebotes entschied man sich für die tiefere Sondenvariante.

Die Tiefen-EWS SuperC (Tab. 1) soll bis zu 80 % des Wärme- und Kältebedarfs des neuen Studien- und Servicezentrums der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen abdecken. Das neu erstellte Grossgebäude wird über aktivierte Bauteile beheizt, wobei dem Primärkreislauf der Tiefen-EWS die Wärmeenergie über einen Wärmetauscher entzogen und direkt an das Heizungssystem des „SuperC-Gebäudes“ abgegeben wird. Im Sommer wird die Erdwärme mit Hilfe einer Adsorptionskältemaschine für Kühlzwecke genutzt.

Bei geeigneten Rahmenbedingungen scheint eine Tiefen-EWS als Direktheizung eine interessante Alternative zu sein – wenngleich es bislang noch keine Langzeitdaten gibt. Figur 2 zeigt, dass die Durchflussrate ein wesentlicher Faktor bei der Wärmeförderung aus einer Tiefen-EWS ist. Zumindest geht dieser Zusammenhang aus den Modellrechnungen für die Tiefen-EWS von Oftringen hervor (Wagner et al., 2008). Wirkliche *in situ*-Temperaturen bzw. das physikalische Verhalten der Sonde (Wärmeumverteilung und Temperaturen in den unterschiedlichen Tiefenniveaus bei variierenden Entzugsleistungen oder Durchflussraten) können ohne echte Messwerte nicht realitätsnah modelliert werden. Für normale EWS, wie sie in der untiefen Geothermie eingesetzt werden, sind diese Einflussgrößen hinlänglich bekannt. Auf diesen Erfahrungswerten basieren die meisten Modellierungsansätze. Das vorliegende Forschungsprojekt soll Grundlagendaten zu Tiefen-EWS vom Typ „Doppel-U-Sonde“ liefern. In der vorliegenden ersten Phase werden die Leistungsparameter im Falle einer Direktheizung – also ohne den Einsatz einer Wärmepumpe – ermittelt.

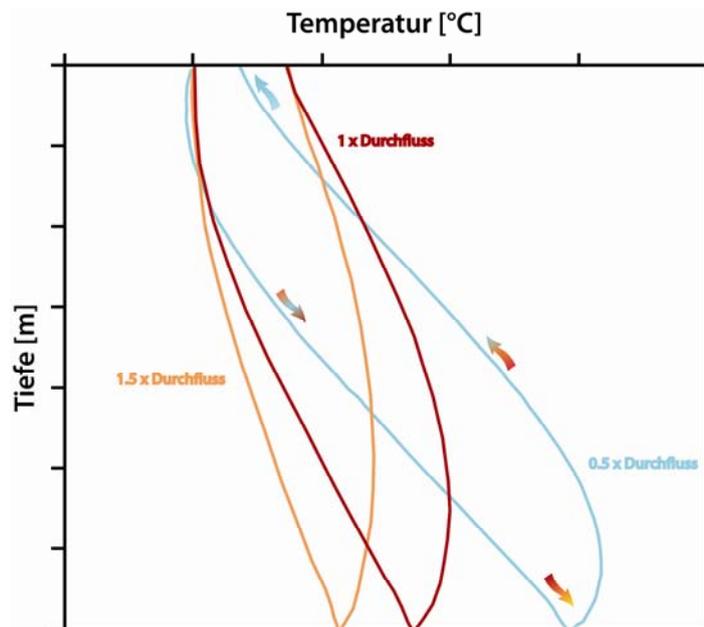


Fig. 2: Allgemeines Schema zur Temperaturentwicklung in einer Erdwärmesonde bei verschiedenen Durchflussraten

2. AUSGANGSLAGE

Im Sommer 2007 wurde das 719 m tiefe Bohrloch für die derzeit weltweit tiefste konventionelle Doppel-U-Sonde auf dem heutigen Betriebsgelände der Axpo AG in Oftringen erstellt (Beilage 1). Ein wesentliches Ziel dieser Arbeiten war die Erweiterung der bislang fehlenden geologisch-geothermischen Datenbasis in einem wenig erforschten Gebiet der Schweiz (Fig. 3). Neben der genauen stratigraphischen Abfolge wurden verschiedene geophysikalische Gesteinsparameter und wichtige Kenngrößen wie Gesteinstemperatur oder Wärmeleitfähigkeit bestimmt (Frieg, 2009). Bis zu diesem Zeitpunkt gab es keine Erfahrungswerte mit einer so tiefen und leistungsfähigen Doppel-U-Sonde. Das Ziel der vorliegenden ersten Projektphase war die Erstellung einer Anlage, mit welcher die Tiefen-EWS als Wärmequelle für eine Direktheizung (ohne Wärmepumpe) ausgetestet werden sollte. Die EBERHARD & Partner AG (Aarau) projektierte und realisierte hierfür im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE, Bern) die Pilotanlage „Tiefen-EWS Oftringen“ und nahm diese am 15. Dezember 2009 in Betrieb (EBERHARD & Partner AG, 2009a).

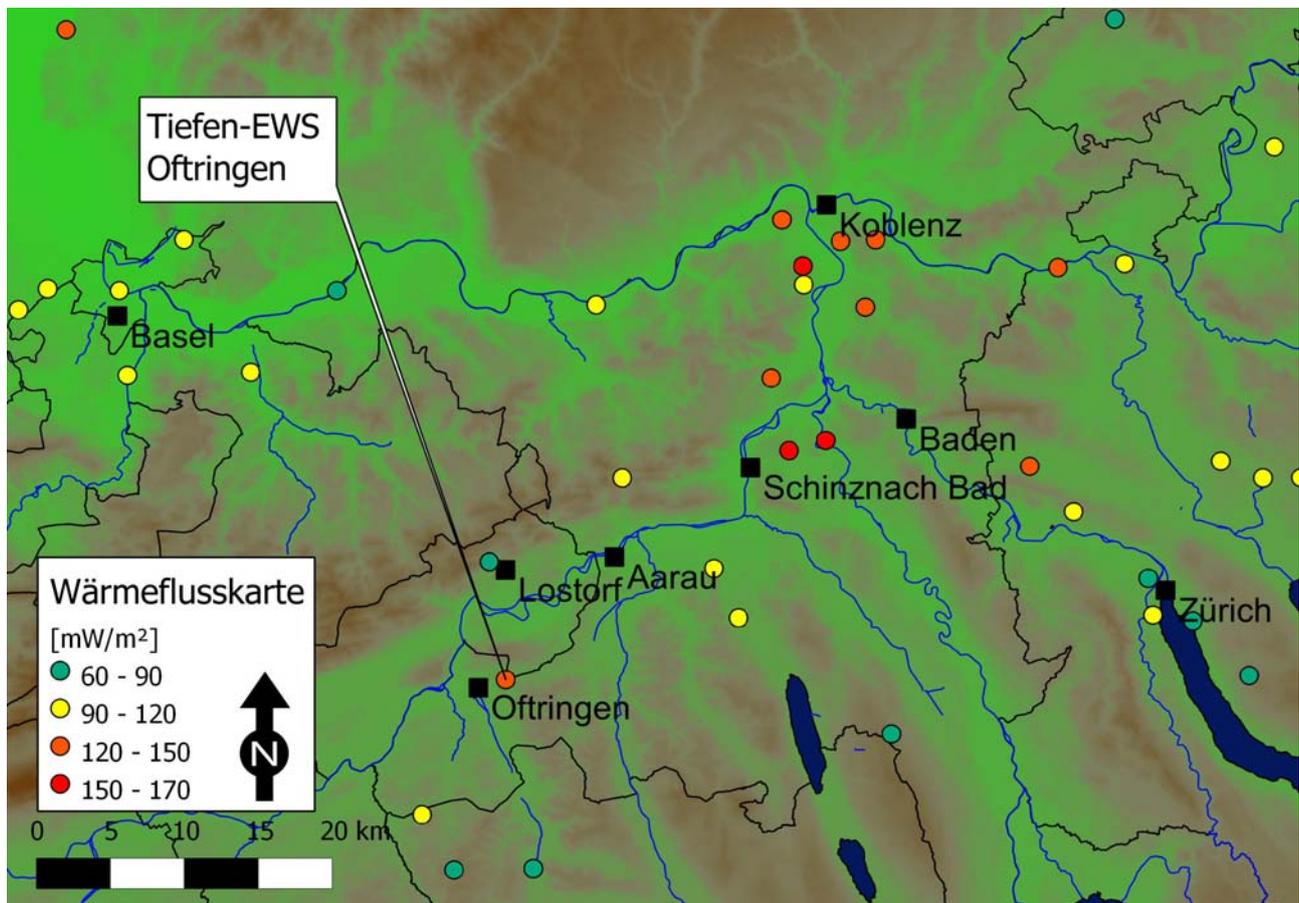


Fig. 3: Lage der „Tiefen-EWS Oftringen“, ENE von Oftringen (AG). Ergänzend werden Bohrpunkte mit bekannten geothermischen Daten abgebildet. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Wärmeflussdichten in mW/m^2 (Medici & Rybach, 1995; Schärli & Rybach, 2002; Wagner et al., 2008).

Nach anfänglichen Problemen mit Kalkplättchen, welche sich von den tieferen Bereichen des Sondenrohrs abgelöst hatten, verschiedene Anlagenteile verstopften und einige Tage später eine Sa-

nierungsmassnahme zur Folge hatten (EBERHARD & Partner AG, 2010), konnte das wissenschaftliche Messprogramm beginnen.

2.1. AUFTRAG

Von der EBERHARD & Partner AG wurde im Oktober 2009 beim Bundesamt für Energie (BFE) ein Gesuch zur finanziellen Unterstützung des Forschungsprojektes zur „Ermittlung und Interpretation der Temperaturen und Wärmeförderung der Tiefen-Erdwärmesonde (Tiefen-EWS) Oftringen bei variierenden Durchflussraten und Entzugsleistungen“ eingereicht (EBERHARD & Partner, 2009a). In dieser ersten Projektphase wurde aus einer Tiefen-EWS Wärmeenergie im Sinne einer Direktheizung gewonnen, wobei bei variierenden Durchflussraten und Entzugsleistungen laufend die *in situ*-Temperaturen verschiedener Tiefenniveaus in der Sonde erfasst werden sollten. Am 2. November 2009 wurde die Realisierung der Pilotanlage vom BFE bewilligt und in Auftrag gegeben (BFE-Projektnummer: 103'342).

2.2. ZIEL DER ARBEIT

Das Forschungsprojekt soll grundlegende physikalische Messdaten einer einzigartigen, 706 m tiefen Doppel-U-Rohrsonde liefern. Bislang gibt es zu diesem Sondentyp keine direkten Messwerte aus verschiedenen Tiefenhorizonten bei variierenden Entzugsleistungen. Die bis jetzt vorliegenden Ergebnisse basieren auf theoretischen Annahmen bzw. Modellen. Das vorliegende Forschungsvorhaben will die Nutzbarkeit der Sonde als Direktheizung (ohne Wärmepumpe) testen. Hierfür sollen die resultierenden Leistungsparameter der Anlage bei verschiedenen Durchflüssen und dauerhafter, definierter Entzugsleistung ohne Wärmepumpe (Direktheizung) gemessen werden.

2.3. VORARBEITEN – INSTALLATION UND MODELLIERUNG DER ERDWÄRMESONDE

Nach Abschluss der Bohrarbeiten und des bohrlochgeophysikalischen Messprogramms wurde im November 2007 mit der Realisierung der weltweit tiefsten 40mm-2-Kreis PE-Erdwärmesonde begonnen. Insgesamt wurden 706 m Sondenrohr eingebaut und hinterfüllt (ThermoCem, HeidelbergCement AG, Deutschland). Nach der Fertigstellung sollten diverse geophysikalische Tests die Leistungsfähigkeit der EWS bestimmen. Die unterschiedlichen Messprogramme belegen hohe Gebirgstemperaturen von etwa 50 °C in 700 m Tiefe, welche zu einem ungewöhnlich hohen Wärmefluss führen (Wagner et al., 2008).

Die aussergewöhnlich hohen Messwerte werden nicht nur von der starken Abweichung vom prognostizierten thermischen Tiefenprofil für Oftringen unterstrichen (Beilage 2), sondern werden zudem bei einem direkten Vergleich von bestehenden Tiefen-EWS in der Schweiz und in Deutschland ersichtlich (Fig. 4). Demnach liegt Oftringen in der direkten Verlängerung zu den Anlagen SuperC und Prenzlau, welche die höchsten Sondenfuss-Temperaturen haben.

Um die thermische Leistungsfähigkeit der Tiefen-EWS Oftringen weiter zu verifizieren wurde ein Thermal Response Test (TRT) durchgeführt. Aufgrund der relativ hohen Sondentemperaturen konnte kein „normaler“ TRT gemacht werden, d. h. es wurde nicht eine definierte Wärmemenge zugeführt, sondern Wärme durch die Einleitung von kaltem Wasser abgeführt. Als kaltes Wasser wurde Leitungswasser aus dem Oftringer Trinkwassernetz genommen. Dies hatte allerdings den Nachteil, dass die Wassertemperatur nicht kontrollierbaren tageszeitlichen Schwankungen unterworfen war. Als nach 4 Tagen der TRT beendet wurde, lag die Eintrittstemperatur bei etwa 7 °C und die Austrittstemperatur bei 17 °C. Die Zirkulationsrate war bei 2.2 m³/h eingestellt, was bei den genannten Werten einer thermischen Heizleistung von 25 kW entspricht (Wagner et al., 2008).

Die ermittelten geophysikalischen Daten wurden als Eingangsparameter für die Simulation der Entzugsleistung der Tiefen-EWS in Oftringen verwendet. Zwei Varianten wurden modelliert: eine definierte Entzugsleistung (40, 50, 60 kW) mittels Wärmepumpe sowie der direkte Wärmeentzug ohne Wärmepumpe mit 1.1, 2.2, 3.3 m³/h fest eingestellten Zirkulationsraten (Wagner et al., 2008). Die Autoren verschiedener Studien kommen zum Schluss, dass die Tiefen-

EWS als Direktheizung nicht wirtschaftlich funktioniert (Huber, 2005; Wagner et al., 2008). Bis zu 45 % höhere Bohrkosten gegenüber oberflächennahen EWS-Bohrungen (Huber, 2005), Wärmeumverteilungsprozesse entlang der Sonde und zu niedrige Temperaturen am Sondenaustritt führen zu Kennwerten, welche eine Nutzung als Direktheizung scheinbar nicht zulassen.

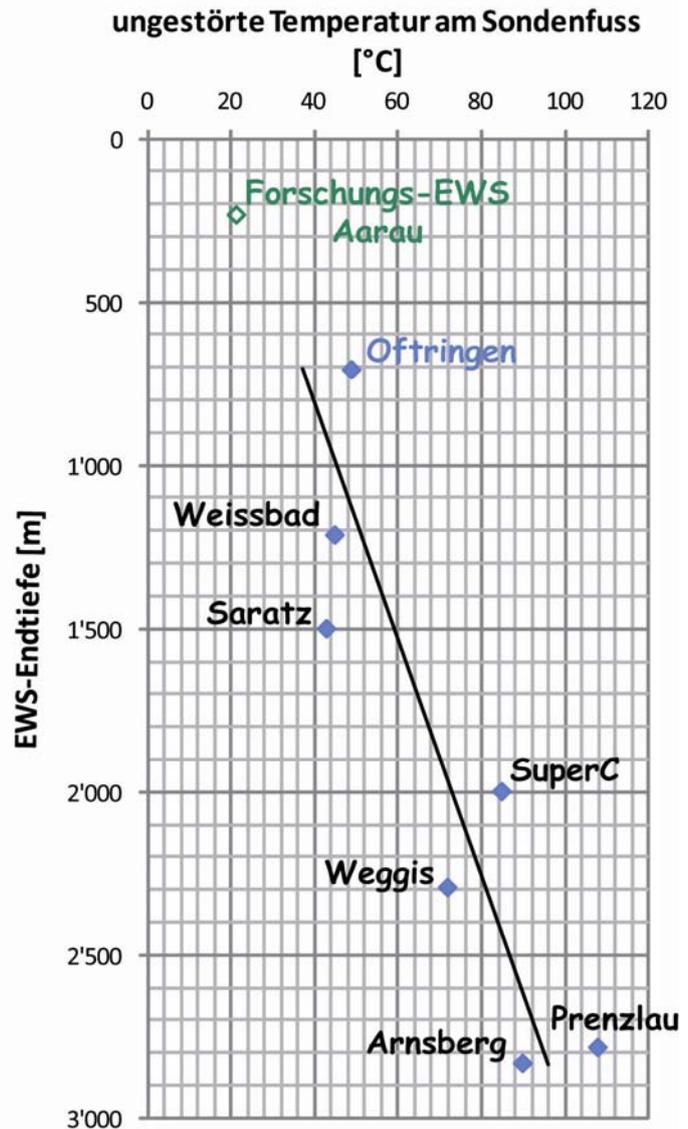


Fig. 4: Diagramm von Tiefen-EWS mit den ungestörten Temperaturen am Sondenfuss. Die lineare Regressionsgerade der Tiefen-EWS zeigt die relative Temperatur einer spezifischen Anlage gegenüber anderen Tiefen-EWS. Zum Vergleich wurde die in der Regression nicht berücksichtigte ungestörte Temperatur am Sondenfuss der „Forschungsanlage Aarau“ mit eingezeichnet. In 225 m Tiefe wurde in Aarau eine ungestörte Temperatur von 21.3 °C gemessen (EBERHARD & Partner AG, 2009).

3. ANSCHLUSS AN VORGÄNGIGE MESSERGEBNISSE

Um an das geophysikalische Messprogramm von 2007 / 2008 anschliessen zu können, war eine *in situ*-Temperaturmessung mit dem NIMO-T-System (GEOWATT AG, Zürich) geplant. Analog zum bestehenden NIMO-T-System für untiefe Erdwärmesonden wurde für die Tiefen-EWS in Oftringen ein spezielles Druckgehäuse entwickelt, welches dem Wasserdruck in 700 m Tiefe standhält (Wagner et al., 2008). Im Rahmen der TRT-Messung wurde am 11.02.2008 mit dem modifizierten NIMO-T-System die erste Referenzmessung der thermisch unbeeinflussten Sonde durchgeführt (Beilage 2).

Gut 1 ¾ Jahre später, am 17. November 2009, wurde die Referenzmessung mit dem gleichen Messgerät und dem gleichen Temperatursensor wiederholt. Die Tiefen-EWS wurde in dieser Zeit nicht genutzt, d. h. es haben sich die natürlichen Temperaturverhältnisse des umgebenden Gebirges in der Sonde eingestellt. Bei der Referenzmessung vom 11. Februar 2008 wurde für den Tiefenbereich von 700 m eine Temperatur von 51.2 °C angegeben, bei der Wiederholungsmessung von 2009 hingegen wurde eine Temperatur von 48.9 °C ermittelt (Beilage 2). Wie kann die Temperaturdifferenz von 2.3 °C in einem konstanten Temperaturumfeld erklärt werden?

Ein möglicher Grund für die Abweichung kann die Kalibration des Temperatursensors und / oder Drucksensors sein. 2008 dienten lediglich 4 Temperaturstützwerte zwischen 15 °C und 40 °C der Kalibrierung, wobei die Nichtlinearität des Temperaturfühlers durch ein Polynom 2. Ordnung berücksichtigt wurde (Mitteilung Diplomingeologe F. Sonnenfroh vom 20.11.2009, GEOWATT AG). Bei der im Rahmen der vorliegenden Projektstudie durchgeführten Neukalibrierung des Temperatursensors erfolgte nach Angaben der GEOWATT AG die Kalibrierung des Temperatursensors durch eine kontinuierliche Messung, welche anschliessend mit einem Polynom 3. Ordnung korrigiert wurde.

Der NIMO-T-Drucksensor liefert die wesentlichen Informationen zur Messtiefe des registrierten Temperaturwertes. Aus diesem Grund muss besonderes Augenmerk auf die Kalibrierung des Drucksensors gelegt werden. Der Drucksensor wurde bei den Messungen von 2008 bzw. 2009 bis maximal 20 bar kalibriert, was einer Tiefe von rund 200 m entsprechen würde. Die Kennlinien von Drucksensoren können einen linearen oder exponentiellen Verlauf aufweisen, wodurch sich in der Extrapolation je nach verwendetem Drucksensor mehr oder weniger grosse Ungenauigkeiten ergeben können.

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes verwendeten Temperaturfühler wurden speziell für die Tiefen-EWS Oftringen angefertigt (Condustris-Met AG, Wetzikon), für den Temperaturbereich zwischen 0 bis 60 °C kalibriert und aufgrund der Länge der Leitungen mit je einem Messverstärker bzw. Messumformer versehen (Beilage 6). Der Temperatursensor in 700 m Tiefe zeigte einen ungestörten Temperaturwert von 48.6 °C an. Die Ergebnisse der NIMO-T-Referenzmessung von 2009 stimmen gut mit den Messwerten der Temperaturfühler überein (Beilage 2).

4. FUNKTIONSPRINZIP DER FORSCHUNGSANLAGE

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, *in situ*-Messwerte für die Bestimmung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit der Tiefen-EWS Oftringen zu erhalten. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Möglichkeit einer Direktheizung. Hierfür wurden einige grundlegende Anforderungen an die zu errichtende Forschungsanlage gestellt:

Grundsätzlich musste es möglich sein, bei einer definierten Durchflussmenge eine kontinuierliche Energiemenge zu fördern. Die gewählte Einstellung sollte so lange gehalten werden, bis ein thermischer Gleichgewichtszustand im Sondenkreislauf erreicht wurde. Hierfür war es notwendig, kontinuierlich Wärmeenergie aus dem System zu entziehen. Zu Beginn der Planungen war nicht klar, wie diese Energie bei eingeschränktem Platzangebot kontrolliert entzogen werden konnte.

Eine einfache und effektive Lösung war der Einbau eines leistungsfähigen Luftherhitzers als Energievernichter. Mit diesem Gerät konnte dem System auf einfache Art und Weise Energie abgeführt werden. Für dieses Verfahren wurden unbedingt kalte Umgebungstemperaturen, wie dies im Winter gewöhnlich der Fall ist, benötigt. Der Luftherhitzer musste demnach ausserhalb des Gebäudes installiert werden. Dadurch entstanden gleich zwei weitere Probleme: einerseits bestand bei einem eventuellen Stillstand der Zirkulationspumpe die Gefahr des Einfrierens des Luftherhitzers, andererseits hing die Leistungsfähigkeit des Luftherhitzers massgeblich von der Umgebungstemperatur ab. Der Einsatz einer 20 %igen Ethylenglykol-Lösung als Wärmeträgerflüssigkeit verhinderte das Einfrieren der Anlage zuverlässig. Die Leistungsmessung (Rechenwerk) musste hierfür an das Arbeitsträgermedium angepasst werden. Das eigentliche Problem stellte die Wetterabhängigkeit der Entzugsleistung dar. Bei einer statischen Regelung ohne aktive Steuerung wird die Entzugsleistung in einer kalten Winternacht gegenüber einem sonnigen Wintertag völlig unterschiedlich sein. Damit musste eine von den Aussentemperaturen unabhängige Steuerung entwickelt werden. Die Lösung des Problems stellte eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) dar. Gleichzeitig musste sich diese aktive Steuerung gegenüber der Hydraulik neutral verhalten. Es war notwendig, dass die einmal eingestellte Durchflussmenge bei jeder Witterung gleich bleiben konnte. Beilage 3 zeigt das für die Tiefen-EWS Oftringen entwickelte und realisierte Anlagenschema.

5. INSTALLATION DER PILOTANLAGE

Die Anlage besitzt für das Messprogramm zwei ganz wesentliche Komponenten: die Temperaturfühler im Vor- und Rücklauf der Tiefen-EWS (2 x 0 m, 2 x 50 m, 2 x 225 m, 2 x 500 m und 1 x 700 m) sowie die Regelung, welche eine dauerhafte und gleichbleibende Entzugsleistung der Sonde erlaubt. Von der Genauigkeit und Funktion dieser Komponenten hängt das wissenschaftliche Ergebnis ab. Die präzise Installation der Temperaturfühler war aufgrund der Kabellänge und der mehrfachen Belegung eines Sondenrohrs ein anspruchsvolle Aufgabe (Fig. 5). Aus diesem Grund wurde das Platzieren der Temperaturfühler noch vor dem Beginn des eigentlichen Anlagenaufbaus durchgeführt. Daneben war nicht klar, ob sich in einem Rohr mehrere Fühler installieren liessen. Schlussendlich ist eine Gesamtlänge von fast 2300 m Messkabel von 0 m (entspricht dem Niveau des Sondenkopfes, in welchem die Sonden ins Gebäude des Unterwerks abgezweigt werden) bis 700 m Tiefe verlegt worden. Anfangs endeten die Leitungen im Schacht, später wurden die Messkabel im Sondenkanal ebenfalls ins Gebäude geführt (Beilage 4).

Am 9. Dezember 2009 wurde mit dem Aufbau der Forschungsanlage und am 13. Dezember 2009 mit der Installation der Mess- und Regeltechnik begonnen (Beilagen 5 bis 8). Aufgrund der Bauart der Temperaturfühler (PT100) sowie der extremen Kabellänge zur Steuer- und Messeinheit mussten sieben Messumformer für die Temperatursensoren 50, 225, 500 (jeweils Vor- und Rücklauf) sowie 700 m eingeplant werden (Beilage 6, oben). Als eigentliches Messkabel wurde ein geschirmtes, 4-adriges Kabel mit etwa 5 mm Durchmesser gewählt.

Im Laufe der ersten Tage wurde die Pilotanlage einjustiert und diverse Messprotokolle (z. B. Stromaufnahme der Pumpe bei variierenden Durchflussraten) erstellt. Das gesamte System wurde grösstenteils mit dem Computer über die Schnittstelle vor Ort bzw. vom Arbeitsplatz bei der EBERHARD & Partner AG von Aarau aus gesteuert (Beilagen 7 + 8). Auch Fehlermeldungen (z. B. Frostschutz, Beilage 8, rechts unten) konnten quittiert und die Anlage online wieder in Betrieb genommen werden. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Testphase wurde am 15. Dezember 2009 die Tiefen-EWS Oftringen in Betrieb genommen. Gleichzeitig begann das wissenschaftliche Messprogramm.



Fig. 5: Installation des tiefsten Temperaturfühlers in 700 m. Bei der Inbetriebnahme des tiefsten Sensors wurde ein Wert von 48.6 °C gemessen.

6. GEMESSENE PARAMETER

Das Messkonzept ist auf die Ziele des Forschungsprojektes ausgerichtet, entworfen und ausgeführt worden. Insgesamt wurden 22 Parameter kontinuierlich erfasst.

Folgende Parameter wurden gespeichert:

- *in situ*-Temperaturen der Tiefen-EWS jeweils im Vor- und Rücklauf auf 0, 50, 225 und 500 m Tiefe
- *in situ*-Temperatur in 700 m Tiefe (Bereich vom Sondenfuß)
- Aussentemperatur
- Vor- und Rücklauftemperatur vom Luftherhitzer
- vom Luftherhitzer tatsächlich entzogene Leistung (in kW)

Folgende Parameter sind online erfasst, aber nicht gespeichert worden:

- aktuelle Stellung des 3-Wege-Mischventils (in %)
- aktuelle Drehzahlleistung des Luftherhitzers (in %)
- Betriebsstunden Pumpe
- Betriebsstunden Luftherhitzer
- Anlage im Hand- oder Automatikbetrieb

Weitere dargestellte und online veränderbare Grenzwerte:

- Freigabe Aussentemperatur
- Sollwert Frostschutz
- Sollwert Leistungsentzug (in kW)
- Sollwert Luftherhitzer (in %)

7. INBETRIEBNAHME

Eine erste Auswertung der Daten hat ergeben, dass die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) die vorgegebene Entzugsleistung von 10 kW bei einer Durchflussmenge von 1.5 m³/h trotz teilweise stark schwankender Aussentemperaturen (+2.2 bis -13.4 °C) auf Dauer problemlos halten kann (Fig. 6).

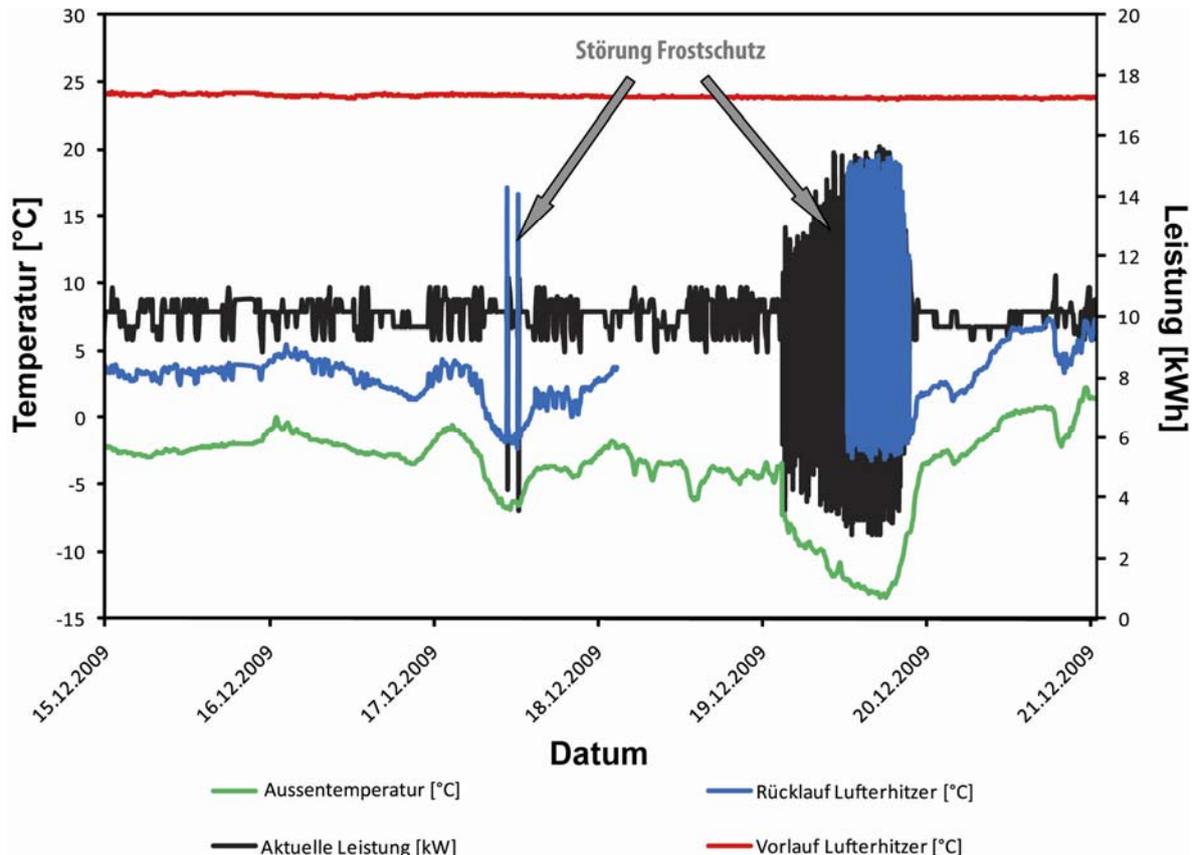


Fig. 6: Bei einem dauerhaften Entzug von 10 kW bleibt die Vorlauftemperatur über die gemessene Zeitspanne praktisch gleich, während die Rücklauftemperatur die Kurvature der Aussentemperaturen nachzeichnet, d. h. es wurde nur sehr wenig Sondenfluid dem in der Tiefen-EWS zirkulierenden Sondenkreislauf beigemischt. Durch einen Systemupdate wurden die Daten der Rücklauftemperaturen am 20.12.2009 gelöscht. Die Messwerte konnten aufgrund früherer Sicherungen teilweise wiederhergestellt werden. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

Am 19. Dezember 2009 ist die Aussentemperatur rapide gefallen. In den Morgenstunden des 20. Dezember sind die Temperaturen auf unter -13 °C gefallen. Aufgrund der geringen Entzugsleistung von 10 kW wurde sehr wenig abgekühltes Wärmeträgermedium dem Sondenkreislauf (Kreislauf 1) beigemischt und somit zu wenig abgekühltes Arbeitsmedium weggeführt (Beilage 3). Dadurch reduzierte sich die Fließgeschwindigkeit des Mediums im Kreislauf 2 immer mehr und die Temperaturen sackten in den Minusbereich ab. Die Solerücklauftemperatur vom Lufterhitzer fiel in der Folge auf -2 °C, wodurch von der SPS die Störmeldung „Frostschutz“ ausgelöst wurde. Bei einer Störmeldung dieser Art wird der Ventilator des Lufterhitzers abgeschaltet. Um ein mögliches

Einfrieren der Anlage zu verhindern wird die Umwälzpumpe weiter betrieben. Eine kontrollierte Entzugsleistung ist bis zur Entsperrung der Störmeldung nicht möglich (vgl. Fig. 6 und 7). Die direkten Folgen der Störung wurden in den Rücklauf-Temperaturprofilen bei 0, 50 und 500 m durch die Datenaufzeichnung festgehalten, wobei der Einfluss der Störung mit der Tiefe abnimmt, bis er schliesslich in 700 m Tiefe nicht mehr feststellbar war (Fig. 7). Nachdem die Störmeldung manuell quittiert und die minimale Temperatur für die Störmeldung „Frostschutz“ auf -10 °C gesetzt wurde, funktionierte die Anlage auch bei tieferen Aussentemperaturwerten reibungslos.

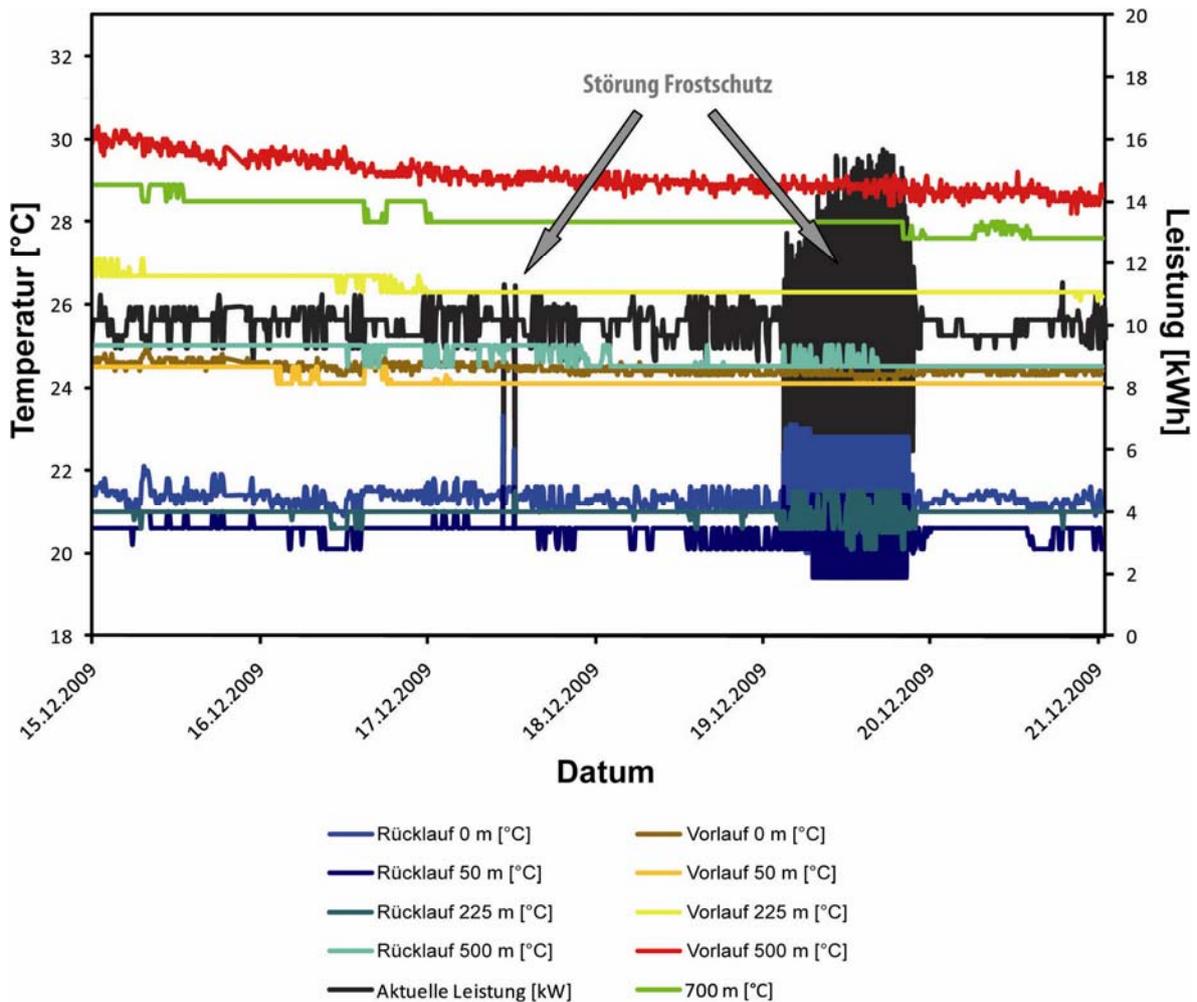


Fig. 7: Durch die „Störung Frostschutz“ wurden speziell die Vorlauftemperaturen kaskadenartig beeinflusst. Ab einer Tiefe von 500 m (Rücklauf) war eine thermische Beeinflussung durch das Störereignis nicht mehr nachweisbar. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

Die erste Entzugsleistung von 10 kW schien die Sonde nur wenig zu belasten. Bei tieferen Aussentemperaturen sollte eine schrittweise Steigerung der Sole-Zirkulation bei maximal möglichen Entzugsraten problemlos möglich sein.

7.1. KALKPLÄTTCHEN IM WÄRMETRÄGERMEDIUM

Nach der Inbetriebnahme funktionierte das gesamte System problemlos. Gut zwei Wochen später wurde die eingestellte Durchflussmenge und die festgelegte dauerhafte Entzugsleistung nicht mehr korrekt gehalten. Die anfängliche maximale Durchflussmenge betrug fast 4 m³/h, als es zu den ersten Veränderungen gekommen ist, war nur noch ein Maximalwert von 2,9 m³/h erreichbar – Tendenz weiter abnehmend. Eine Untersuchung der Siebeinsätze (Schmutzfang, Wasserzähler) offenbarte, dass die Anlage mit einer erheblichen Menge an Kalkplättchen verunreinigt war. Das Problem der Kalkfällung war bei konventionellen EWS (Doppel-U-Sonde, Koaxialsonde) bislang unbekannt und ist Thema eines anderen Forschungsberichtes (BFE-Projektnummer: SI/500'521).

7.2. SPORADISCHER AUSFALL EINES TEMPERATURFÜHLERS

In den Messdaten vom Temperaturfühler „Vorlauf 500 m“ waren ab Ende Dezember 2009 Signalstörungen feststellbar. Bei den Anomalien handelte es sich um einzelne Peaks, einmal auch um ein über mehrere Stunden anhaltendes gestörtes Signal (Fig. 8, linke Seite). Im Laufe der Zeit häuften sich die Messausfälle (Fig. 8, rechte Seite). Es waren keinerlei zeitliche Muster der Messausfälle feststellbar, d. h. eine elektromagnetische Störung durch das Einschalten des Notstromaggregates im Unterwerk Oftringen oder andere Fehlerquellen konnten sehr schnell ausgeschlossen werden. Damit blieb der Messverstärker oder der Temperaturfühler als Fehlerquelle übrig. Vom Hersteller des Messverstärkers wurde uns mitgeteilt, dass dieser eigentlich nicht für solche extremen Einsätze ausgelegt ist. Eine starke Erwärmung des Verstärkers könnte demzufolge auf einen Defekt hinweisen. Eine Überprüfung hat ergeben, dass alle Signalverstärker normal arbeiteten. Um einen definitiven Verlust des Temperatursensors ausschließen zu können, wurde die komplette Signalverarbeitung von „Vorlauf 500 m“ durch die EBERHARD & Partner AG Stück für Stück überprüft.

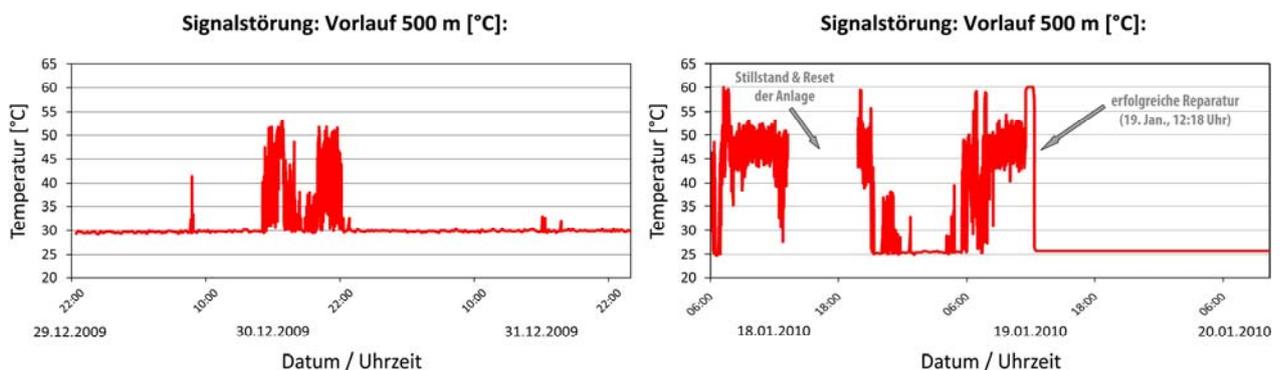


Fig. 8: Das Signal vom Temperaturfühler „Vorlauf 500 m“ zeigte Ende 2009 sporadisch gestörte und verrauschte Messwerte (linkes Diagramm). Diese temporären Ereignisse konnten als „Ausreiser“ identifiziert und für die weitere Datenanalyse berücksichtigt werden. Bis Mitte Januar 2010 nahmen die Fehlmessungen stark zu (rechtes Diagramm). Aufgrund der durch die Kalkproblematik entstandenen Ausfälle und der Temperatursensor-Störungen „Vorlauf 500 m“ wurden die Messwerte vom 5./6. Januar bis 19. Januar bei der Auswertung der Ergebnisse nicht berücksichtigt.

Die Überprüfung ergab, dass die betroffene Messleitung im Schaltschrank (Beilage 6) verlängert und überbrückt worden war. Zur Überbrückung wurde eine handelsübliche WAGO-Klemme verwendet. Nach dem Ersatz der Klemme wurden die Schirmung und die vier Messleitungen fest mit dem Verlängerungsstück verlötet. Seither ist das übermittelte Signal sehr stabil und reagiert auf Temperaturänderungen analog wie die anderen Temperaturfühler.

Grund für die Signalstörung

Die Pilotanlage steht zusammen mit dem Notstromaggregat in einem als Abstell- bzw. Lagerplatz genutzten Raum. Der Raum ist zwar im Winter beheizt, trotzdem kann durch das Öffnen des Garagentores feuchte Luft hinein gelangen. Möglicherweise hat sich dadurch der elektrische Kontakt der WAGO-Klemme sukzessive verschlechtert und es kam zu der beobachteten temporären Signalstörung des Temperaturfühlers.

8. MESSPROGRAMM

Im Winter 2009 / 2010 wurde ein umfangreiches Messprogramm absolviert. Es war geplant bei definierten Zirkulations- bzw. Durchflussraten (1.5, 2.5, 3.5 m³/h) dauerhaft eine bestimmte Wärmeleistung dem Zirkulationsstrom zu entnehmen und dabei die *in situ*-Temperaturen an verschiedenen Punkten der Pilotanlage zu ermitteln. Erst nach Erreichen von gleichbleibenden und stabilen Temperaturwerten über eine minimale Zeitspanne von 6 bis 8 Tagen wurde die Anlage neu eingestellt. Ziel war es, eine kontinuierliche Messreihe über ein bis zwei Tage (oder länger) während der dauerhaften Entzugsleistung (5, 10, 15, 20, 30 kW) bei unterschiedlichen, fest eingestellten Durchflussraten zu erhalten.

Anschliessend wurde die Anlage bei den oben genannten Zirkulationsraten ohne Entzugsleistung betrieben. Auf diese Weise wurden die im Bohrloch umverteilte Wärmemenge und der Bereich der maximalen Wärmeverluste bei der jeweiligen Durchflussrate genauer bestimmt. Für diese Messung wird die Anlage im Kurzschluss, d. h. nicht über den Luffterhitzer, sondern nur über Sondenverteiler – Kreislaufpumpe – Sondenverteiler, betrieben (Beilage 3). Nach dem aktiven folgte ein passives Messprogramm. Hierfür wurde die Anlage abgeschaltet und die Zeitdauer bestimmt, bis zu welcher die natürlichen thermischen Verhältnisse wieder erreicht waren.

Die Kalkproblematik (Kap. 7.1) erzwang eine sporadische Reinigung der Schmutzrückhaltesysteme. Die Messung wurde durch die Reinigung des Schlammabscheiders nicht beeinflusst (der Reinigungsvorgang fand ohne Betriebsunterbrechung statt), während die Reinigung der Schmutzfänger eine Betriebsunterbrechung erforderte, wodurch die Messdaten stark beeinflusst wurden (EBERHARD & Partner, 2010). Der gesamte Reinigungsvorgang der beiden Schmutzfänger dauerte 1 bis 2 Stunden. Diese Zeit macht sich besonders deutlich in den Entzugsleistungsprotokollen bemerkbar (Fig. 9). Aus diesem Grund wurde die „grosse“ Anlagenreinigung immer vor einer Umstellung (z. B. neue Entzugsleistung oder andere Durchflussmenge) durchgeführt. Erst nach Erreichen der eingestellten Leistung bzw. nachdem sich ein kontinuierliches Temperaturgleichgewicht in den unterschiedlichen Sondenniveaus eingestellt hatte, wurden die Messwerte für die weitere Auswertung verwendet.

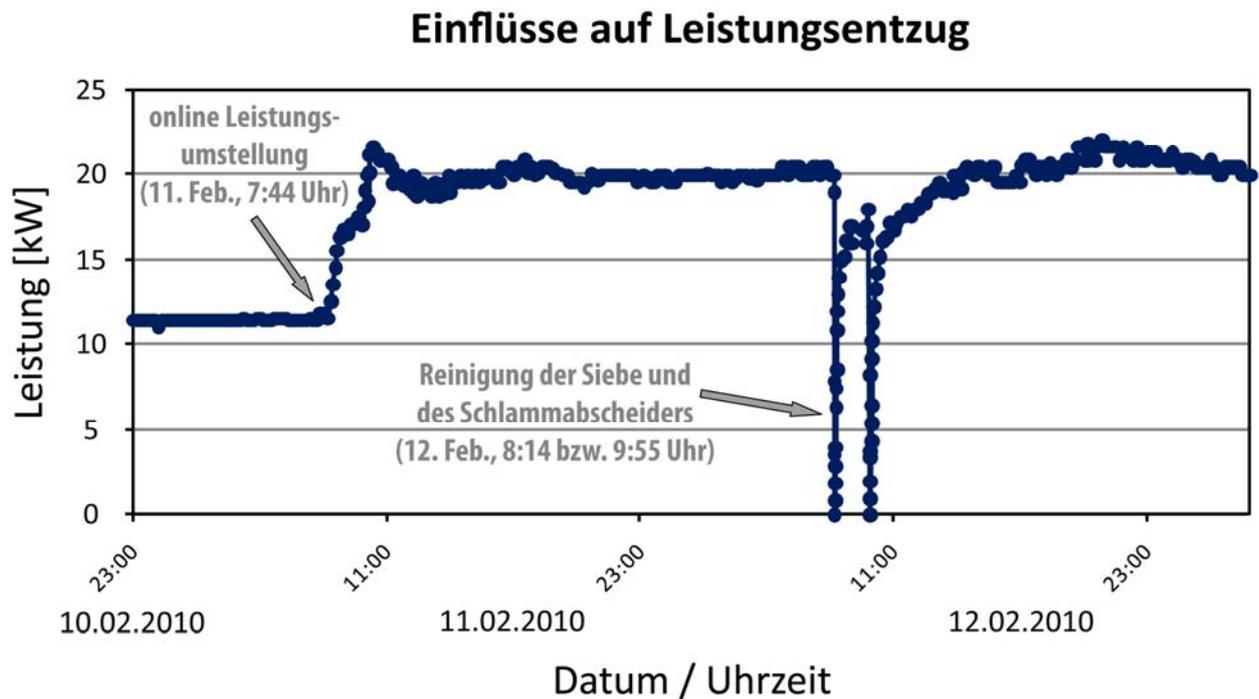


Fig. 9: Effektive Anlagenbeeinflussung durch die Reinigung der beiden Schmutzfänger sowie des Schlammabscheiders. Bei der online erfolgten Leistungsumstellung (ohne Unterbrechung der Zirkulation) wurde der eingestellte Sollwert (20 kW Leistungsentzug) nach etwa 3 Stunden erreicht. Nach der völligen Unterbrechung der Zirkulation (Reinigung der Siebe / Schlammabscheider) wurden nach dem Anfahren der Forschungsanlage mehr als 15 Stunden für die Erreichung des eingestellten Sollwertes benötigt.

Temporäre Ereignisse, wurden durch das kontinuierliche Speichern der Messwerte dokumentiert. Veränderungen in einer kontinuierlichen Messreihe, wie sie beispielsweise durch die Umstellung von Sollwerten, Standzeiten oder Reinigungsmaßnahmen auftreten konnten, wurden in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Für die Auswertung wurden kontinuierliche Messreihen über mehrere Tage bei gleichbleibendem Entzugsleistung und stabilen Temperaturwerten in den unterschiedlichen Temperaturniveaus (0, 50, 225, 500 und 700 m) herangezogen.

9. MESSDATEN

Die Messdaten werden zusammenfassend in Tabelle 2 dargestellt. Für die einzelnen Messphasen werden die Temperaturwerte als gemittelte Werte über die Messzeit dargestellt. Als Messzeit gilt die Zeit, in der sich ein stabiles Temperaturgleichgewicht in den verschiedenen Sondenniveaus (d. h. ohne Einfluss der Umstellung von Entzugsleistung, Durchflussmenge oder Reinigung) eingestellt hat.

Entzugsleistung, theoretisch [kW]		0			5			10			15			20		
mittlere Entzugsleistung, gemessen [kW]		0.0	0.0	0.0	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0	10.2	11.8	14.6	14.9	-	19.3	19.9
Durchflussmenge [m ³ /h]		1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5
MW Temperaturfühler [°C]; RL=Rücklauf, VL=Vorlauf	RL 0 m	23.5	26.1	26.7	19.3	21.9	23.6	20.5	18.6	20.6	9.6	15.3	17.3	-	10.8	14.0
	RL 50 m	23.1	25.7	26.3	19.2	21.6	23.2	20.5	18.4	20.6	10.6	15.4	17.2	-	11.4	14.2
	RL 225 m	22.9	25.1	25.8	20.5	21.8	23.1	21.0	19.3	20.6	15.1	16.9	18.0	-	14.1	15.7
	RL 500 m	27.5	27.1	27.1	25.9	24.9	25.0	24.5	23.2	22.8	24.0	21.5	20.8	-	20.4	19.9
	700 m	31.4	29.3	28.9	30.0	27.6	26.7	28.0	25.8	25.0	29.2	24.5	23.2	-	24.3	23.0
	VL 500 m	31.1	29.8	29.3	30.0	28.0	27.6	28.4	26.7	25.8	28.9	25.8	24.5	-	25.3	24.1
	VL 225 m	26.7	27.8	28.0	25.4	25.8	26.2	26.2	24.3	24.5	22.7	22.8	22.8	-	21.8	22.1
	VL 50 m	23.8	26.3	26.8	22.4	23.7	25.0	24.1	22.3	23.2	18.4	20.8	21.5	-	19.2	20.3
	VL 0 m	23.7	26.2	26.7	21.9	23.6	24.8	23.7	22.0	23.1	17.3	20.5	21.3	-	18.5	20.1

Tab. 2: Ausgewertete Leistungs- und Temperaturwerte für die unterschiedlichen Anlagenzustände. Erst nach dem Erreichen eines stabilen Temperaturgleichgewichtes wurden die Messwerte für die Auswertung berücksichtigt. Die blau dargestellten Messwerte repräsentieren Messreihen, bei welchen nicht lange genug ein stabiles Temperaturgleichgewicht erreicht wurde bzw. die eingestellte Entzugsleistung (15 kW) nicht erreicht wurde. Die blau gekennzeichneten Messreihen (1.5 m³/h, 10 bzw. 15 kW Entzugsleistung) wurden aus diesem Grunde bei der energetischen Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Messdiagramme enthalten die automatisch mitgeschriebenen Temperaturprotokolle nach der Leistungs- und/oder Durchflussumstellung. Dadurch können die Temperaturverläufe nach oben oder unten verlaufen, d. h. es war zum jeweiligen Zeitpunkt noch kein stabiles Temperaturgleichgewicht erreicht. Diese instabilen Phasen wurden in der weiteren Auswertung (Tab. 2) nicht berücksichtigt. Die Messdiagramme werden im Folgenden nicht chronologisch, sondern geordnet nach Durchflussmenge und Entzugsleistung dargestellt. Es wurde versucht, eine möglichst lange Messreihe für die Auswertung heranzuziehen. Dadurch ergeben sich nach dem Erreichen eines Temperaturgleichgewichtes unterschiedlich lange Messzeiten.

9.1. 1.5 m³/h DURCHFLUSSMENGE

Die Messungen ohne Entzugsleistung (0 kW) wurden erst im Frühjahr, als es bereits zu regelmäßigen und sehr starken Tag- / Nachtschwankungen gekommen ist, durchgeführt (Fig. 10, rechtes Diagramm). Die Temperaturen in 700 m und VL500 m sind mit einer durchschnittlichen Temperaturdifferenz von 0.3 K praktisch gleich. Die grössten Wärmeverluste ergeben sich zwischen VL500 und VL225 ($\Delta T=4.4$ K) und VL225 und VL0 ($\Delta T=3.0$ K).

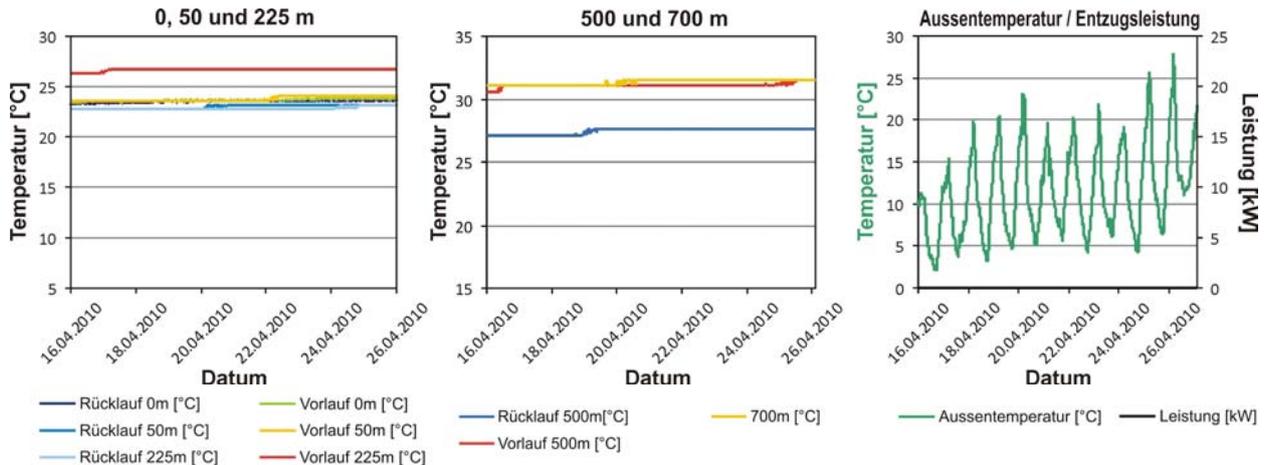


Fig. 10: Messdaten für 0 kW Entzugsleistung bei 1.5 m³/h.

Bei 5 kW setzt eine Auftrennung der gemessenen Rücklauftemperaturen zwischen 50 m und 225 m ein (Fig. 11, links), d. h. aufgrund der Wärmeentnahme wird die Vorlauftemperatur so weit gesenkt, dass ab 50 m Tiefe Wärme aus dem Boden entnommen wird, wodurch sich bei 225 m Tiefe ein mittleres Temperaturniveau von 20.5 °C einpendelt. Die Temperaturen in 700 m und VL500 m haben sich bei 30 °C eingestellt und weisen praktisch keine Temperaturdifferenz auf (Fig. 11, mittig).

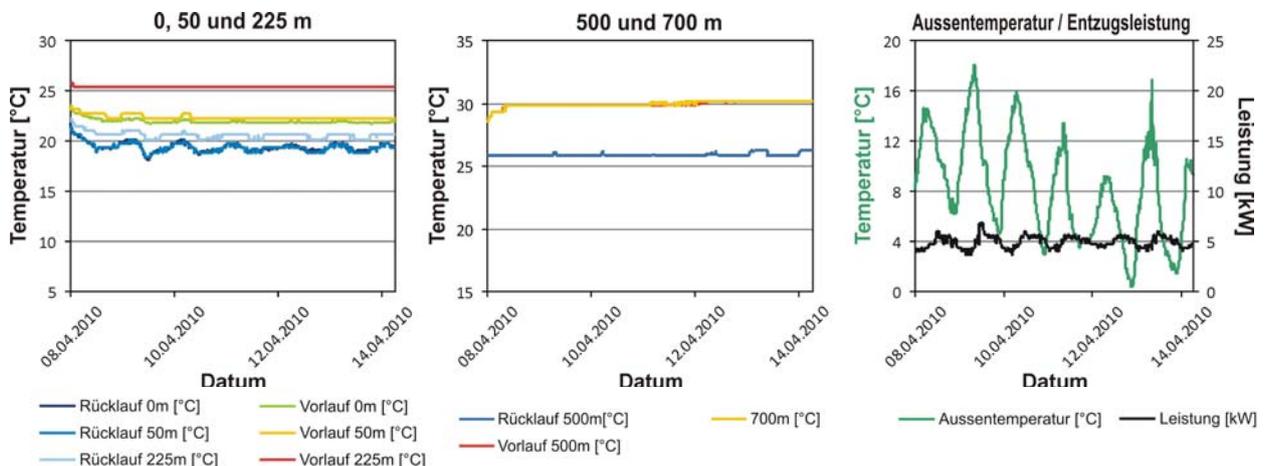


Fig. 11: Messdaten für 5 kW Entzugsleistung bei 1.5 m³/h.

Die Messreihe 10 kW konnte aufgrund einsetzender technischer Probleme nicht lange genug durchgeführt werden (siehe Kap. 7.1). Gerade in den tieferen Bereichen scheint ein stabiler Temperaturzustand noch nicht ganz erreicht worden zu sein (Fig. 12, Mitte, Vorlauf 500 m). Aufgrund der limitierten Messzeit konnte dieser Versuch nicht wiederholt werden. Wegen der sukzessiven Beeinflussung der eingestellten Durchflussmenge durch Kalkplättchen im Wärmeträgermedium (Kap. 6.1) sowie der relativ kurzen effektiven Messzeit wurde auf eine weitere energetische Auswertung (Kap. 10) verzichtet.

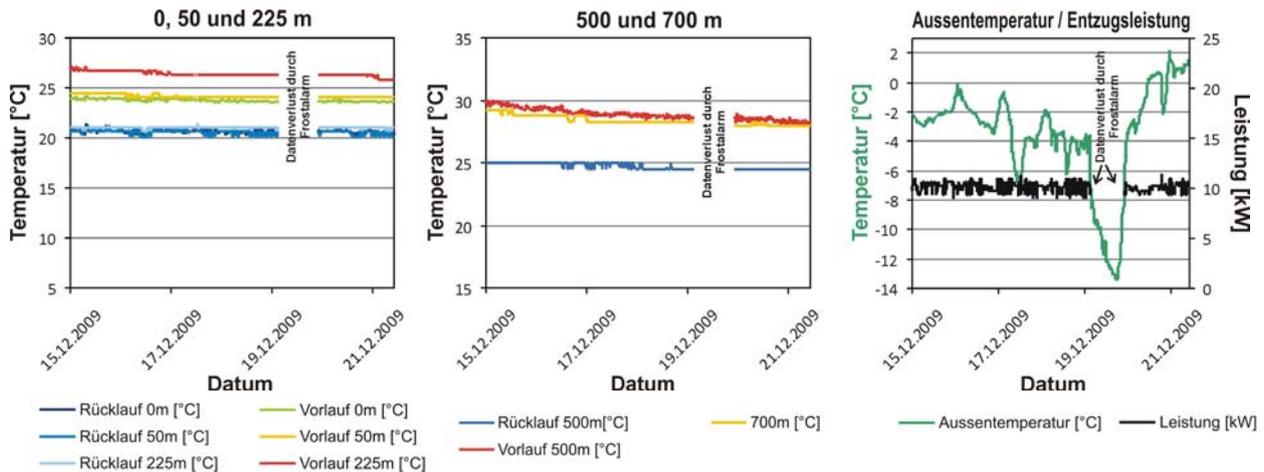


Fig. 12: Messdaten für 10 kW Entzugsleistung bei 1.5 m³/h.

Bei einer Durchflussmenge von 1.5 m³/h und einem dauerhaften Entzugsleistung von 15 kW erreicht die Sonde tatsächlich nur einen mittleren Wert von 11.8 kW (Tab. 2). Die Rücklauf-temperaturen (RL0 bis RL225) zeichnen den Verlauf der Aussentemperaturen nach (Fig. 13, rechts). Interessant ist die Tatsache, dass dieser Zusammenhang im tiefen Bereich praktisch nicht nachweisbar ist. Trotzdem zeichnen die Temperaturen von VL225 (schwach), VL50 und VL0 (stark) die Einflüsse der Aussentemperaturen deutlich nach. Thermisch beeinflussen sich demnach Rücklauf und Vorlauf im Bereich 0 bis 50 m relativ stark. Die gemittelten Werte sind zwar in Tabelle 2 dargestellt, wurden aber in der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

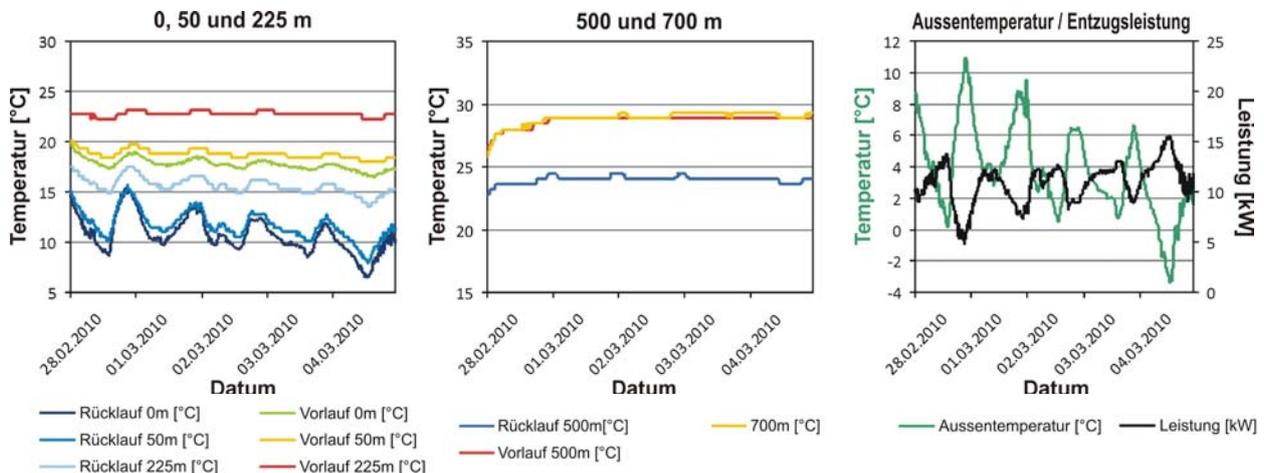


Fig. 13: Messdaten für 15 kW Leistungsentzug bei 1.5 m³/h.

Wird die Entzugsleistung auf 20 kW erhöht, so verstärkt sich das vorher beschriebene Bild. Das 3-Wege-Mischventil war zu diesem Zeitpunkt zu 100 % geöffnet; folglich zirkulierte das gesamte Wärmeträgermedium über den Luftherhizer (Beilage 3). Damit war der Luftherhizer bei den gegebenen Aussentemperaturen an die Grenze seiner Leistungsfähigkeit gekommen. Die Leistungskurve verhielt sich dabei reziprok zur Aussentemperatur (Fig. 14 rechts). Die Anlage kann ohne zusätzliche Massnahmen (z. B. Wärmepumpe) die eingestellte thermische Leistung nicht mehr erbringen. Die Daten wurden bei der weiteren energetischen Auswertung nicht verwendet.

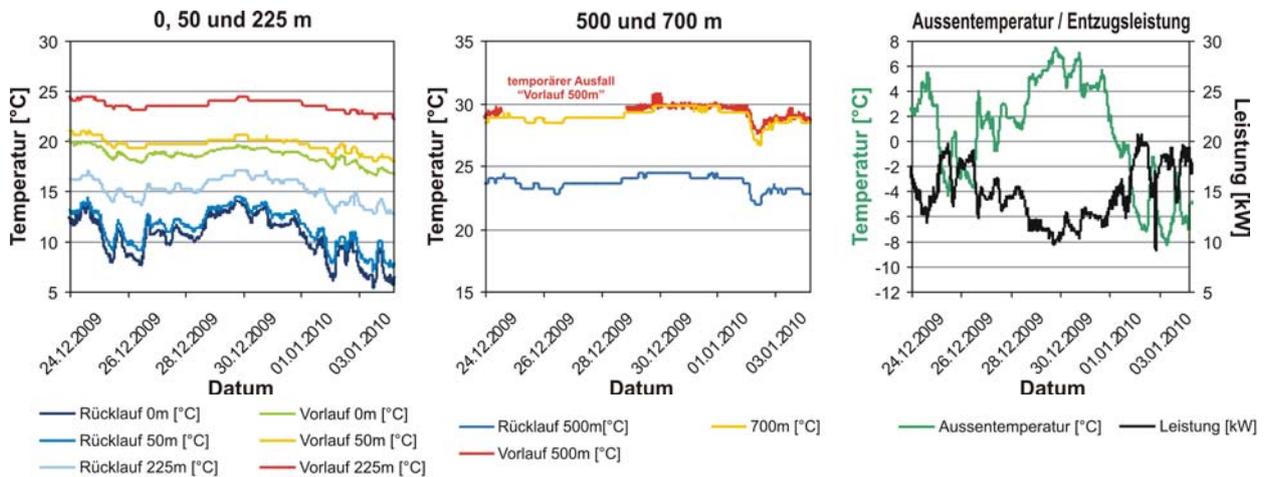


Fig. 14: Messdaten für 20 kW Leistungsentzug bei 1.5 m³/h.

9.2. 2.5 m³/h DURCHFLUSSMENGE

Bei einer Durchflussmenge von 2.5 m³/h und ohne Entzugsleistung (0 kW) nähern sich vor allem die Rücklauf- und Vorlauftemperaturen zwischen 0 und 225 m einander an. Gleichzeitig steigen die Sondenaustrittstemperaturen von 23.7 °C (1.5 m³/h) auf 26.2 °C (2.5 m³/h) an.

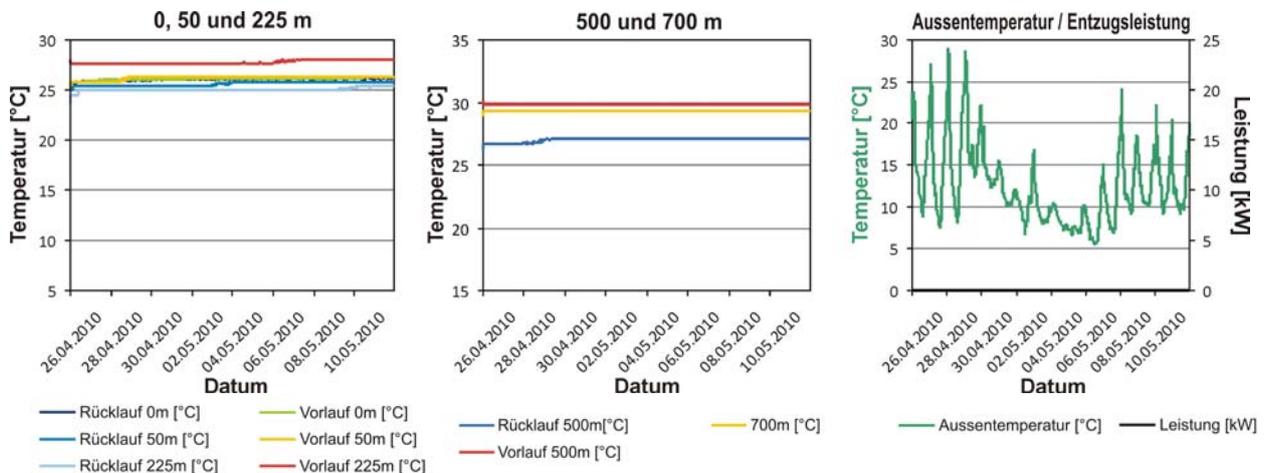


Fig. 15: Messdaten für 0 kW Leistungsentzug bei 2.5 m³/h.

Die Messreihe 5 kW Entzugsleistung bei 2.5 m³/h Durchflussmenge wurde im März 2010, als die Tagestemperaturschwankungen bereits sehr stark (ΔT bis 20 K) waren, erhoben. Die starken Schwankungen der Aussentemperatur wurden von der SPS-Steuerung nicht mehr gänzlich abgefangen, wodurch es zu einer verzögerten Einregelung auf den Sollwert der Entzugsleistung (5 kW) gekommen ist (Fig. 16, rechts). Im Mittel wurde trotzdem eine Entzugsleistung von 5.02 kW erreicht.

Im Diagramm (Fig. 16, links) wird ersichtlich, dass erneut eine direkte thermische Beeinflussung von Vorlauf zu Rücklauf stattgefunden hat. Die Kältephasen des Rücklaufs wurden in gedämpfter Form an den wärmeren Vorlauf weiter gegeben, wodurch sich die Abkühlungsphasen im wärmeren Vorlauf durchzeichneten (Fig. 16, linke und mittlere Grafik).

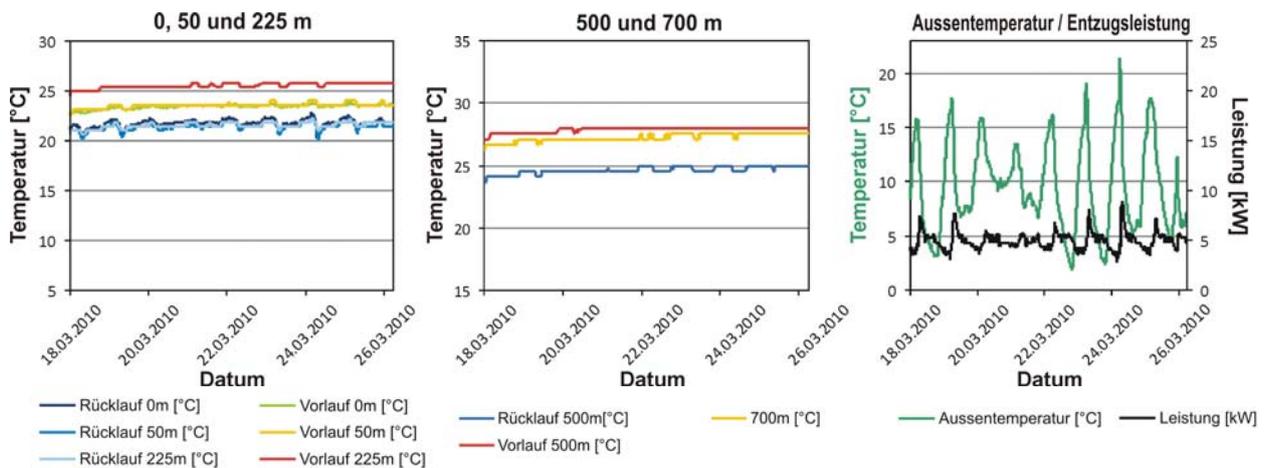


Fig. 16: Messdaten für 5 kW Leistungsentzug bei 2.5 m³/h.

Bei einer weiteren Erhöhung der Entzugsleistung auf 10 kW findet im Bereich von 0 bis 225 m eine signifikante Temperaturspreizung zwischen kälterem Rücklauf und wärmerem Vorlauf statt (Fig. 17, links). Bei 2.5 m³/h bewirkte die Erhöhung von 5 auf 10 kW eine Verdopplung des mittleren Temperaturunterschieds am Eintritt bzw. Austritt der Sonde (ΔT wurde von 1.7 K auf 3.4 K erhöht).

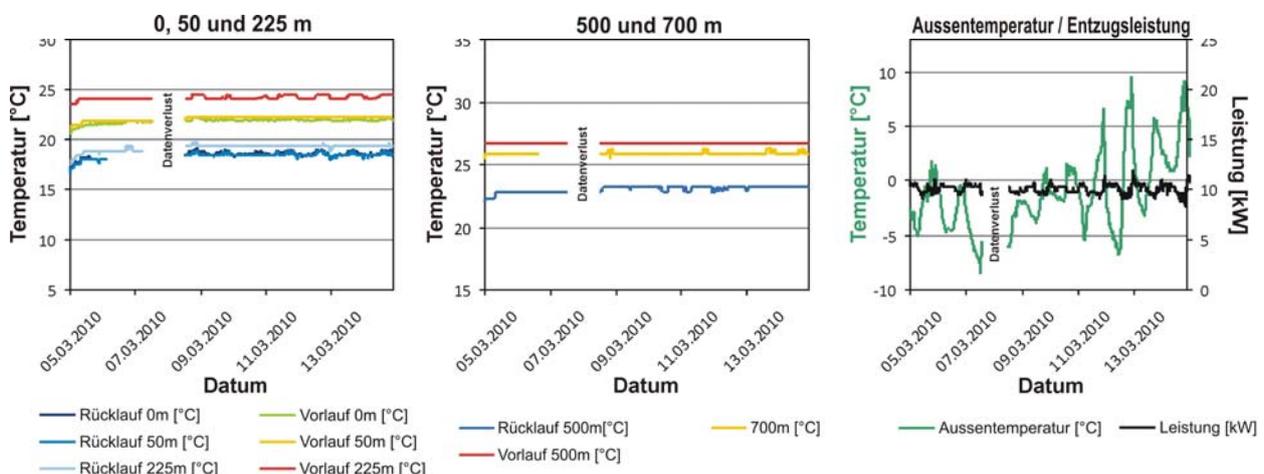


Fig. 17: Messdaten für 10 kW Leistungsentzug bei 2.5 m³/h.

Werden 15 kW Leistung dauerhaft entzogen, steigt zwar der Temperaturunterschied zwischen dem Eintritt bzw. Austritt der Sonde weiter an (ΔT 5.2 K), gleichzeitig fallen die Vorlauftemperaturen stark ab. So werden in 700 m Tiefe durchschnittlich noch 24.5 °C (Fig. 18, mittig), am Sondenvorlauf 0 m 20,5 °C (Fig. 18, links) erreicht. Über die betrachtete Messperiode betrug die Entzugsleistung 14.6 kW (Fig. 18, rechts).

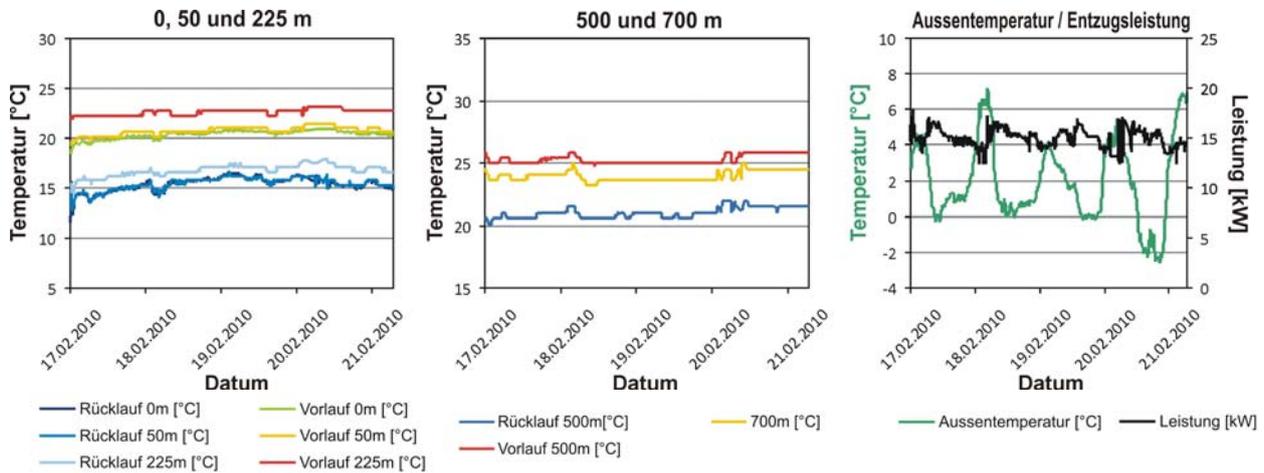


Fig. 18: Messdaten für 15 kW Leistungsentzug bei 2.5 m³/h.

Bei einer Entzugsleistung von 20 kW und 2.5 m³/h beträgt der mittlere Temperaturunterschied zwischen Eintritt bzw. Austritt der Sonde 7.7 K. Gegenüber der eingestellten Entzugsleistung von 15 kW wurde die Temperaturspreizung zwar weiter verbessert, die Austrittstemperatur am Sondenvorlauf erreichte allerdings nur noch eine mittlere Temperatur von 18.5 °C.

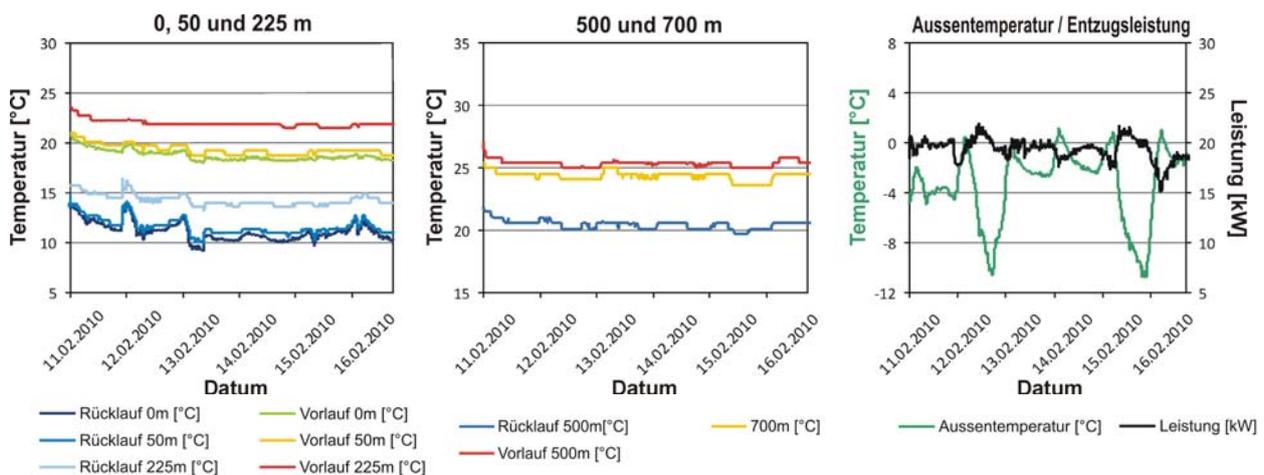


Fig. 19: Messdaten für 20 kW Leistungsentzug bei 2.5 m³/h.

Aufgrund des Verhaltens der Sonde bei einem dauerhaften Entzug von 20 kW und 2.5 m³/h war absehbar, dass die Grenze der Leistungsfähigkeit der Pilotanlage bei den neuen Einstellungswerten 30 kW und 2.5 m³/h wahrscheinlich erreicht bzw. überschritten würde. Die Messreihe zeigte, dass diese Annahme richtig war (Fig. 20). Ähnlich wie bei Figur 14 (Einstellungen: 20 kW Entzugsleistung bei 1.5 m³/h) zeigte sich, dass sich die Entzugsleistung reziprok zur Aussentemperatur verhielt (Fig. 20, rechts). Praktisch während der gesamten Messzeit war das 3-Wege-Mischventil zu 100 % geöffnet. Der Durchfluss im Kreislauf 1 und 2 war somit identisch (Beilage 3). Faktisch war das System an seiner Leistungsgrenze angekommen. Die Daten wurden bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

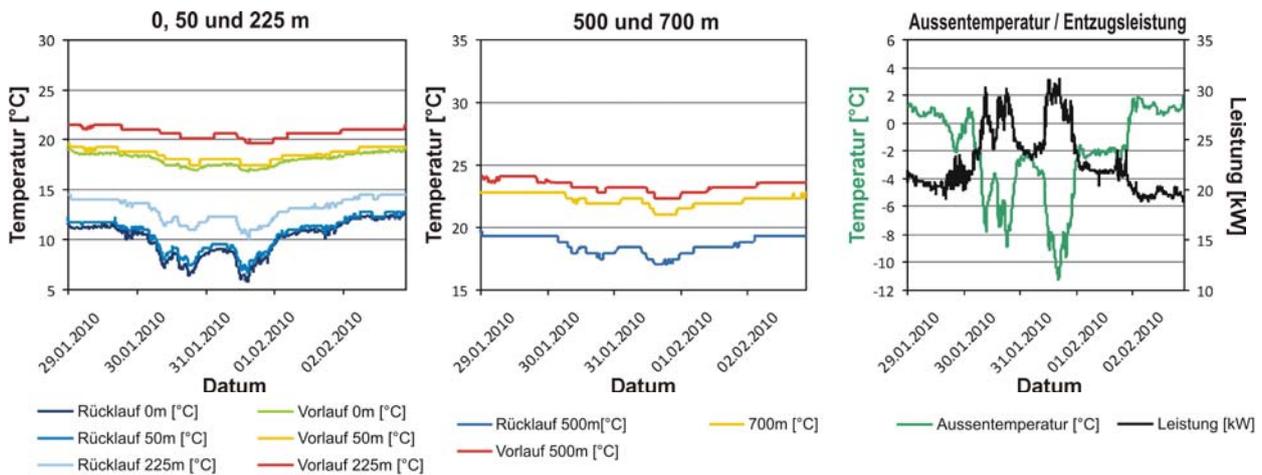


Fig. 20: Messdaten für 30 kW Leistungsentzug bei 2.5 m³/h.

9.3. 3.5 m³/h DURCHFLUSSMENGE

Die Durchflussmenge 3.5 m³/h war die maximale Durchflussmenge, welche in der vorliegenden Studie gemessen und ausgewertet wurde. Die Messungen ohne Entzugsleistung (0 kW) ergaben durchschnittliche Temperaturwerte von 28.9 °C in 700 m und geringfügig höhere Werte von 29.3 °C im Vorlauf von 500 m. Gleichzeitig stellten sich mit 26.7 °C die höchsten gemessenen mittleren Temperaturen am Austritt der Sonde ein (Fig. 21, links).

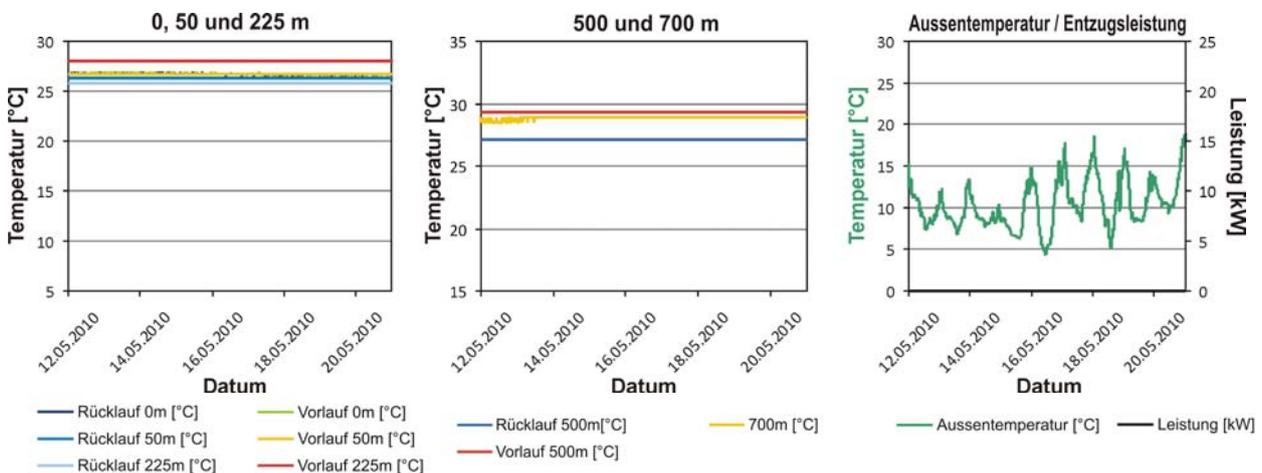


Fig. 21: Messdaten für 0 kW Leistungsentzug bei 3.5 m³/h.

Wird eine Entzugsleistung von 5 kW eingestellt, so ergibt sich ein mittlerer Temperaturunterschied zwischen Eintritt bzw. Austritt der Sonde von 1.2 K (VL0 m 24.8 °C, RLO m 23.6 °C). Die Aussen-temperaturen (Fig. 22, rechts) zeigen teilweise sehr starke Tag-/Nachtschwankungen. Bei geringeren Durchflussraten wurde bei ähnlichen Bedingungen eine stärkere Temperaturbeeinflussung zwischen Vor- und Rücklauf festgestellt (z. B. Fig. 16). Bei einer Durchflussrate von 3.5 m³/h ist dieser Effekt geringer (Fig. 22, linke und mittlere Grafik).

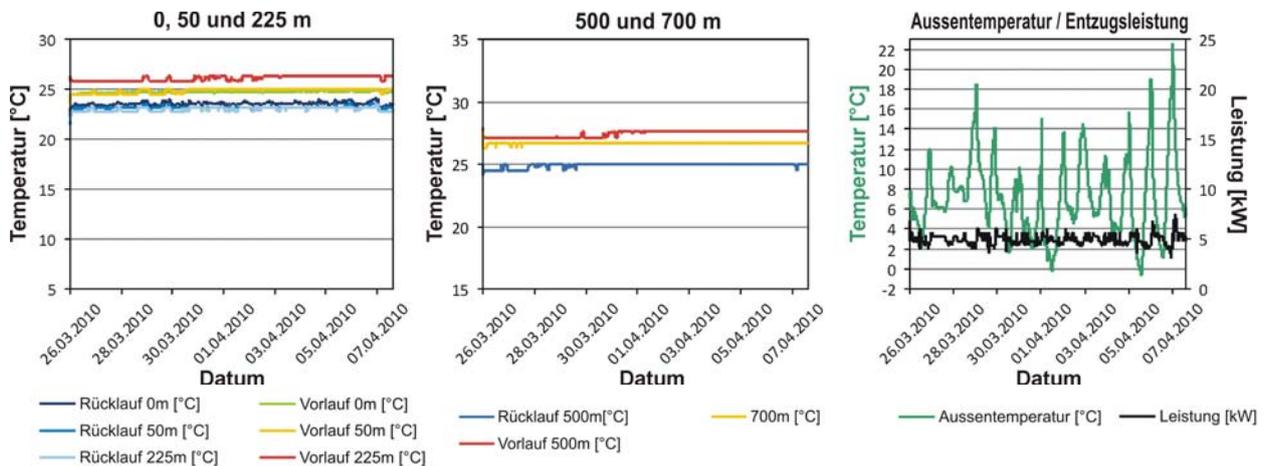


Fig. 22: Messdaten für 5 kW Leistungsentzug bei 3.5 m³/h.

Die Messreihe 10 kW Entzugsleistung bei 3.5 m³/h wurde aufgrund technischer Probleme (siehe Kap. 7.1 und 7.2) nur etwa drei Tage durchgeführt. Die aus den Daten erstellten Diagramme belegen, dass im berücksichtigten Zeitraum (Beilage 16) stabile Temperaturwerte erreicht wurden (Fig. 23, linke und mittlere Grafik). Aus diesem Grunde wurden die gewonnenen Messdaten für die weitere energetische Auswertung herangezogen. Die mittlere entzogene Leistung beträgt 10,2 kW (Fig. 23, rechts).

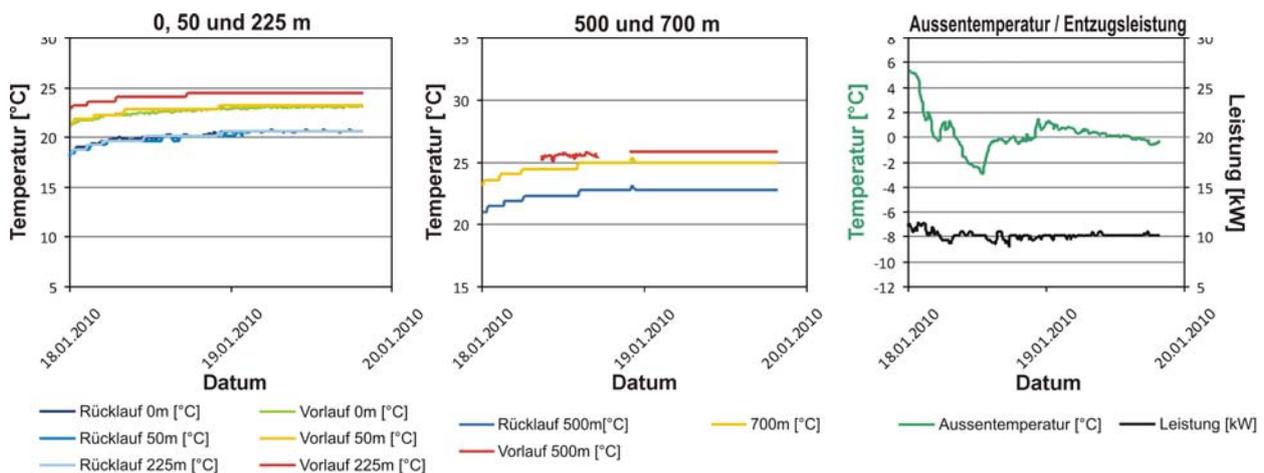


Fig. 23: Messdaten für 10 kW Leistungsentzug bei 3.5 m³/h. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Temperaturfühler „Vorlauf 500 m“ sporadisch ein Störsignal (siehe Kap. 6.2), welches nicht dargestellt wurde. Dadurch entstand ein nicht zusammenhängendes Messprofil (Darstellung „500 und 700 m“, rote Linie). Für die energetische Auswertung wurde der Zeitraum ab dem 19. Januar verwendet.

Während des Leistungszugs von 15 kW und der Durchflussmenge von 3.5 m³/h wurden ebenfalls starke Tag-/Nachtschwankungen beobachtet. Wie schon bei 5 kW Leistungszug (Fig. 22) machten sich diese Phänomene in den Vor- und Rücklaufdaten nicht bemerkbar (Fig. 24, linke und mittlere Grafik). In der betrachteten Messphase hat sich eine Temperatur von 20.5 °C am Austritt der Sonde eingestellt (ΔT zum Sondeneintritt: 5.2 K). Die mittlere Entzugsleistung betrug 14.9 kW.

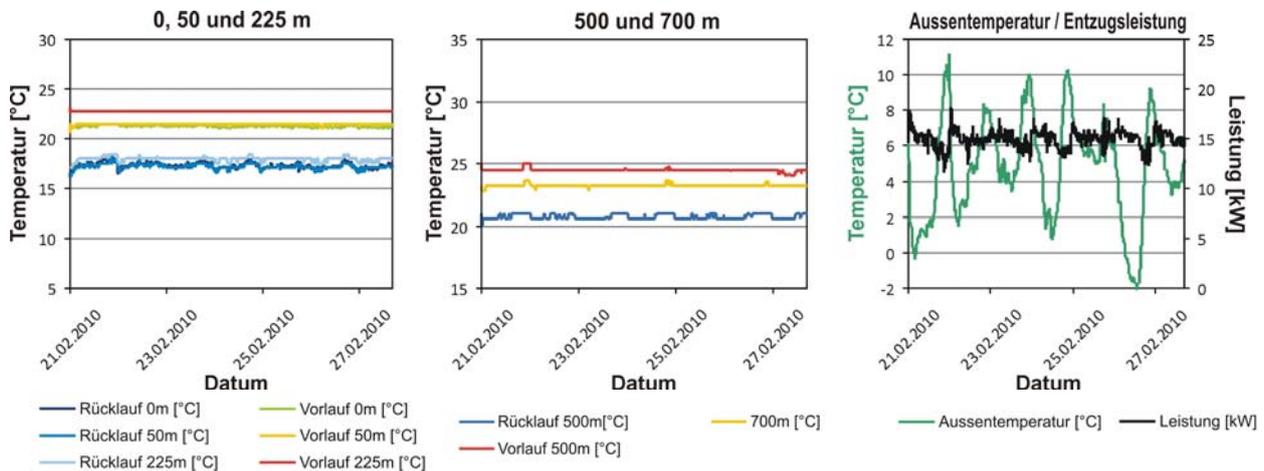


Fig. 24: Messdaten für 15 kW Leistungszug bei 3.5 m³/h.

Bei einer Entzugsleistung von 20 kW und einer Durchflussmenge von 3.5 m³/h beträgt die gemittelte Differenz zwischen Eintritt bzw. Austritt der Sonde 6.1 K. Die mittlere Austrittstemperatur (0 m) betrug dabei noch 20.1 °C, in 500 m im Vorlauf wurden 24.1 °C gemessen. Während der Messung wurde durchschnittlich eine thermische Leistung von 19.9 kW erreicht.

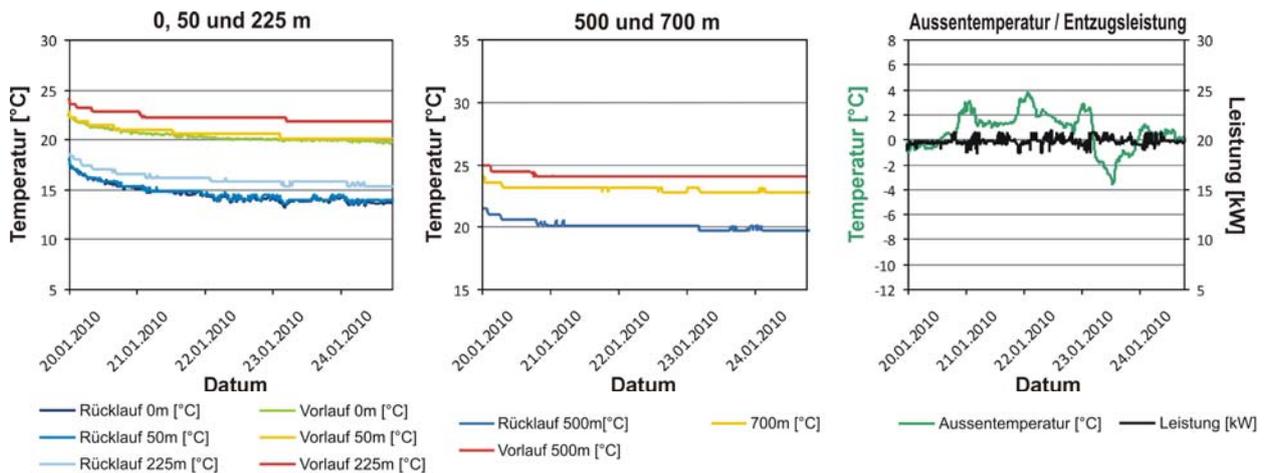


Fig. 25: Messdaten für 20 kW Leistungszug bei 3.5 m³/h.

Wird die Entzugsleistung auf 30 kW bei 3.5 m³/h erhöht, so stellt sich wiederum das gleiche Verhalten wie bei 30 kW bei 2.5 m³/h (Fig. 20) oder 20 kW bei 1.5 m³/h ein (Fig. 14) ein. Die Entzugsleistung zeigt ein reziprokes Verhalten bezüglich der Aussentemperatur. Das 3-Wege-Mischventil war zu diesem Zeitpunkt zu 100 % geöffnet; folglich zirkulierte das gesamte Wärmeträgermedium über den Luftherhizer (Beilage 3). Die Daten wurden bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

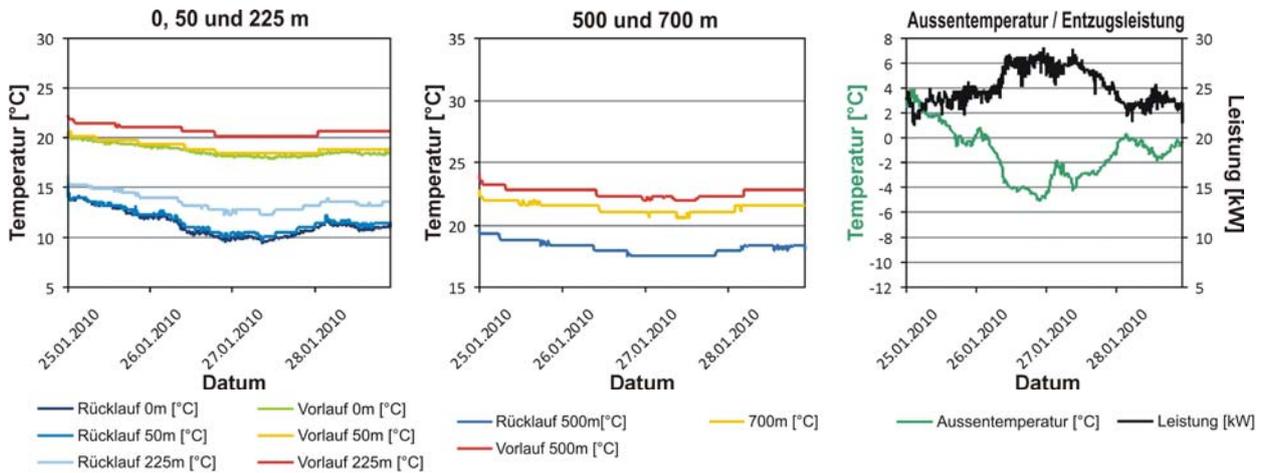


Fig. 26: Messdaten für 30 kW Leistungsentzug bei 3.5 m³/h.

10. MESSERGEBNISSE / INTERPRETATION

Für die folgenden Temperaturdiagramme wurden die in Tabelle 2 dargestellten Mittelwerte der verschiedenen Messfühler verwendet (Fig. 27, 28 und 29, jeweils linke Seite). Ergänzend wurden die Temperaturunterschiede ΔT vom Vorlauf zum Rücklauf im gleichen Temperaturniveau in den Grafiken mit berücksichtigt (Fig. 27, 28 und 29, jeweils rechte Seite). Gerade am Sondenaustritt stellt der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf einen wichtigen Indikator für die Leistungsfähigkeit des Wärmeentzugs dar. Ziel war eine mittlere Temperatur am Sondenaustritt (Vorlauf 0 m) von mindestens 20 °C oder höher.

10.1. DURCHFLUSSMENGE 1.5 m³/h

Die Auswertung der Messreihe für 1.5 m³/h ergab, dass der eingestellte mittlere Leistungsentzug bei 0, 5 und 10 kW erreicht wurde. Bei einer Entzugsleistung von 15 bzw. 20 kW stellte sich kein thermisches Gleichgewicht im hydraulischen Kreislauf ein (Fig. 13 und 14). Die erste Auswertung der eingestellten Entzugsleistung von 15 kW zeigte, dass nur eine effektive mittlere Entzugsleistung von 11.8 kW erreicht wurde (Tab. 2). Die Messergebnisse der Reihen 15 und 20 kW wurden aus diesem Grund in der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt. Zur Veranschaulichung über den Verlauf der Temperaturentwicklung wurden die Messwerte von 15 kW ergänzend im Auswertungsdiagramm (Fig. 21, gelbe Linie) eingezeichnet.

Bei einem dauerhaften Leistungsentzug von 0 bis 10 kW werden bei 1.5 m³/h am Sondenaustritt mittlere Temperaturen von 21.9 bis 23.7 °C erreicht, wobei der Temperaturunterschied zwischen Vorlauf und Rücklauf an der Oberfläche (0 m) zwischen 2.6 und 2.8 K beträgt. Demnach findet bereits bei geringem Wärmeentzug eine relativ hohe Temperaturspreizung am Sondenaustritt statt.

Gleichzeitig wurden in 700 m Tiefe *in situ*-Temperaturen um 30 °C gemessen. Im Vorlauf-Bereich von 700 bis 500 m wurde tendenziell weder Wärme verloren noch gewonnen (Fig. 27, links). Dies bedeutet, dass ein erheblicher Teil der Wärmeenergie im Vorlauf zwischen 500 und 0 m verloren geht. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit findet eine massive Wärmeumverteilung in der Sonde statt, wodurch weniger Energie für die direkte Wärmenutzung zur Verfügung steht. Unterstrichen wird dieses Ergebnis durch die Tatsache, dass bei einem Leistungsentzug von mehr als 11 kW die Temperatur am Sondenaustritt sprunghaft auf 17.3 °C fällt (Fig. 27, links). Ein kontinuierlicher Dauerentzug von 15 bzw. 20 kW ist damit nicht mehr möglich bzw. macht im Sinne einer Direktheizung keinen Sinn. Der Wärmeverlust in der Sonde ist dafür zu hoch.

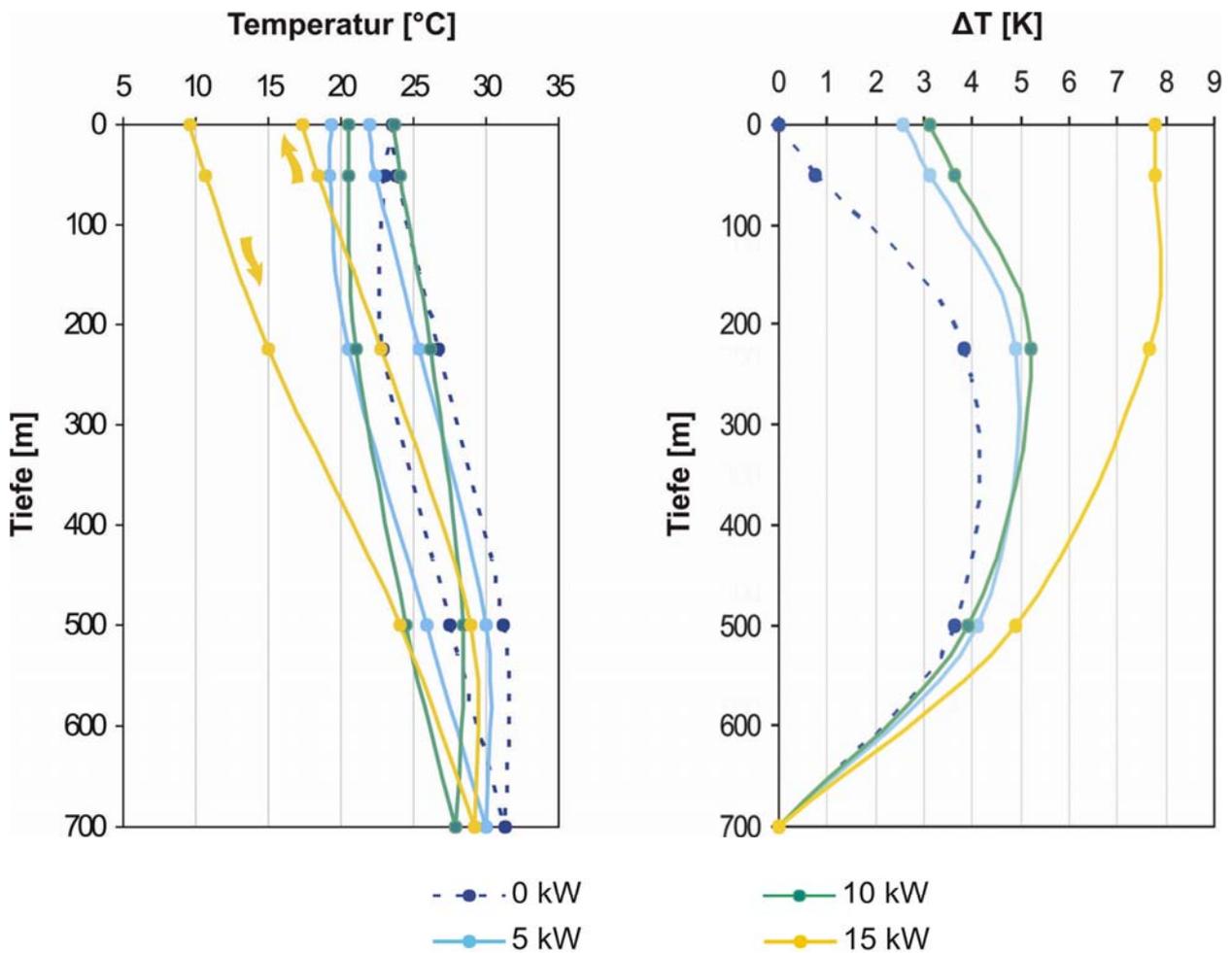


Fig. 27: Auswertung für 1.5 m³/h Durchfluss bei 0, 5, und 10 kW Entzugsleistung. Zur Illustration wurde der Graph für 15 kW (gelb) mit eingezeichnet. Während der Messphase wurden im Mittel nur 11.8 kW und nicht die eingestellten 15 kW Wärme entzogen. Auf der linken Seite werden die gemittelten Temperaturwerte bei 0, 50, 225, 500, 700 m dargestellt. Die Pfeilrichtungen geben die Vorlauf- / Rücklaufichtung des Sondenfluides an. Auf der rechten Seite sind die Temperaturunterschiede zwischen Vorlauf / Rücklauf bei den jeweiligen Tiefen grafisch dargestellt.

10.2. DURCHFLUSSMENGE 2.5 m³/h

Wird eine Durchflussmenge von 2.5 m³/h eingestellt, so verbessert sich die Leistungsfähigkeit der Tiefen-EWS gegenüber den zuvor gewählten 1.5 m³/h signifikant. Auch bei höherer Entzugsleistung verhält sich die Tiefen-Sonde relativ stabil. Allerdings führt die höhere Durchflussrate zu einer Beeinflussung zwischen Vorlauf und Rücklauf – insbesondere in Tiefen zwischen 0 und 225 m (z. B. Fig.16 und 17).

Die gemessenen Sondaaustrittstemperaturen fielen von 26.2 °C (0 kW) auf 23.6 °C (5 kW), 22.0 °C (10 kW), 20.5 °C (15 kW) und schliesslich auf 18.5 °C (20 kW). Erwähnenswert ist, dass bei einer Entzugsleistung von 15 kW bzw. 20 kW die Temperatur am Sondenfuss praktisch gleich geblieben ist (ΔT = 0.2 K; siehe Fig. 28, rechts). Allerdings ist die Temperatur am Sondaaustritt

um 2 K gefallen. Werden Austrittstemperaturen von $>20\text{ °C}$ erwartet, so wird bei einer Durchflussmenge von $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ für ein Leistungszug von 15 kW ein Optimum erreicht.

Mit steigender Entzugsleistung nehmen erwartungsgemäss die Temperaturen bei allen Temperaturmesspunkten im hydraulischen System ab. Reziprok dazu steigt der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf am Sondenein- bzw. -austritt von 0.1 K (0 kW) auf 1.7 K (5 kW), 3.4 K (10 kW), 5.2 K (15 kW) und 7.7 K (20 kW).

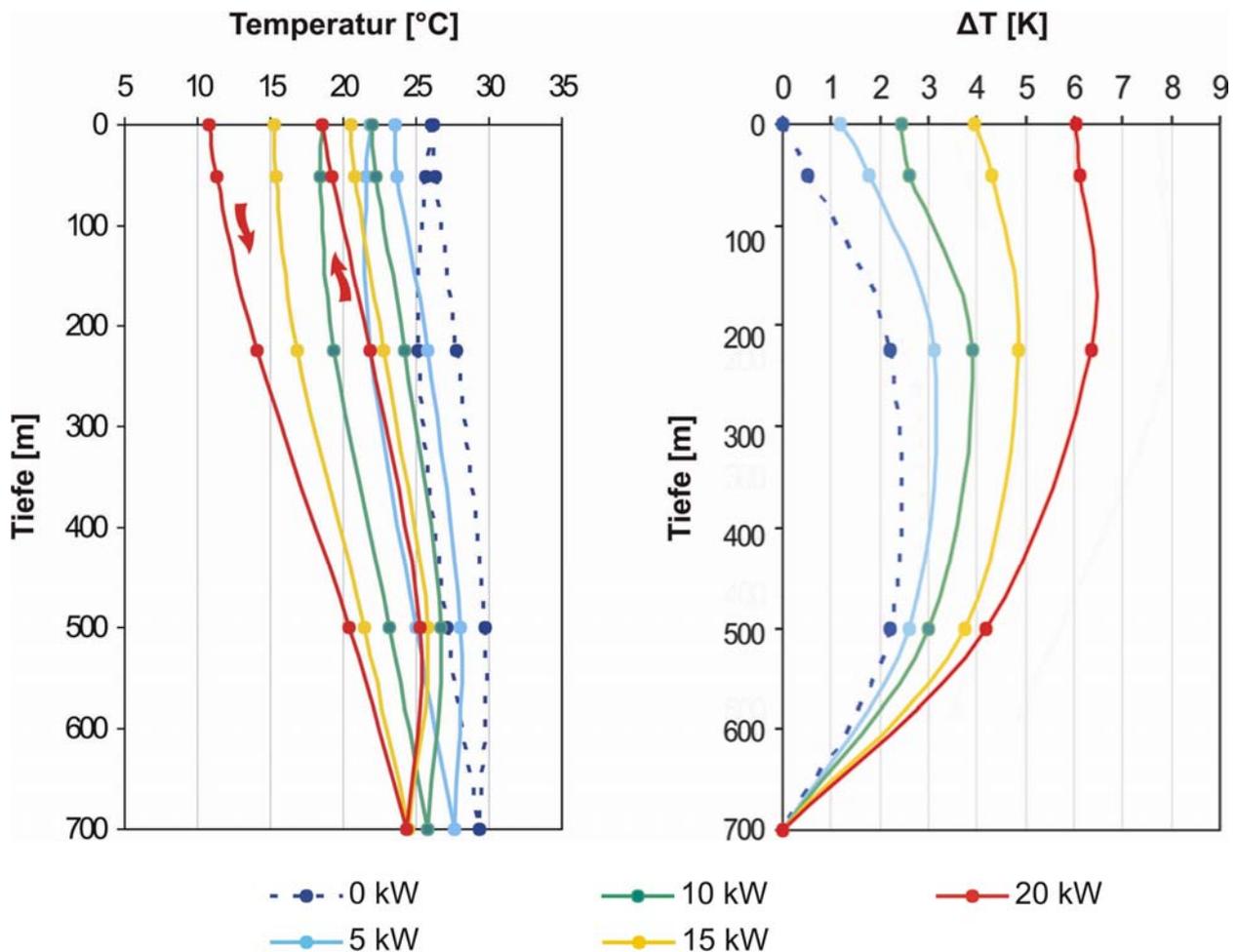


Fig. 28: Auswertung für einen Durchfluss von $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ bei 0, 5, 10, 15, 20 kW Entzugsleistung. Auf der links Seite werden die gemittelten Temperaturwerte bei 0, 50, 225, 500, 700 m dargestellt. Die Pfeilrichtungen geben die Vorlauf- / Rücklaufrichtung des Sondenfluides an. Auf der rechten Seite sind die Temperaturunterschiede zwischen Vorlauf / Rücklauf bei den jeweiligen Tiefen grafisch dargestellt.

Im Vorlauf zwischen 700 und 500 m werden erst ab einer Entzugsleistung von mehr als 10 kW Temperaturunterschiede von $>0.5\text{ K}$ erreicht, d. h. ein weiterer, signifikanter Wärmegewinn im Bereich von 700 bis 500 m (Vorlauf) war erst ab mehr als 10 kW Entzugsleistung möglich. Die höhere thermische Effizienz spiegelt sich auch in der flacheren Kurvatur der ΔT -Grafik wider (Fig. 28, links). Der flachere Kurvenverlauf hängt mit den geringeren Energieverlusten durch die Umvertei-

lung von Wärme in der Sonde bzw. im Bohrloch im Bereich von 500 bis 0 m (Vorlauf) zusammen. Als direkte Folge dieses Effektes werden höhere Sondenaustrittstemperaturen erzielt.

10.3. DURCHFLUSSMENGE 3.5 m³/h

Bei einem Durchflusswert von 3.5 m³/h änderte sich das thermische Verhalten während der jeweiligen dauerhaften Wärmeentnahme der Tiefen-EWS erneut – wenngleich nicht so stark wie bei den vorherigen Durchflussmengen. Die mittleren Sondenaustrittstemperaturen waren bei 3.5 m³/h am höchsten, gleichzeitig waren die Temperaturunterschiede in den unterschiedlichen Tiefenbereichen deutlich verringert.

Am Sondenaustritt wurden mittlere Temperaturen von 26.7 °C (0 kW), 24.8 °C (5 kW), 23.1 °C (10 kW), 21.3 °C (15 kW) und schliesslich 20.1 °C (20 kW) gemessen. Reziprok dazu steigt die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf am Sonderein- bzw. -austritt von 0.0 K (0 kW) auf 1.2 K (5 kW), 2.5 K (10 kW), 4.0 K (15 kW) und 6.1 K (20 kW). Durch die höhere Durchflussrate wurde folglich das ΔT bei den gewählten Entzugsleistungen erniedrigt. Dieser Effekt wirkt sich positiv bei der thermischen Interaktion zwischen Vor- und Rücklauf aus. Dies belegen verschiedene Messreihen mit stark schwankenden Aussentemperaturen (Fig. 24 und 25, jeweils rechte Seite). Die durch die Schwankungen der Aussentemperatur verursachten Kältespitzen im Rücklauf waren im Vorlauf nicht mehr messbar (Fig. 24 und 25, jeweils linke Seite).

Die weiter gestiegene Effizienz in der Wärmeförderung wird auch im thermischen Verhalten in der Tiefe deutlich. Im Vorlauf-Bereich zwischen 500 und 700 m werden bereits ab einer Entzugsleistung von mehr als 5 kW Temperaturunterschiede von deutlich mehr als 0.5 K erreicht. Der ermittelte Temperaturunterschied beträgt 0.4 K (0 kW), 0.9 K (5 kW), 0.8 K (10 kW), 1.3 K (15 kW) und 1.1 K (20 kW), d. h. eine signifikante Steigerung der Wärmeförderung zwischen 500 bis 700 m (Vorlauf) wird durch eine höhere Entzugsleistung begünstigt. Gegenüber 2.5 m³/h verläuft die Temperaturkurve im vorliegenden Fall flacher, was ein Indiz dafür ist, dass im Vorlauf-Bereich zwischen 500 und 0 m deutlich weniger Wärme in der Sonde bzw. im Bohrloch umverteilt wird.

Am Sondenfuss in 700 m Tiefe haben sich bei einer Entzugsleistung von 15 bzw. 20 kW wieder sehr ähnliche Temperaturen eingestellt ($\Delta T = 0.2$ K; siehe Fig. 29, links). Bei 20 kW stellt sich am Sondenfuss eine Temperatur von 23 °C ein, d. h. eine weitere Steigerung der Durchflussmenge kann zu keiner wesentlichen Temperaturerhöhung am Sondenaustritt führen. Dies bedeutet, dass bei einer Durchflussmenge von 3.5 m³/h und einer Entzugsleistung von 20 kW ein Optimum erreicht ist. Wird die Tiefen-EWS Oftringen als Direktheizung genutzt und eine Vorlauftemperatur von >20 °C gefordert, so ist die Grenze der Leistungsfähigkeit bei 20 kW (3.5 m³/h) erreicht.

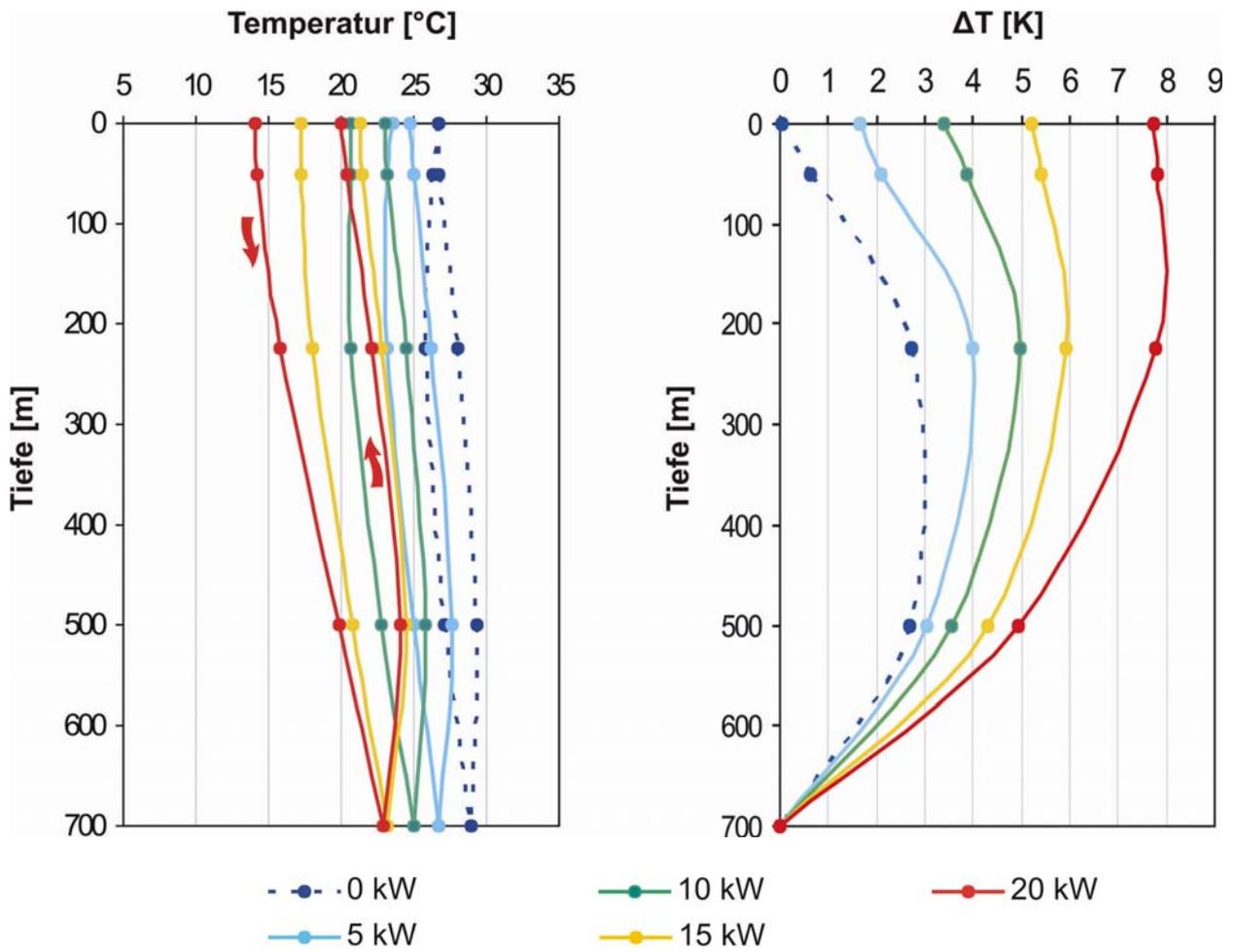


Fig. 29: Auswertung für einen Durchfluss von 3.5 m³/h bei 0, 5, 10, 15, 20 kW Entzugsleistung. Auf der linken Seite werden die gemittelten Temperaturwerte bei 0, 50, 225, 500, 700 m dargestellt. Die Pfeilrichtungen geben die Vorlauf- / Rücklaufrichtung des Sondenfluides an. Auf der rechten Seite sind die Temperaturunterschiede zwischen Vorlauf / Rücklauf bei den jeweiligen Tiefen grafisch dargestellt.

11. ENERGIEBILANZEN

Für die Erstellung der spezifischen Entzugsleistung in definierten Tiefenabschnitten, Wärmebilanzen bzw. für die erste Abschätzung des thermischen Wirkungsgrades der Pilotanlage zu einem bestimmten Betriebspunkt müssen vorgängig verschiedene Kenngrössen bestimmt werden.

11.1. GRUNDLAGEN

Die Pilotanlage Tiefen-EWS Oftringen hat drei wesentliche Verbraucher für elektrische Energie: die Solekreispumpe (SKP), den Lufterhitzer und die SPS-Steuerung. Der Lufterhitzer simuliert die Gebäudeheizung, die SPS-Steuerung dient ausschliesslich der Datenerfassung und Speicherung sowie der Steuerung der gesamten Anlagen. Damit entfällt der Stromverbrauch dieser beiden Verbraucher für eine Energiebilanzbetrachtung bei Direktheizung. Eine SKP muss jedoch auch bei der Direktheizung eingesetzt werden. Von der Wärmeverteilungsseite kommt dann noch der Energieverbrauch weiterer Kreiselpumpen hinzu (wird hier nicht betrachtet). Der Energieverbrauch der Solekreispumpe ist folglich für weitere Anlagen relevant. Für die Tiefen-EWS Oftringen wurde eine SKP von Grundfos (Hochdruck-Kreiselpumpe CR 5-7) installiert. Vor der Inbetriebnahme wurde für die Durchflussmengen 1.5, 2.5 und 3.5 m³/h der jeweilige Stromverbrauch bestimmt und ein Messprotokoll erstellt (Beilage 9).

Beim eingesetzten Arbeitsträgermedium handelt es sich um ein Ethylenglykol-Wasser-Gemisch (20/80, XT-COOLANT von Midland). Anhand der Produktangaben vom Hersteller (Strub + Co. AG, Produkt Havoline AFC) wurden wesentliche Kenngrössen wie die Dichte (δ) bei 20 °C und spezifische Wärmekapazität (c) für das bei der Pilotanlage eingesetzte Arbeitsträgermedium ermittelt:

$$[\delta_{20/80 \text{ Glykol/Wasser}}] = 1.022 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{bei } 20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$[c_{20\% \text{ Glykol}}] = 3.99 \text{ kJ/kgK}$$

Die in einer Stunde durch die Pumpe geförderte Masse wird mit der Formel:

$$m = \delta \cdot V \quad \text{Gleichung 1}$$

bestimmt. Die spezifische Entzugsleistung (betrachteter Zeitraum 1 Stunde) für einen definierten Tiefenabschnitt (z. B. 0 bis 50 m, 500 bis 700 m) berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$P = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t_{\text{Laufzeit}}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Der thermische Wirkungsgrad wird anhand der Leistungszahl bzw. der COP (Coefficient of performance) für einen bestimmten Betriebspunkt der Pilotanlage angegeben.

$$COP = \varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{Wärmeleistung}}}{P_{\text{el. Leistung}}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Der COP gibt das Verhältnis der von der Pilotanlage abgegebenen Wärmeleistung ($\dot{Q}_{\text{Wärmeleistung}}$) zur aufgenommenen elektrischen Antriebsleistung der SKP ($P_{\text{el. Leistung}}$) an. Je höher die Leistungszahl ist, desto effizienter arbeitet die Anlage, da dann für die gleiche Wärmeleistung weniger elektrische Antriebsleistung notwendig ist. Der COP-Wert ist von der Quelltemperatur, der Durchflussmenge und den Wärmeträgermedien (Wasser, Wasser-Glykol-Gemisch etc.) abhängig. Folglich ist die Leistungszahl an jedem Betriebspunkt unterschiedlich.

11.2. VERLUSTE UND FEHLER

Die Pilotanlage Tiefen-EWS Oftringen hat – wie jede andere Anlage auch – spezifische, teilweise bauartbedingte Energieverluste. Die detaillierte Bestimmung der einzelnen Punkte, an denen Energie umverteilt oder verloren geht, ist noch nicht Thema der vorliegenden Studie. Einzelne Verluste (z. B. Rohrreibungsverluste, Umverteilung von Energie in der Sonde) wurden bereits quantifiziert bzw. in der Gesamtbilanz berücksichtigt.

Daneben gibt es andere Verluste, die von Anlage zu Anlage verschieden sein können. Dazu zählt beispielsweise die Wegstrecke zwischen Sondenaustritt bei 0 m und der Verbindungsstrecke zum Sondenverteiler im Gebäude. Bereits frühere Forschungsprojekte haben gezeigt, dass nicht isolierte EWS-Leitungen zu signifikanten Wärmeverlusten führen können (z. B. EBERHARD & Partner, 2003, 2004, 2005). Bei der Tiefen-EWS Oftringen wurden diese Verluste bislang nicht näher quantifiziert (Beilagen 10 bis 18). Die höhere Leistungsfähigkeit sowie das höhere Temperaturniveau des Wärmeträgermediums führen jedoch zu deutlichen Energieverlusten. So wurde bei der Tiefen-EWS Oftringen das Rohrstück zwischen dem Sondenaustritt im Kanalschacht und dem etwa 10 m entfernten Gebäude nicht isoliert. Zusätzlich verlaufen die Rohrleitungen sehr oberflächennah, wodurch das umgebende Erdreich so stark aufgewärmt wurde, dass an den ersten warmen Frühlingstagen der Schnee zuerst um den Kanalschacht und entlang der Rohrleitungen geschmolzen ist (Fig. 30).

Derartige Verluste lassen sich durch tiefer verlegte Rohrleitungen sowie durch eine einfache Wärmeisolierung relativ einfach vermeiden. Gerade bei Tiefen-EWS wird relativ warmes Wärmeträgermedium transportiert, wodurch die



Fig. 30: Wärmeverlust durch nicht isoliertes und oberflächennah verlegtes Rohrstück zwischen Sondenaustritt (Kanalschacht) und Gebäude.

Energieverluste gegenüber konventionellen Sonden deutlich höher sein können. Dies gilt für Anlagen mit dauerhaftem Leistungsentzug im Sinne einer Direktheizung aber auch für Anlagen welche Wärme mit Hilfe einer Wärmepumpe gewinnen.

Bei der Berechnung der spezifischen Entzugsleistung mussten Vereinfachungen durchgeführt werden. So kann die Dichte des Ethylenglykol-Wasser-Gemisches relativ leicht bestimmt bzw. berechnet werden. Allerdings bezieht sie sich immer auf 20 °C, wodurch sich zwangsläufig gewisse Ungenauigkeiten ergeben. Ein Wert für die spezifische Wärmekapazität c für eine Mischung aus 20 % Ethylenglykol und 80 % Wasser lag ebenfalls nicht vor. Spezifische Wärmekapazitäten liegen für andere Mischungsverhältnisse vor, wodurch der c -Wert relativ einfach berechnet werden konnte. Der daraus resultierende Fehler in der Gesamtbetrachtung ist für alle Berechnungen gleich und fällt gegenüber anderen Fehlerquellen nicht ins Gewicht. Eine grosse Fehlerquelle kann die eingestellte Zirkulationsrate sein. Diese kann bei einem falsch eingestellten hydraulischen Kreislauf oder verschmutzten Schmutzfängern schnell mehr als 10 % Abweichung zwischen der theoretisch berechneten und praktisch entzogenen Entzugsleistung ausmachen. Aus diesem Grunde wurden die Siebe und die eingestellten und tatsächlichen Durchflussmengen sehr genau kontrolliert und protokolliert.

11.3. WÄRMEUMVERTEILUNG DURCH ZIRKULATION (OHNE ENTZUGSLEISTUNG)

Für die Bestimmung der Wärmeumverteilung im Bohrloch wurde relativ viel Messzeit (nach der Winterperiode 2009/2010) verwendet. Die in Figur 31 dargestellten durchschnittlichen Temperaturwerte umfassen eine Messperiode von 207 h (1.5 m³/h), 293 h (2.5 m³/h) und 183 h (3.5 m³/h). Die mit Gleichung 2 berechneten spezifischen Entzugsleistungen beziehen sich jeweils auf einen Tiefenabschnitt vorlaufseitig (z. B. VL 0-50 m) oder rücklaufseitig (z. B. RL 50-0 m).

Mit der Steigerung des Durchflusses wird gleichzeitig die Sondenaustrittstemperatur stetig erhöht, die Wärmeleistung steigt somit mit zunehmendem Volumenstrom an. Eine Steigerung des Durchflusses führt vor allem zu einer vermehrten Entzugsleistung zwischen 700 und 500 m (Fig. 31, $P_{RL700-500}$) sowie einer Verringerung des Wärmeverlustes zwischen 500 und 225 m (Vorlauf, Fig. 31, rote Zahlenwerte). Eine weitere unmittelbare Folge der Temperaturerhöhung des Wärmeträgermediums ist der Wärmeverlust zwischen 0 und 225 m (Rücklauf, Fig. 31, blaue Zahlenwerte). Der Wärmeverlust resultiert aus den relativ kühlen Umgebungstemperaturen zwischen 0 und 225 m Tiefe.

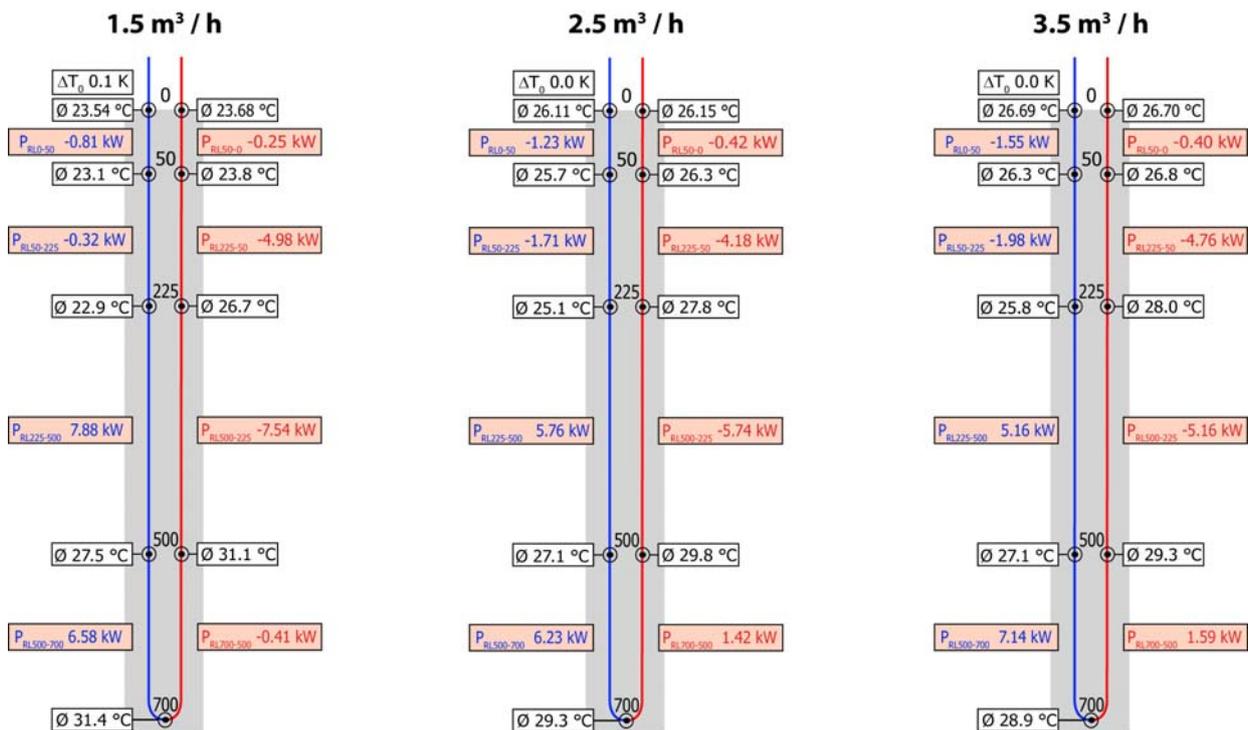


Fig. 31: Anlagenzustand bei 1.5, 2.5 und 3.5 m³/h Durchflussrate und 0 kW Entzugsleistung durch den Verbraucher (Lufterhitzer). Für den jeweiligen Durchfluss werden die mittleren Temperaturen und die berechneten spezifischen Entzugsleistungen für die Tiefenbereiche 0 bis 50 m, 50 bis 225 m, 225-500 m und 500 bis 700 m Tiefe in blau (Rücklauf) und rot (Vorlauf) dargestellt.

11.4. UNTERSCHIEDLICHE DURCHFLÜSSE UND ENTZUGSLEISTUNGEN

Die Temperatur am Sondenaustritt ist einer der Kernparameter für eine Erdwärmeheizung. Diese Temperatur hängt massgeblich von den eingestellten Durchflüssen und den jeweiligen Entzugsleistungen ab. Insbesondere die Durchflussrate ist von grosser Bedeutung. Bei zu niedrigen Pump-raten wird sehr viel Wärme im Bohrloch umverteilt; gleichzeitig fällt die Temperatur am Sondenaustritt (Fig. 31, 1.5 m³/h).

Daneben muss je nach Durchflussrate eine unterschiedliche Menge an elektrischer Energie für die Wärmegewinnung aufgewendet werden. Die für die Kreislaufpumpe notwendige elektrische Energie schlägt sich unmittelbar auf den COP nieder – insbesondere bei einem dauerhaften Leistungs-entzug ohne Wärmepumpe, da in diesem Falle die Pumpe der wesentliche Stromverbraucher ist. Der im Rahmen dieser Studie ermittelte COP-Wert variiert je nach Durchflussmenge und Entzugsleistung zwischen 7.8 und 32.8 (Beilagen 10 bis 18).

Wird nur wenig Wärme aus dem Arbeitsträgermedium entzogen (z. B. 5 kW, Beilagen 10, 11, 15), so erhöht sich zwar die Temperatur am Sondenaustritt mit steigender Durchflussrate, gleichzeitig wird zusätzliche Energie für die Solekreispumpe benötigt, wodurch der COP von 9.2 (1.5 m³/h) auf 8.5 (2.5 m³/h) und weiter auf 7.8 (3.5 m³/h) sinkt. Zu geringe Entzugsleistungen führen zu einer deutlichen Erniedrigung der Effizienz der gesamten Anlage.

Höhere dauerhafte Entzugsleistungen führen zu grösseren Temperaturdifferenzen und senken gleichzeitig die mittlere Temperatur des gesamten Wärmekreislaufs. Der höhere Energieentzug führt zu sehr guten COP-Werten von bis zu 32.8 (2.5 m³/h, 20 kW Entzugsleistung, Beilage 14) bzw. 31.1 (3.5 m³/h, 20 kW Entzugsleistung, Beilage 18). Sondenaustrittstemperaturen von >20 °C werden allerdings nur bei 3.5 m³/h, 20 kW erreicht.

11.5. TEMPERATURENTWICKLUNG NACH DER HEIZPHASE 2009/2010

Nach Abschluss der Heizphase wurden die *in situ*-Temperaturen in der Tiefen-EWS weiter beobachtet und dokumentiert. Nachdem die Anlage am 21. Mai 2010 abgestellt wurde, hätten sich eigentlich nach und nach die ursprünglichen Gebirgstemperaturen einstellen sollen. Dies war aber nicht der Fall. Die Temperaturen in 700 m Tiefe stiegen bis etwa 37 °C an. Auch die Vorlauf- / Rücklauftemperaturen bei den unterschiedlichen Temperaturniveaus waren nicht mehr gleich. Zu diesem Zeitpunkt waren die beiden Kugelhähne links vom Sondenverteiler geschlossen (Beilage 4, links unten). Erst als die vier Kugelhähne vor dem Sondenverteiler geschlossen wurden, stellten sich gleiche Vorlauf- / Rücklauftemperaturen bei 0, 50, 225 und 500 m ein. In 700 m Tiefe begannen die Temperaturen wieder auf über 40 °C zu steigen. Durch temperaturbedingte Dichteunterschiede hat sich in der Tiefen-EWS ein Zirkulationsstrom entwickelt, welcher permanent und unkontrolliert Wärme in der Sonde umverteilt hat. Diese natürliche Entwicklung einer Art „Schwerkraftheizung“ verzögert die Regeneration der Erdwärmesonde und sollte darum auch bei anderen Anlagen vermieden werden.

In der Heizphase 2009 / 2010 wurden insgesamt 34'410 kWh Wärme entzogen. Nach dem Abschalten der Solekreispumpe und dem Schliessen der Kugelhähne am Sondenverteiler wurden die Temperaturen in der Tiefen-EWS weiter aufgezeichnet. Am Sondenaustritt bei 0 m war erwartungsgemäss ein deutlicher saisonaler Einfluss messbar (Fig. 32). Je nach Tiefenbereich vergingen mehrere Wochen, bis sich wieder annähernd natürliche Wärmeverhältnisse in der Sonde eingestellt haben (vgl. Beilage 2). Musste in 50 m Tiefe etwa 8 bis 9 Wochen gewartet werden, so war es in 225 m Tiefe nur etwa 1 bis 2 Wochen (Fig. 32). Am längsten dauerte die Regeneration in den tieferen Bereichen. In 500 bzw. 700 m Tiefe vergingen 15 bis 20 Wochen, bis in etwa die gleichen Gebirgstemperaturen erreicht wurden (Fig. 33)

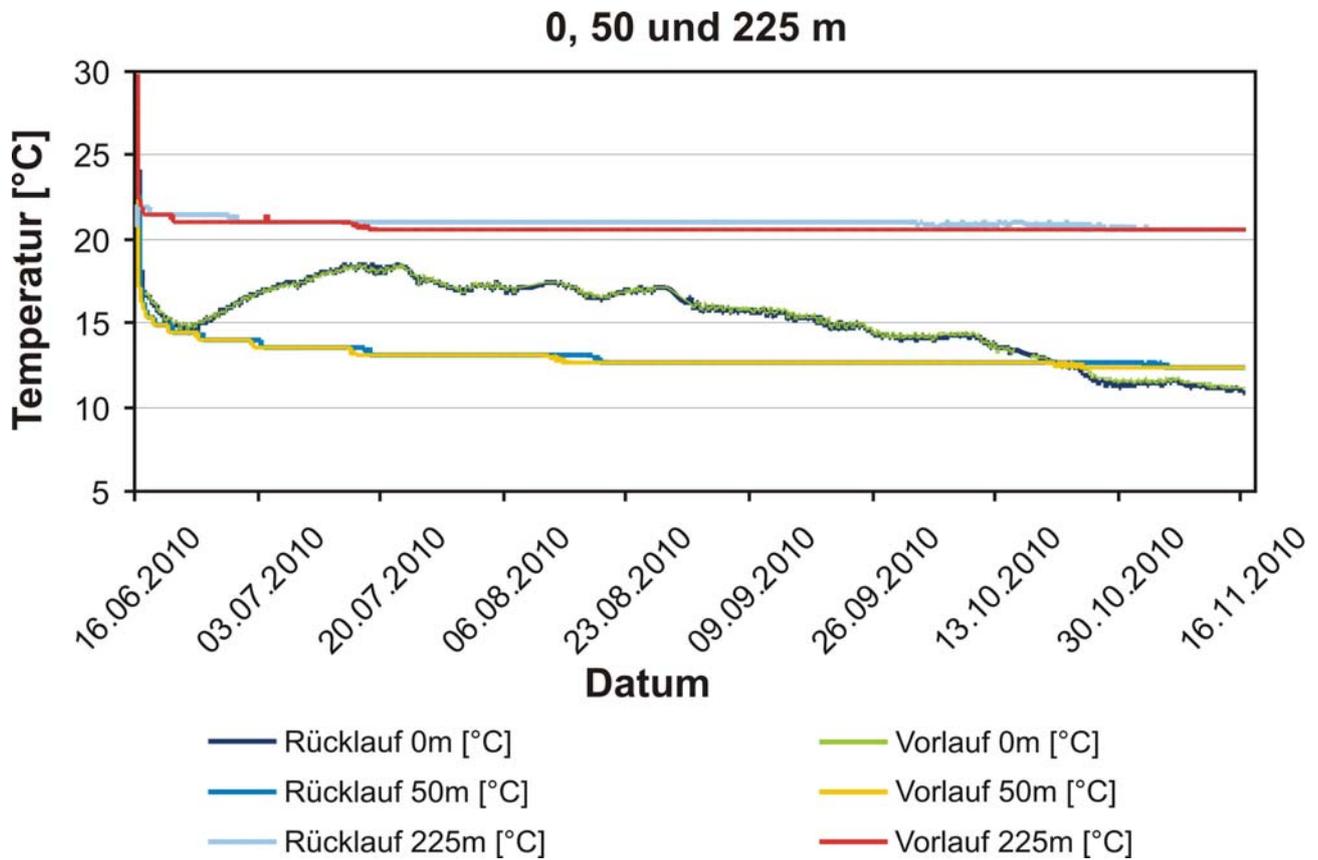


Fig. 32: Temperaturentwicklung nach der Heizphase 2009 / 2010 in 0, 50 und 225 m. Am Sondenaustritt (Rücklauf bzw. Vorlauf 0 m) wurde der saisonale Temperatureinfluss mit erfasst.

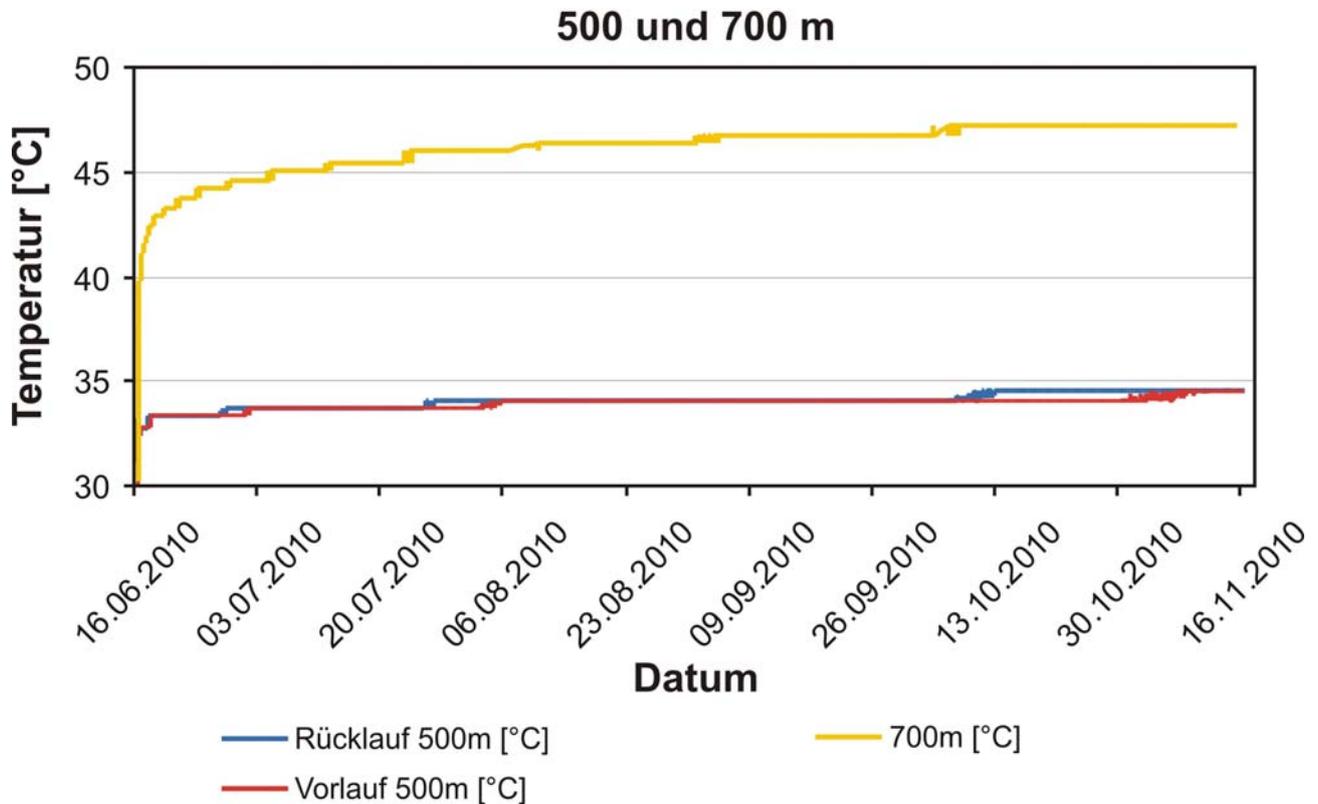


Fig. 33: Temperaturentwicklung nach der Heizphase 2009 / 2010 in 500 und 700 m.

12. FAZIT

Die mögliche Nutzung einer Tiefen-EWS als Wärmequelle für eine Direktheizung macht vor allem dort Sinn, wo Wärmeanomalien bzw. erhöhte Wärmeflüsse im Untergrund vorhanden sind. Erhöhte Wärmeflüsse wurden in der Nordschweiz bislang im Bereich von Oftringen – Schinznach Bad – Koblenz gemessen (Fig. 34).

Bei genügend hohen Sondenaustrittstemperaturen könnte eine Tiefen-EWS im Sinne einer Direktheizung genutzt werden. Allerdings benötigen bislang selbst moderne Flächenheizungssysteme Vorlauftemperaturen von etwa 25 - 30 °C. Diese Temperaturen wurden in Oftringen selbst bei 0 kW Leistungszug – also im reinen Kurzschlussbetrieb über den Kreislauf 1 (siehe Beilage 3) – nicht erreicht. Sollen unter den gegebenen Bedingungen höhere Sondenaustrittstemperaturen erzielt werden, so sind schon bei der Erstellung der Tiefen-EWS vorgängig weitere Massnahmen notwendig (z. B. Isolation des Vorlaufs bis auf etwa 200 m, allenfalls kombiniert mit einer zusätzlichen Vertiefung der Bohrung).

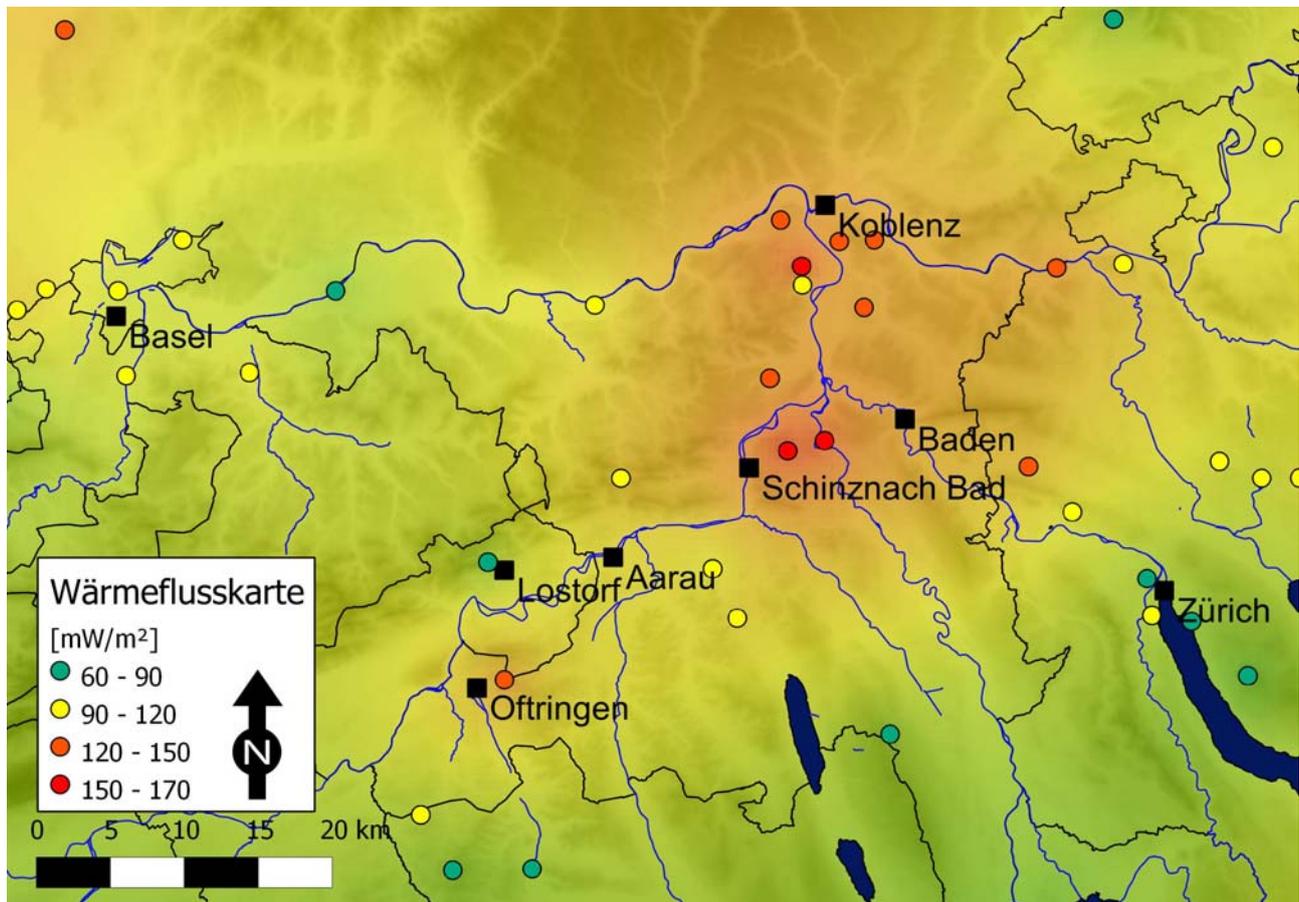


Fig. 34: Wärmeflusskarte der Region Oftringen – Aarau – Schinznach Bad – Koblenz. Die Wärmeanomalie in dieser Region macht nicht nur geothermische Kraftwerke sondern auch die Realisierung von tiefen Erdwärmesonden potentiell interessant. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Wärmeflussdichten in mW/m² (Medici & Rybach, 1995; Schärli & Rybach, 2002; Wagner et al., 2008, ergänzt durch eigene Daten).

Die energetische Auswertung der Tiefen-EWS Oftringen hat die Bereiche der Wärmegewinnung bzw. die Zonen der Wärmeverluste durch Umverteilung in der Sonde beleuchtet. Tabelle 3 zeigt die tendenzielle Zunahme der Effizienzsteigerung durch die sukzessive Steigerung der Entzugsleistung. Ein erstes Optimum ist für eine Entzugsleistung von 15 kW und 2.5 m³/h Durchflussmenge erreicht. Dieses wird durch die nächst folgenden Entzugsleistungen bzw. Durchflüsse von 20 kW und 2.5 bzw. 3.5 m³/h noch verbessert. Die Energieverluste durch Wärmeumverteilung sind bei einer Entzugsleistung von 5 bzw. 10 kW besonders hoch.

Leistungsentzug, theoretisch [kW]		0			5			10			15			20		
Leistungsentzug, gemessen [kW]		0.0	0.0	0.0	5.0	5.0	5.0	-	10.0	10.2	-	14.6	14.9	-	19.3	19.9
Durchflussmenge [m ³ /h]		1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5	1.5	2.5	3.5
auf 1 m ³ /h normierte spez. Entzugsleistung [kW]	P _{RL0-50}	-0.5	-0.5	-0.4	-0.1	-0.3	-0.4	-	-0.2	0.0	-	0.2	-0.1	-	0.7	0.2
	P _{RL50-225}	-0.2	-0.7	-0.6	1.4	0.2	-0.1	-	1.0	0.0	-	1.7	0.9	-	3.1	1.7
	P _{RL225-500}	5.3	2.3	1.5	6.1	3.6	2.1	-	4.4	2.5	-	5.2	3.2	-	7.1	4.7
	P _{RL500-700}	4.4	2.5	2.0	4.7	3.0	1.9	-	3.0	2.5	-	3.4	2.8	-	4.5	3.4
	P _{VL700-500}	-0.3	0.6	0.5	0.0	0.5	1.0	-	1.0	0.9	-	1.5	1.5	-	1.1	1.3
	P _{VL500-225}	-5.0	-2.3	-1.5	-5.2	-2.5	-1.5	-	-2.8	-1.5	-	-3.4	-1.9	-	-3.9	-2.3
	P _{VL225-50}	-3.3	-1.7	-1.5	-3.4	-2.4	-1.4	-	-2.2	-1.5	-	-2.3	-1.5	-	-3.0	-2.0
	P _{VL50-0}	-0.2	-0.2	-0.1	-0.5	-0.1	-0.3	-	-0.4	-0.2	-	-0.4	-0.3	-	-0.7	-0.3

Tab. 3: In der Tabelle werden die spezifischen Entzugsleistungen normiert für 1 m³/h Durchfluss dargestellt. In rot sind die Bereiche des Energiegewinns, in blau Sondenabschnitte mit Wärmeverlust dargestellt.

Die bisherigen Daten haben aufgezeigt, dass mit den entsprechenden Durchflussmengen und Entzugsleistungen eine Direktheizung mit einer rund 700 m langen Tiefensonde in ausgewählten Zonen der Schweiz durchaus Sinn macht. Unter den Voraussetzungen, wie sie in der Tiefensonde in Oftringen vorliegen (keine Isolation der Sonde vom Sondenaustritt bis zum Haus und keine Isolation der Sonde bis in tiefere Bereiche), können zurzeit Austrittstemperaturen von über 20 °C erreicht werden. Diese Vorlauftemperaturen ermöglichen eine Direktheizung von Gewächshäusern, Lagerhallen, stark isolierten Häusern oder Gebäuden deren Fremdwärme durch Büromaschinen wie z. B. Computer, Kopierer etc. relativ hoch ist. Die Anlage könnte durch gezielte Isolation des Vorlaufs bis in Tiefenbereiche von 200 m allenfalls kombiniert mit einer noch grösseren Tiefe der Sonde noch wesentlich verbessert werden, so dass auch „normale“ Gebäude hierdurch beheizt werden könnten.

Eine andere Betrachtungsweise ist der Einsatz einer Wärmepumpe, welche das Temperaturniveau auf konventionelle Vorlauftemperaturen von 25 bis 30 °C anhebt. Hierdurch kann die Entzugsleistung der Sonde wesentlich erhöht und grössere Gebäudekomplexe beheizt werden. Die bei einer Direktversorgung vorliegenden sehr hohen COP-Werte würden dadurch natürlich wieder sinken. Das Einsatzgebiet, der Verwendungszweck der Sonde bzw. das Kosten-Nutzen-Verhältnis muss schlussendlich darüber entscheiden, welchen Weg man mit der geplanten Anlage geht.

GRUNDLAGEN / LITERATUR

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007). Projektsteckbrief: Geothermie-Projekt Prenzlau. Leipziger Institut für Energie GmbH, Leipzig.
- EBERHARD & Partner AG (2003). Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage, Otelfingen ZH. Projekt-Nr. 30'603, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Energie, Bern.
- EBERHARD & Partner AG (2004). Isolation von Erdwärmesonden – Zusammenstellung von bisherigen Erfahrungen. Projekt-Nr. 100'465, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Energie, Bern.
- EBERHARD & Partner AG (2005). Erdwärmesondenfeld Aarau – Heizen und Kühlen („Free-Cooling“) eines grossen Bürogebäudes mit teilweise wärmeisolierten Erdwärmesonden. Projekt-Nr. 44'128, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Energie, Bern.
- EBERHARD & Partner AG (2009a). Überwachung von Wärmeförderung von Tiefensonden, Phase 1: Tiefensonde in Oftringen (719 m) bei variierenden Durchflussraten und Entzugsleistungen. Forschungsantrag beim Bundesamt für Energie, Bern.
- EBERHARD & Partner AG (2009b). Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer über den Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz- und Kühlanlage in Aarau (Zwischenbericht). Projekt-Nr.: 102'461, Forschungsauftrag für das Bundesamt für Energie, Bern.
- EBERHARD & Partner AG (2010). Tiefen-EWS Oftringen: Sanierung einer 706 m tiefen 40-mm-2-Kreis PE-Erdwärmesonde – abgelöste Kalkablagerungen verursachten einen sukzessiven Verschluss der Pilotanlage. Projekt-Nr.: SI/500'521 Forschungs- und Sanierungsauftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.
- Frieg, B. (2009). Geological, hydrogeological and thermal conditions of a 706 m deep borehole for geothermal use (EWS). Talk, Crege General Assembly.
- Huber, A. (2005). Erdwärmesonden für Direktheizung, Phase 1: Modellbildung und Simulation. Energieforschung, Projekt 100'0001, Bundesamt für Energie, Bern.
- Kohl, T., Brenni, R., Eugster, W. J. (2002). System performance of a deep borehole heat exchanger, *Geothermics* 31, 687-708.
- Kohl, T., Salton, M., Rybach, L (2000). Data analysis of the deep borehole heat exchanger plant of Weissbad (Switzerland). In: *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000*, 3459-3464.
- Medici, F., Rybach, L. (1995). Geothermal Map of Switzerland 1995 (Heat Flow Density), *Matériaux pour la Géologie de la Suisse, Géophysique* Nr. 30. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- NZZ (2010). Mit Erdwärmesonde heizen - Das Geothermieprojekt im Triemli liefert Energie aus einer Tiefe von 2708 Metern. *Neue Züricher Zeitung* vom 15. Juli 2010, Zürich.
- Rognon, F., Schelker, C. (2010). Ein Gebäude – eine Bohrung. *GÉOTHERMIE.CH* 49, 22-23.
- Schärli, U. & Kohl, T. (2002). Erstellung einer aktuellen Karte des Temperaturgradienten und des Wärmeflusses der Nordschweiz. Unpubl. Nagra Interner Ber. Nagra, Wettingen.
- Schwendener, P. (2010). Bohren – komme was wolle. *Berner Zeitung* vom 21. Juni 2010, Bern.

Wagner, R., Kohl, T., Rohner, E. (2008). Tiefe Erdwärmesonde NOK Unterwerk Oftringen. Nagra Arbeitsbericht (unveröffentlicht), 45 Seiten + Beilagen.
Wetzel, H., Stutzke, R. (1999). Geothermie – Prenzlau (Deutschland). Energie-Cités 1999, http://www.energy-cities.eu/db/prenzlau_139_de.pdf.

ANHANG

Beilagen

Projektleitung: Dr. Oliver Sachs

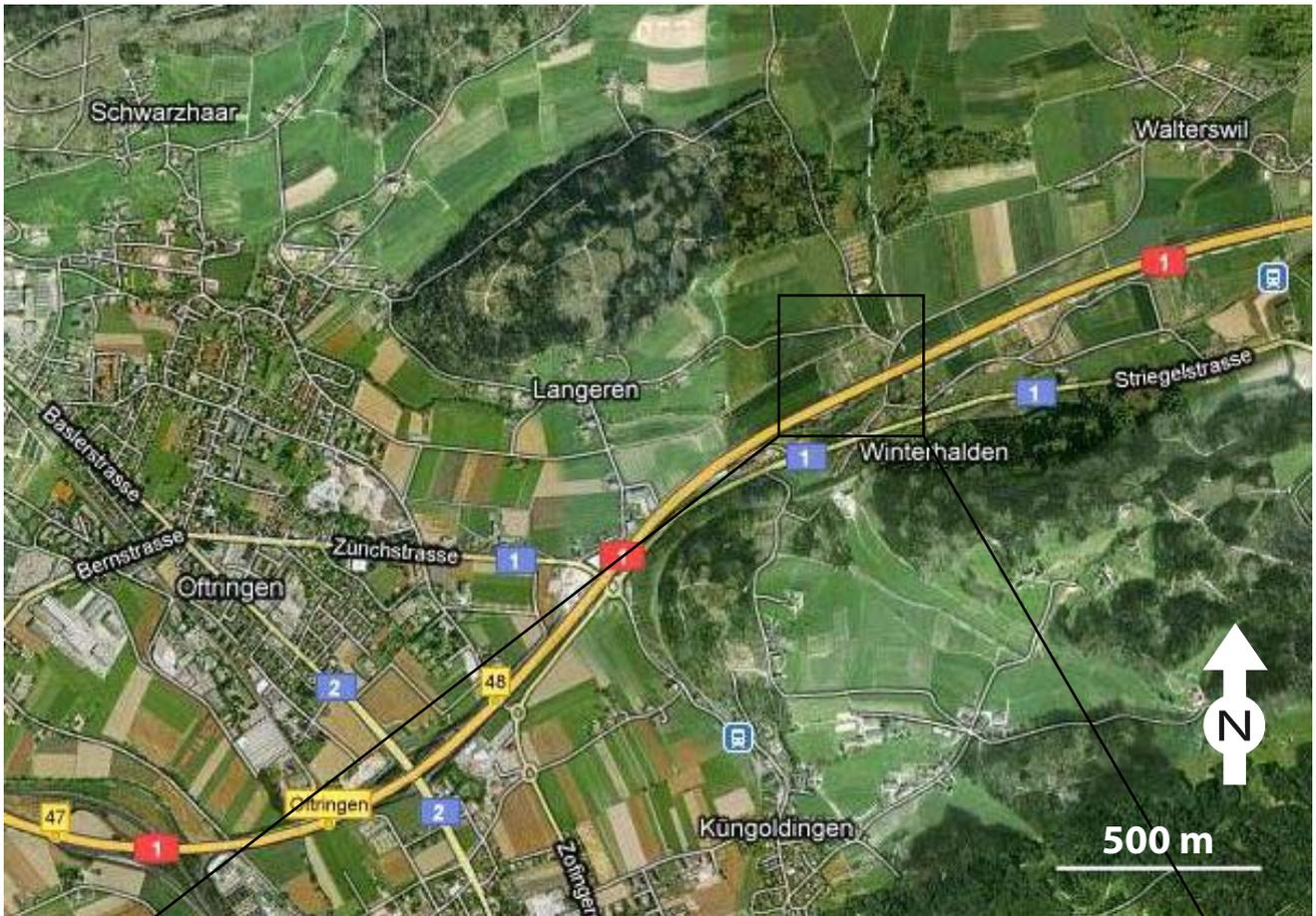
Aarau, 15. November 2010

EBERHARD & Partner AG
Geologie • Energie • Umwelt

BEILAGEN

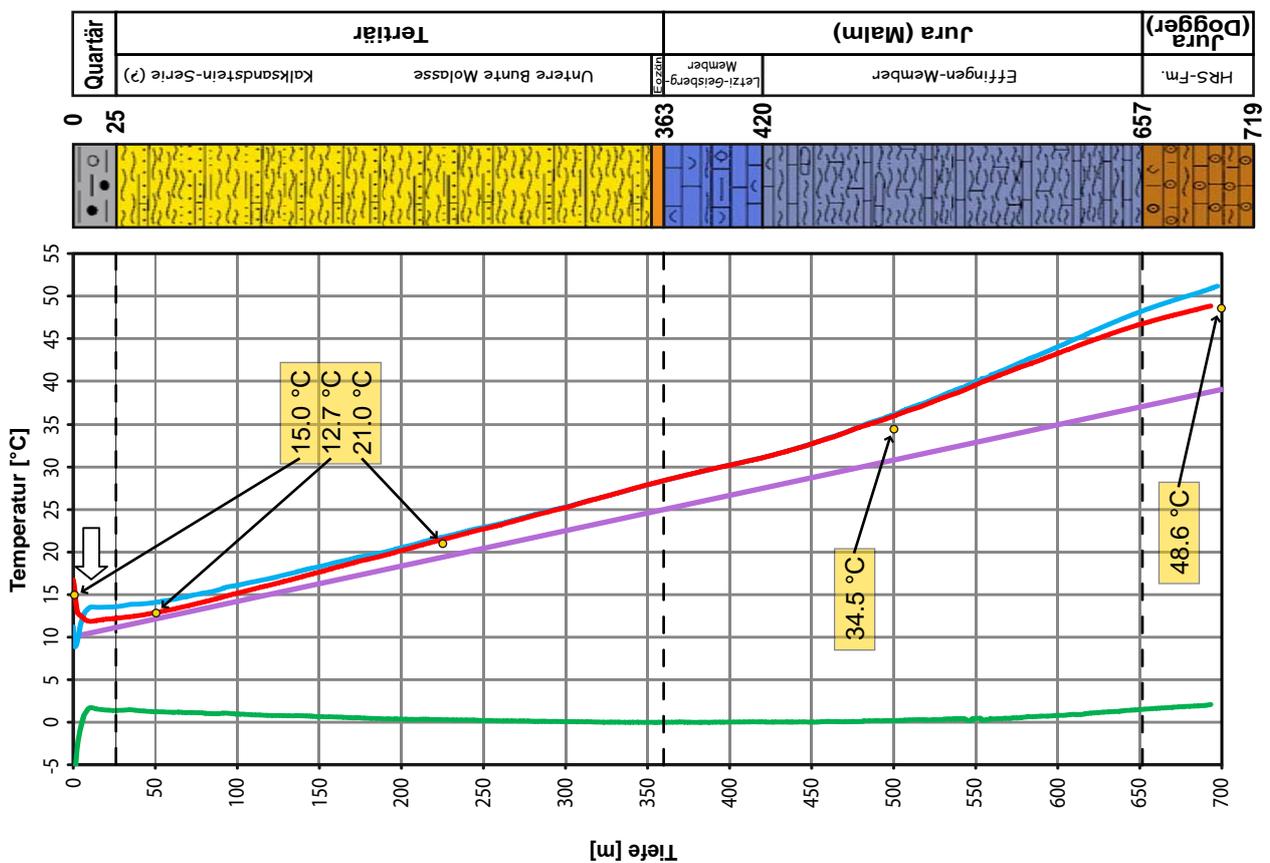
- 1 Standort der Tiefen-EWS von Oftringen
- 2 Gesteinstemperaturen mit stratigrafischer Abfolge und Kennzahlen
- 3 Schaltbild der Tiefen-EWS Pilotanlage auf dem Gelände des Axpo-Unterwerks in Oftringen
- 4 Installation der Temperaturfühler
- 5 Installation der Pilot- und Forschungsanlage
- 6 Überblick über die wichtigsten Baugruppen im Schaltschrank
- 7 Die realisierte Pilotanlage „Tiefen-EWS Oftringen“ am 16. Dezember 2009
- 8 Online-Steuerung der Pilotanlage
- 9 Messprotokoll (Stromaufnahme Sondenkreispumpe etc.)
- 10 Temperatur- und Wärmebilanz bei 1.5 m³/h und 5 kW Entzugsleistung
- 11 Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 5 kW Entzugsleistung
- 12 Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 10 kW Entzugsleistung
- 13 Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 15 kW Entzugsleistung
- 14 Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 20 kW Entzugsleistung
- 15 Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 5 kW Entzugsleistung
- 16 Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 10 kW Entzugsleistung
- 17 Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 15 kW Entzugsleistung
- 18 Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 20 kW Entzugsleistung

Standort der Tiefen-EWS von Oftringen (Satellitendaten: Google maps)



Gesteinstemperaturen mit stratigrafischer Abfolge und Kennzahlen der Tiefen-EWS Oftringen

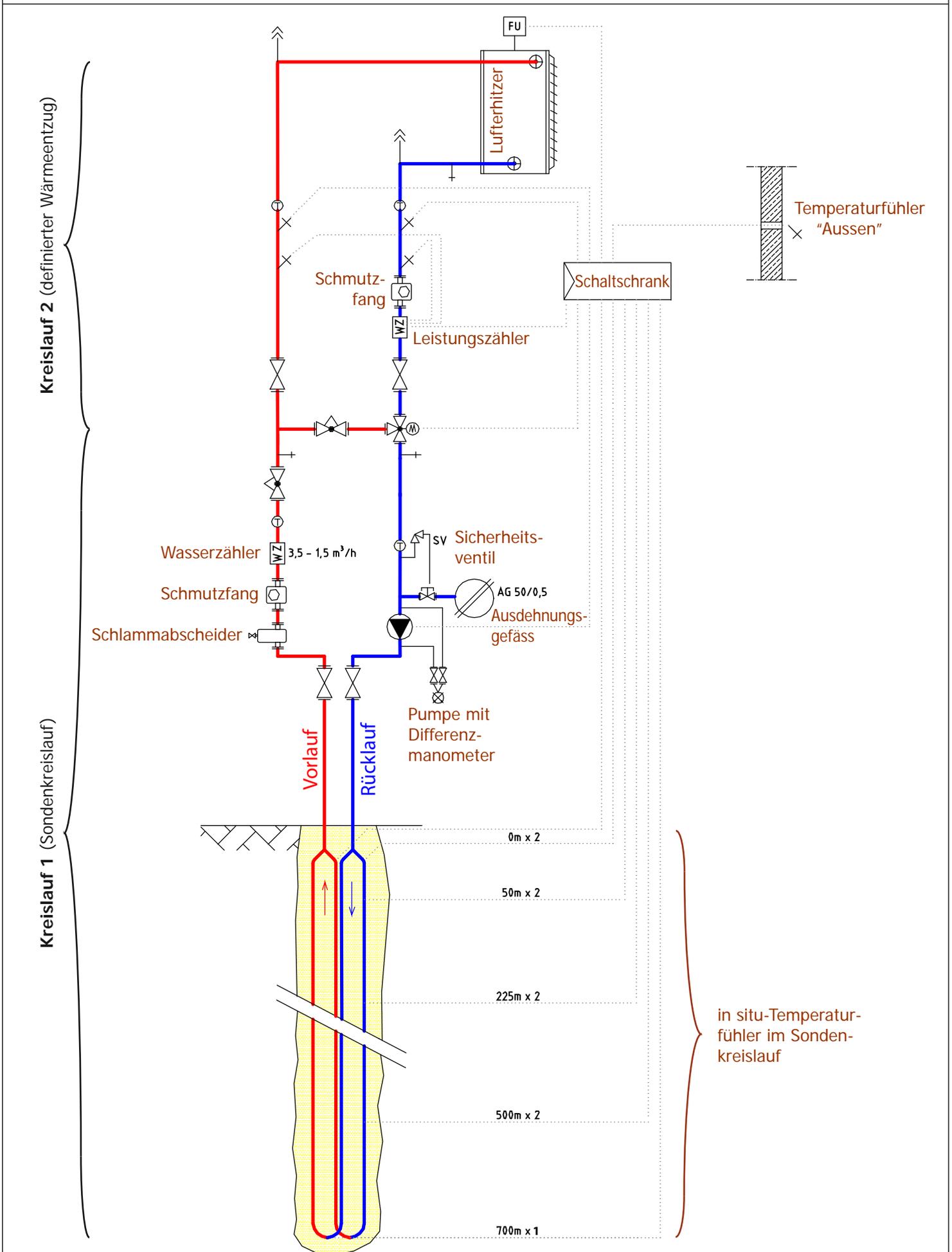
- ↙ Saisonal beeinflusster - Temperaturbereich
- Referenztemperatur 11.02.2008 [°C], max. Temp. 51.2 °C, 697 m Endtiefe, N=934
- Referenztemperatur 17.11.2009 [°C], max. Temp. 48.9 °C, 694 m Endtiefe, N=1639
- Differenz der beiden Referenzmessungen 2008 und 2009 [°C]
- Prognostiziertes Temperatur-Tiefenprofil für Tiefen-EWS Oftringen
- *in situ*-Temperaturfühler [°C] (15.12.2009: 0, 50, 225, 500, 700 m)



Bohrtiefe	719 m
Bohrdurchmesser	8 ½" bis 5 ¾"
Sondenlänge	706 m
Sondentyp	Doppel-U-Sonde
Rohr	Polyethylen
Rohrdurchmesser	40 mm
Rohr-Wandstärke	4 mm
Auffüllmaterial	ThermoCem
Transportflüssigkeit (Forschungsprojekt)	Wasser und 20 % Ethylenglykol
Durchflussmenge (Forschungsprojekt)	1'500 l/h bis 3'500 l/h



Schaltbild der Tiefen-EWS Pilotanlage auf dem Gelände des Axpo-Unterwerks in Oftringen



Installation der Temperaturfühler



Einbringen des 700 m langen Temperaturfühlers

Zustand nach der Installation aller tiefen Temperaturfühler
(2 x 50, 2 x 225, 2 x 500, 1 x 700 m)



Durchführung der Messkabel durch den Sondenkanal. Auf dem Foto ist die verwendete EWS (GESER-S.I.C.U.R.) gut zu sehen.

Durchführung der Messkabel am Sondenkopf der Tiefen-EWS in Oftringen



Installation der Pilot- und Forschungsanlage



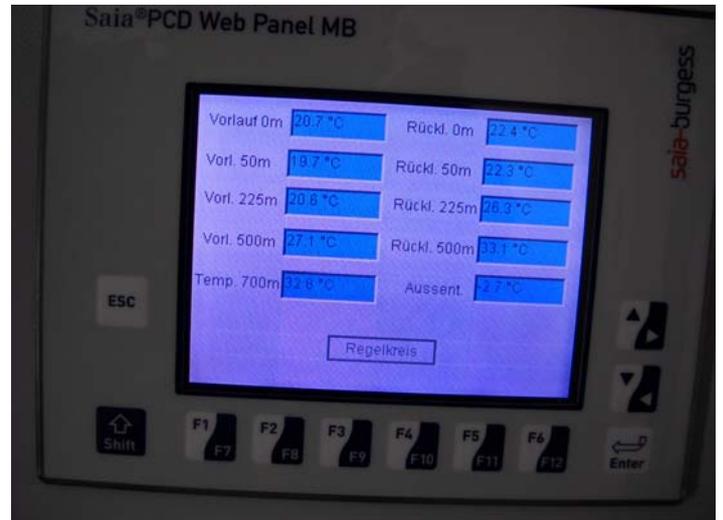
Die Pilotanlage nach dem ersten Tag der Installationsarbeiten



Ein Lufterhitzer mit frequenzabhängiger Motorsteuerung dient dem kontrollierten Leistungszug der Sonde



Einjustieren der Mess- und Regeltechnik



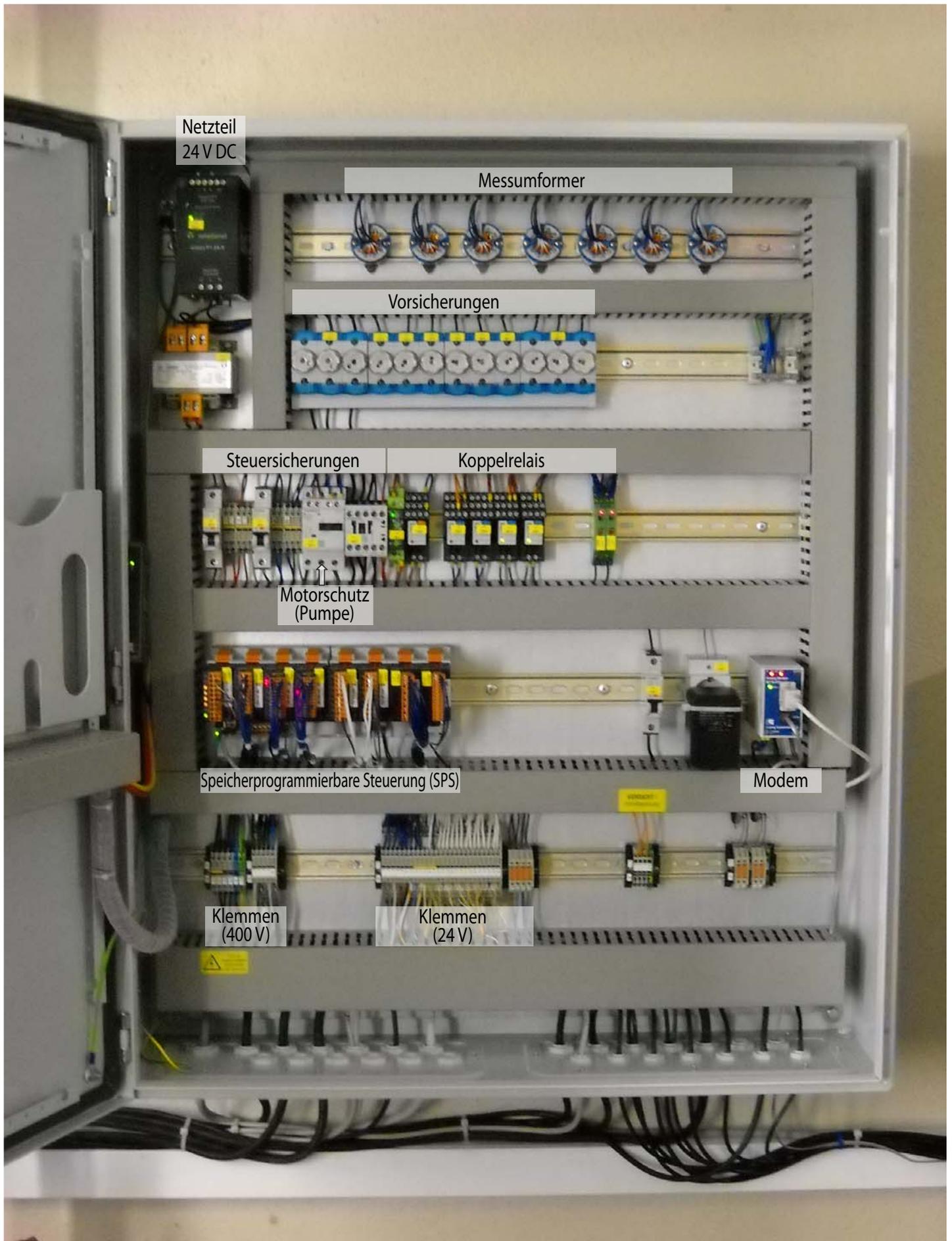
Ein Web Panel gibt auch ohne angeschlossenen Laptop einen genauen Überblick über den Zustand der Sonde.



Am Abend des 15. Dez. 2009 ging die Pilotanlage „Tiefen-EWS Oftringen“ für das wissenschaftliche Messprogramm in Betrieb. Noch am Morgen des 16. Dez. 2009 wurden die Isolationsarbeiten an den Leitungen abgeschlossen.



Überblick über die wichtigsten Baugruppen im Schaltschrank



Die realisierte Pilotanlage "Tiefen-EWS Oftringen" am 16. Dezember 2009



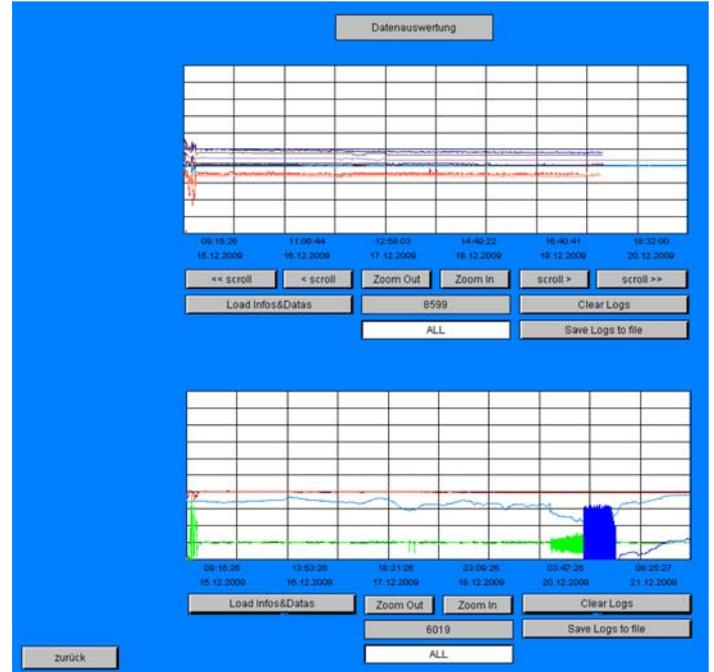
A 1305b
10.10.2010

Temperaturen und Wärmeförderung der Tiefen-EWS
in Oftringen (Kanton Aargau, Schweiz)

EBERHARD & Partner AG
Geologie · Energie · Umwelt

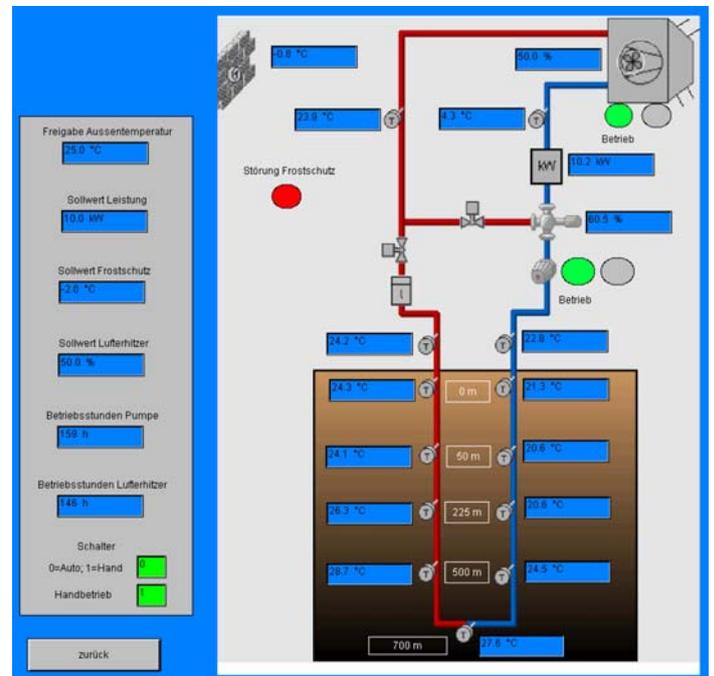
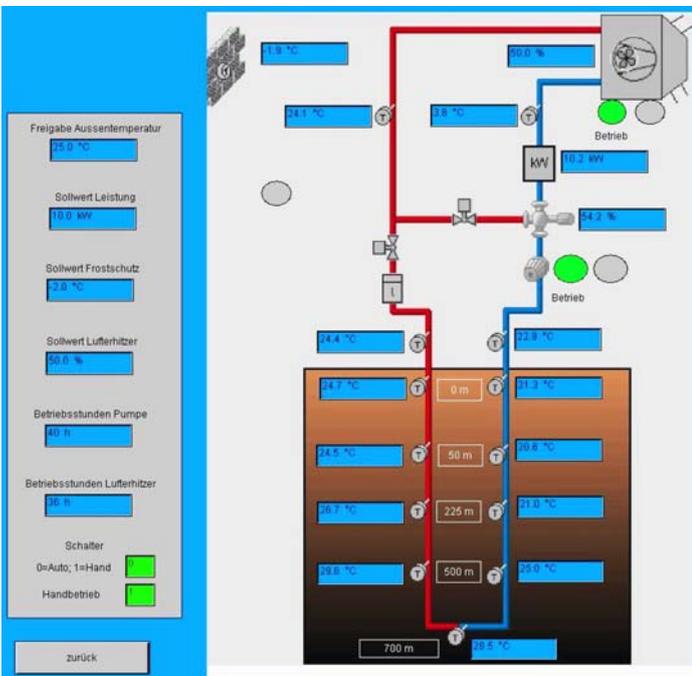


Online-Steuerung der Pilotanlage "Tiefen-EWS Oftringen"



Startseite der online-Steuerung. Durch einen weiteren Mausklick gelangt man beispielsweise zur Übersicht „Tiefenmessung“ oder „Datenauswertung“.

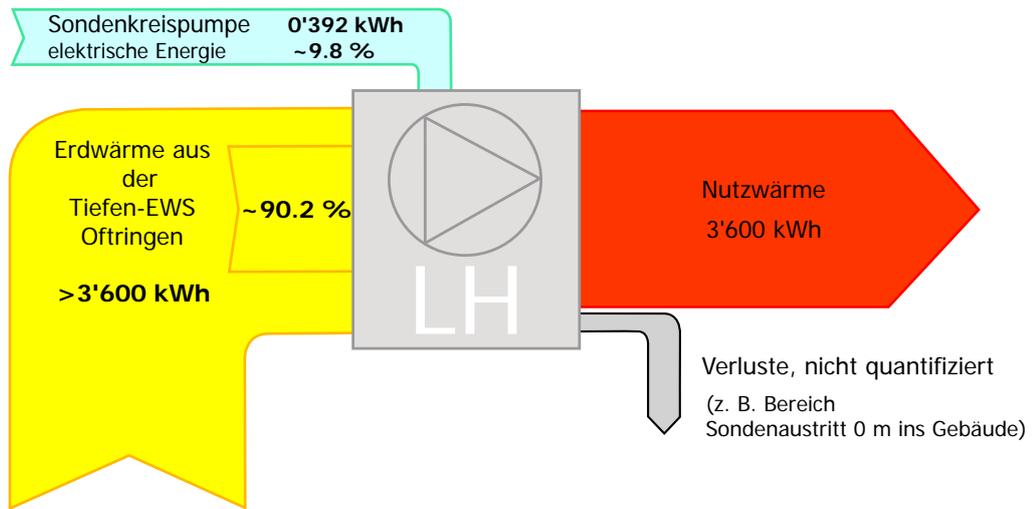
Datenauswertung: Hier wird ein erster Überblick über die gemessenen Daten gegeben. Daneben können die Daten auf den (Arbeitsplatz-)Rechner gespeichert werden.



Tiefenmessung: Diese Grafik gibt einen Überblick über den aktuellen Zustand der Anlage. Neben den Temperaturen werden die eingestellten Parameter und Laufzeiten gezeigt. Ferner kann die Betriebsart (Hand- oder Automatikbetrieb) eingestellt werden.

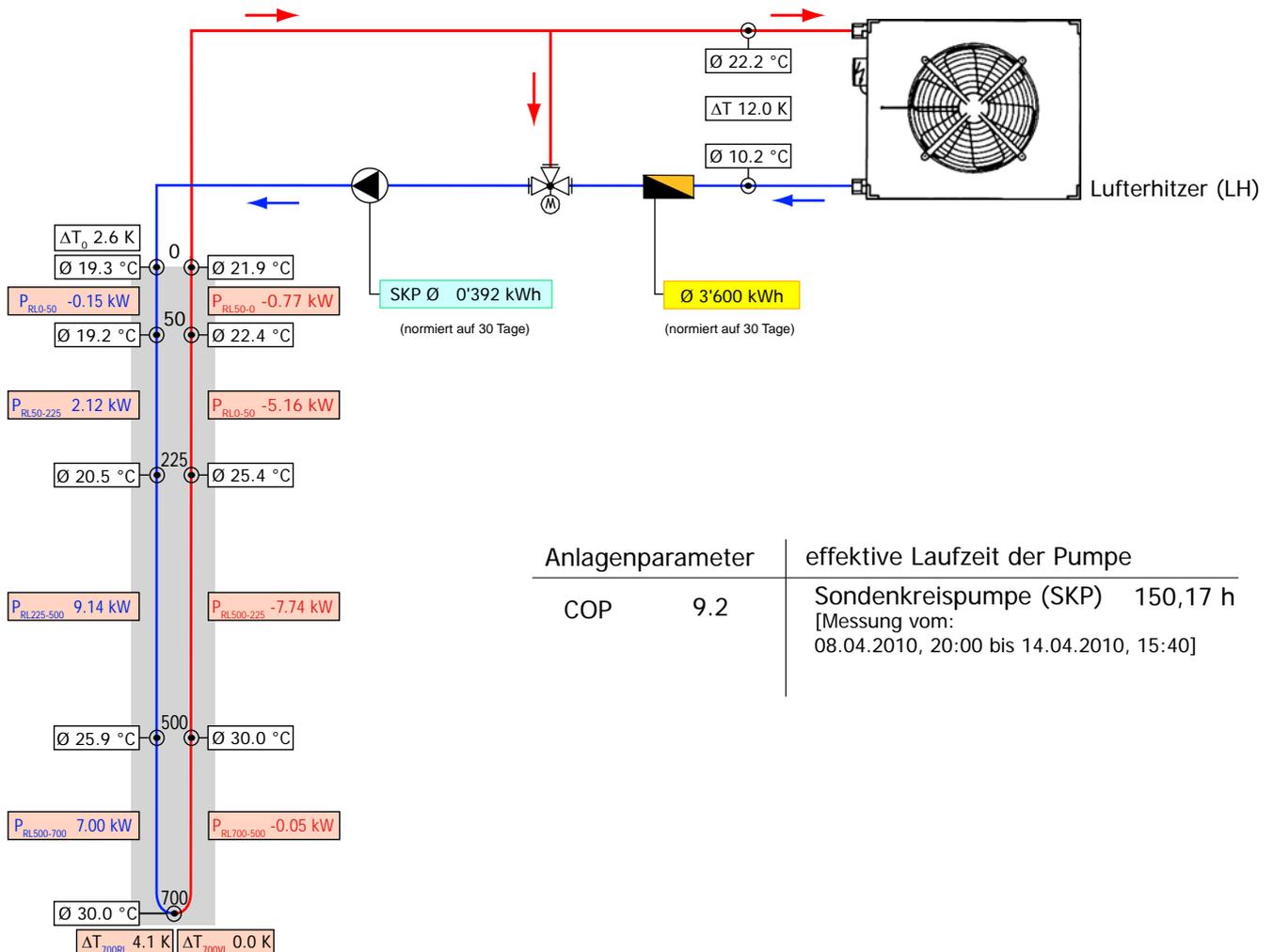
Ebenso zeigt diese Ebene Störungsmeldungen (hier: Frostschutz). Sollte der Luftheizer oder die Pumpe ausfallen, so wird dies durch einen roten Punkt angezeigt. Durch Klicken auf den Reset-Button (Startseite) kann die Anlage online entsperren werden.

Temperatur- und Wärmebilanz bei 1.5 m³/h und 5 kW Entzugsleistung

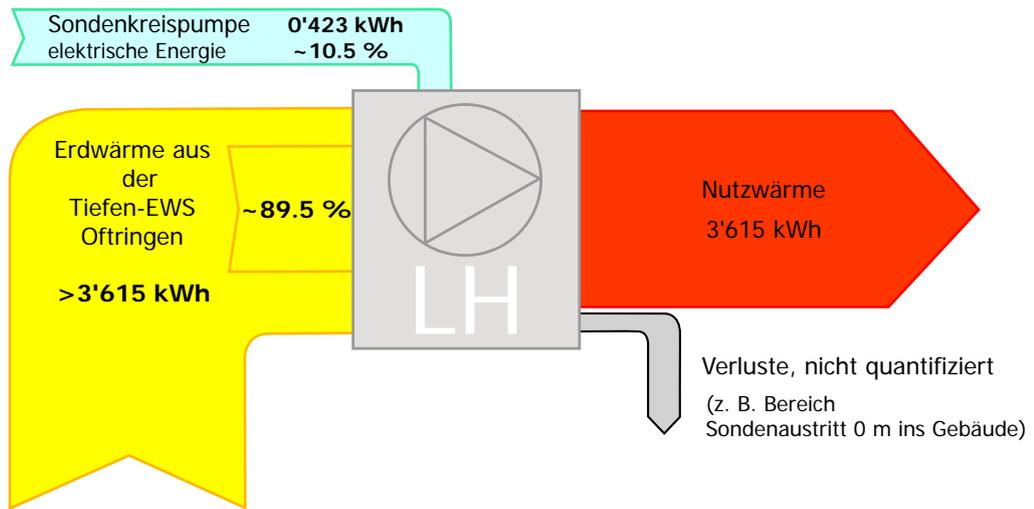


Aussentemperatur

Ø	8.1 °C
MIN	0.3 °C
MAX	18.1 °C

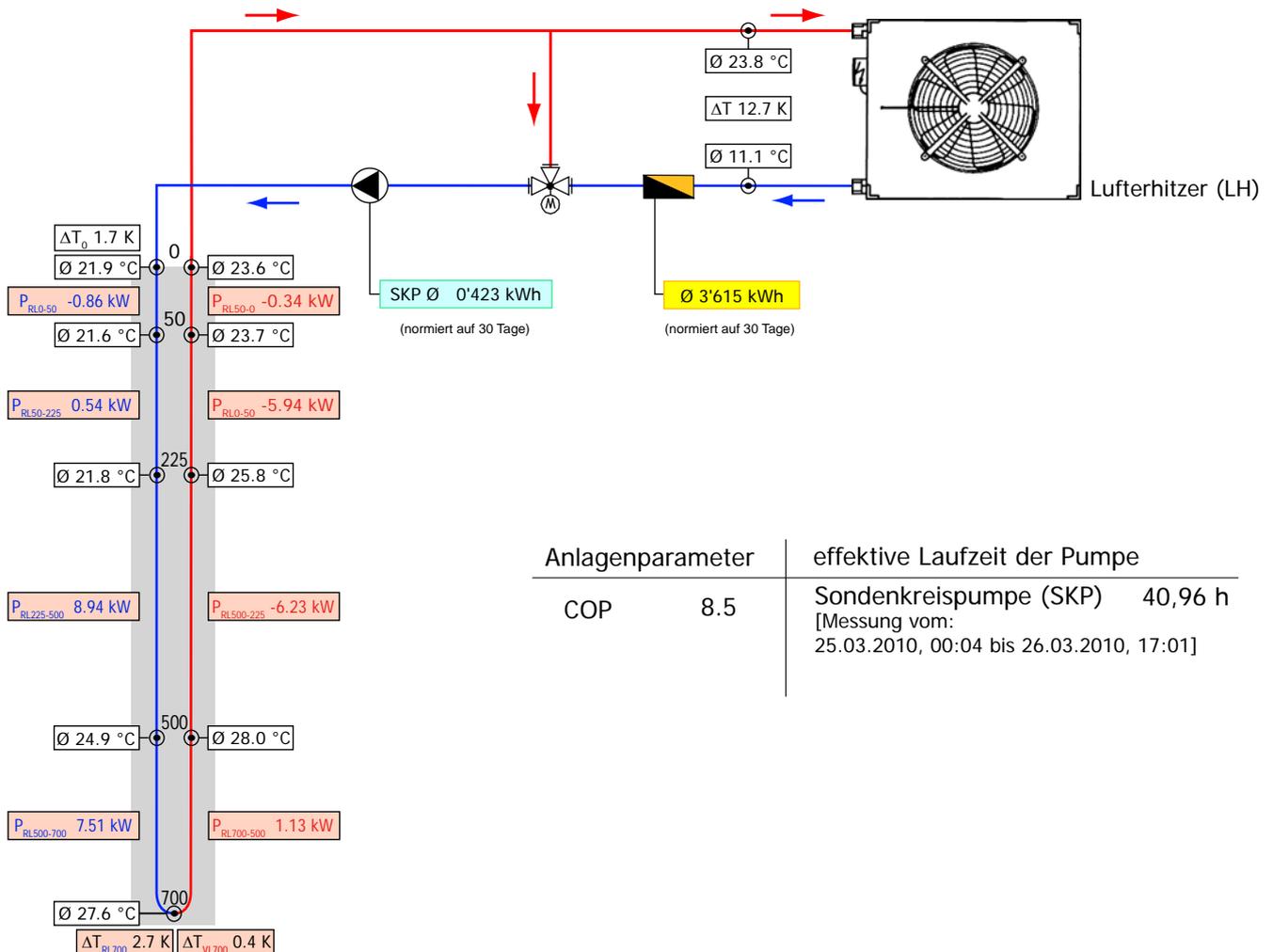


Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 5 kW Entzugsleistung

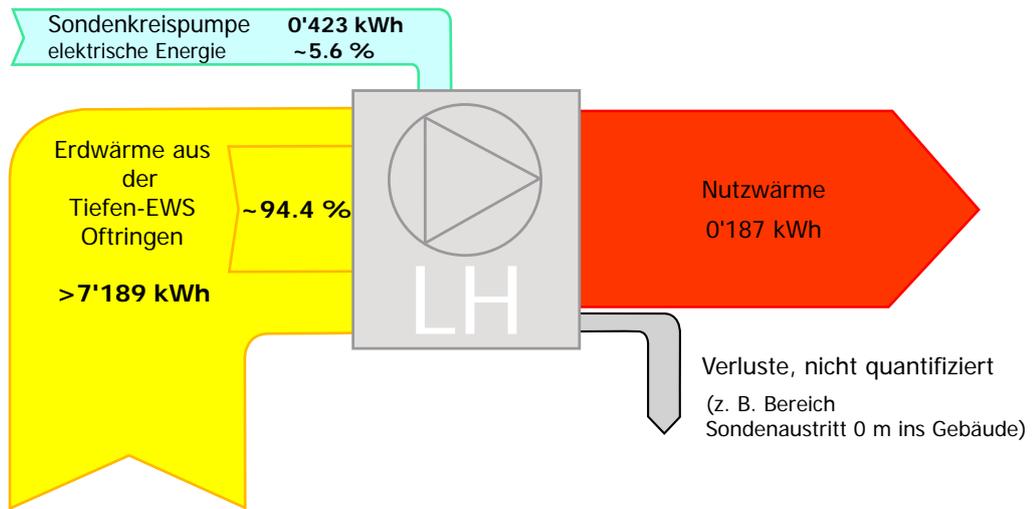


Aussentemperatur

Ø	9.1 °C
MIN	4.5 °C
MAX	17.8 °C

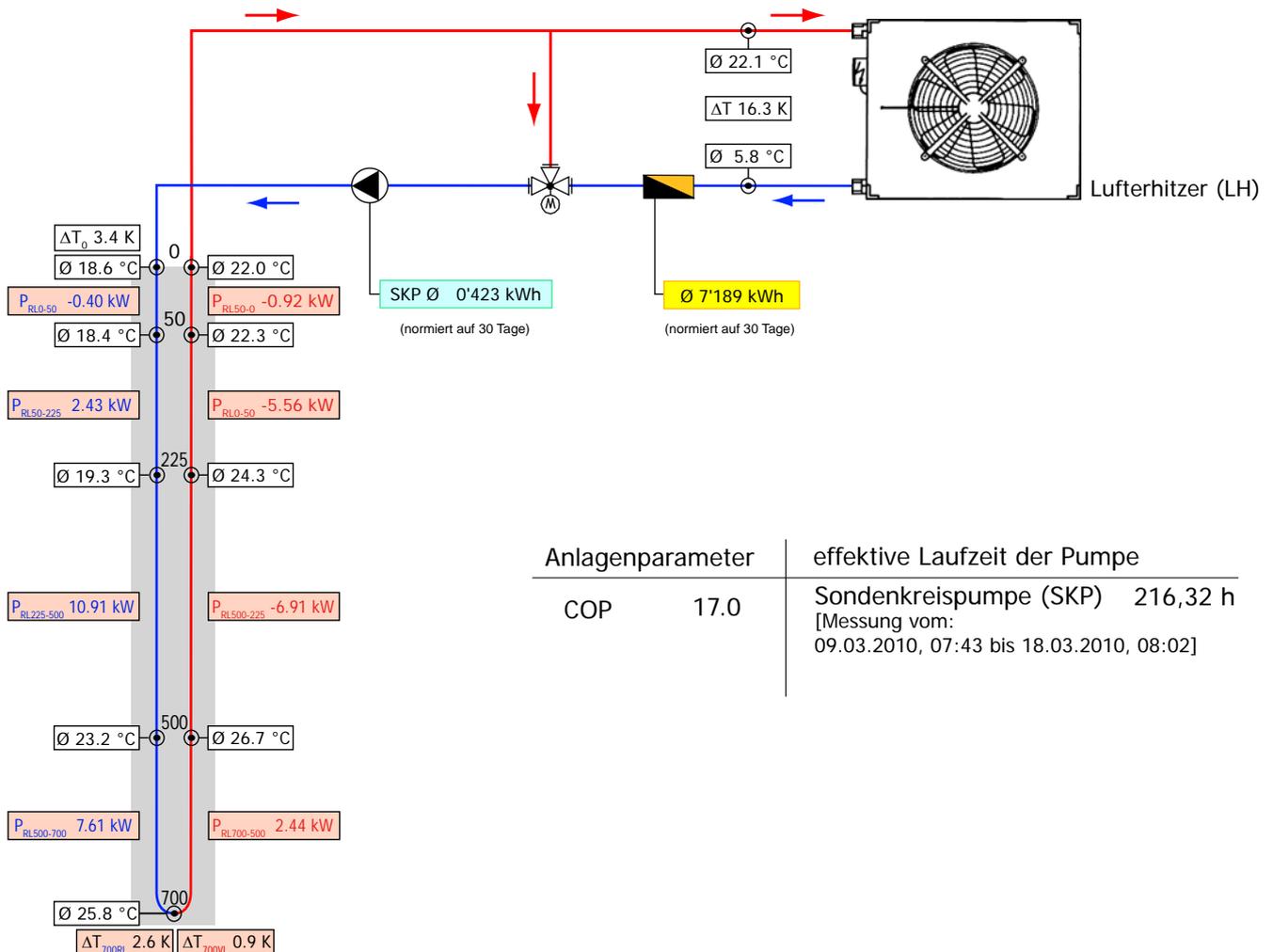


Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 10 kW Entzugsleistung

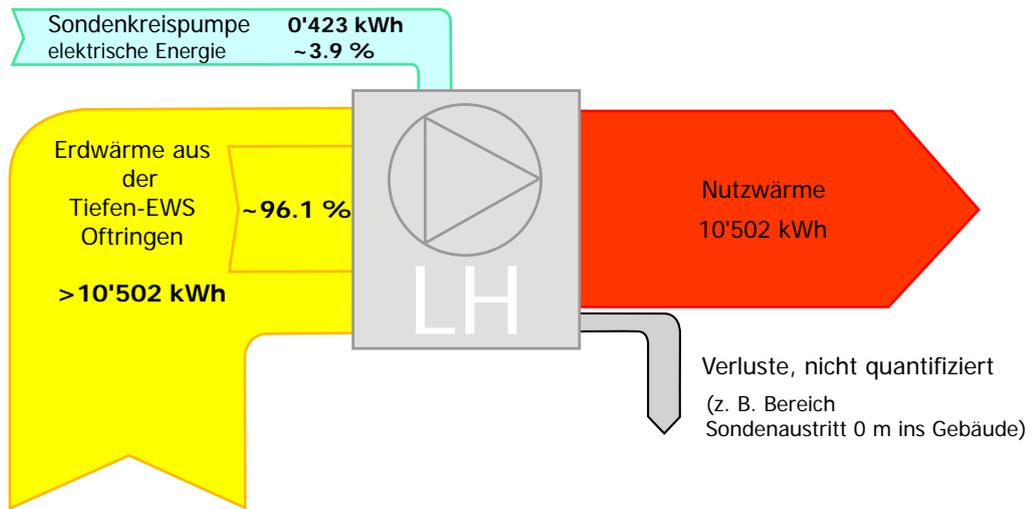


Aussentemperatur

Ø	0.9 °C
MIN	-6.7 °C
MAX	12.2 °C

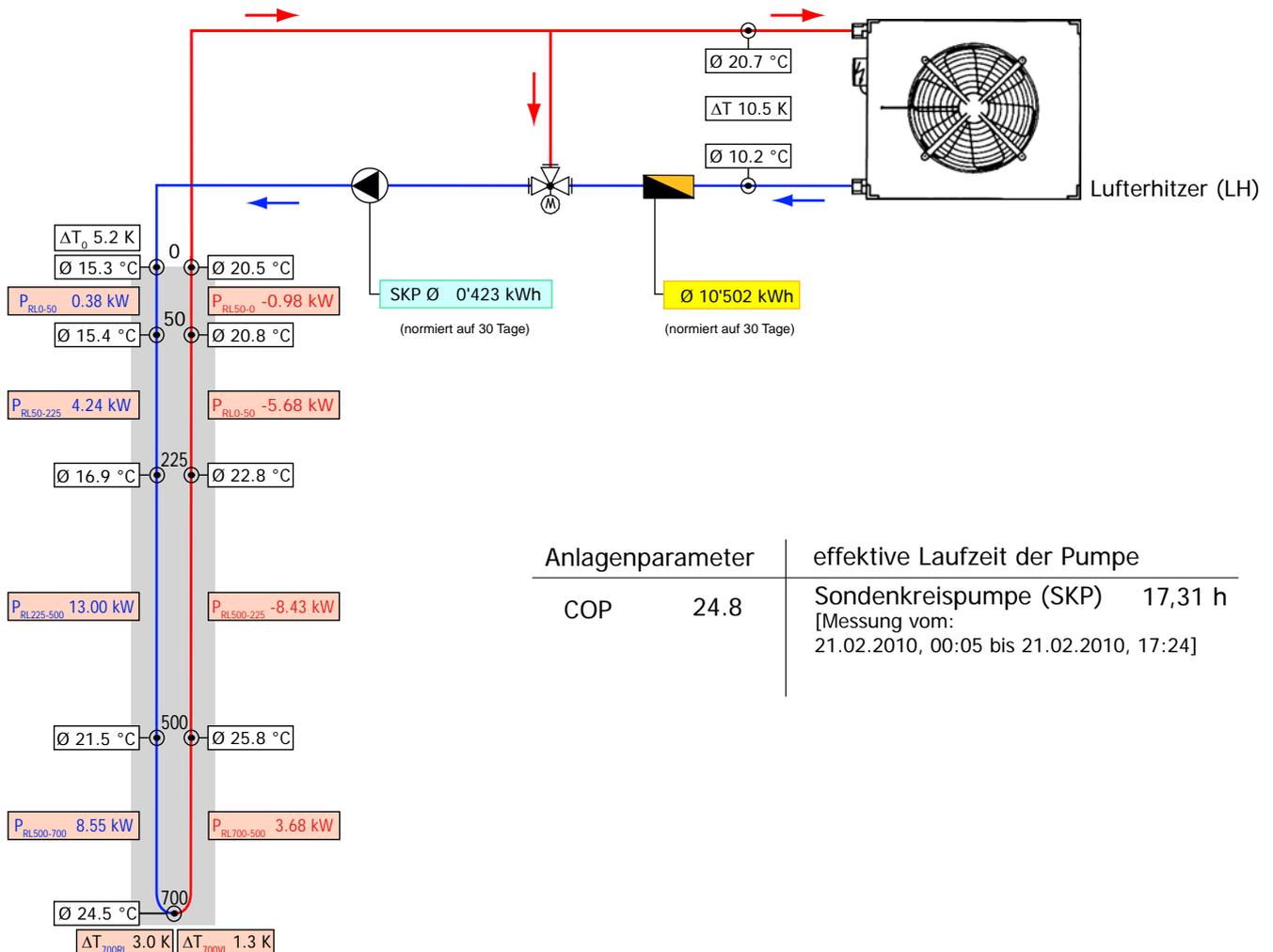


Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 15 kW Entzugsleistung

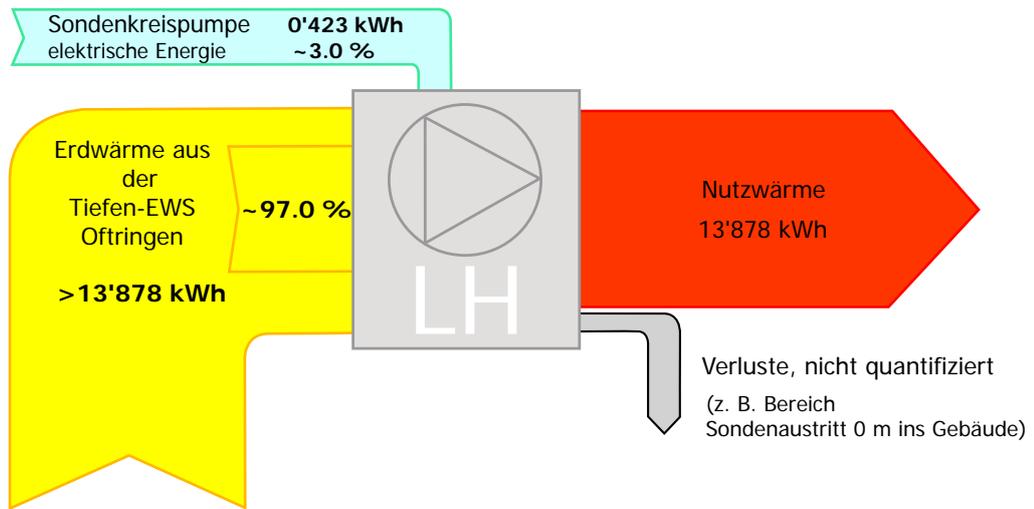


Aussentemperatur

Ø	1.4 °C
MIN	-2.6 °C
MAX	7.0 °C

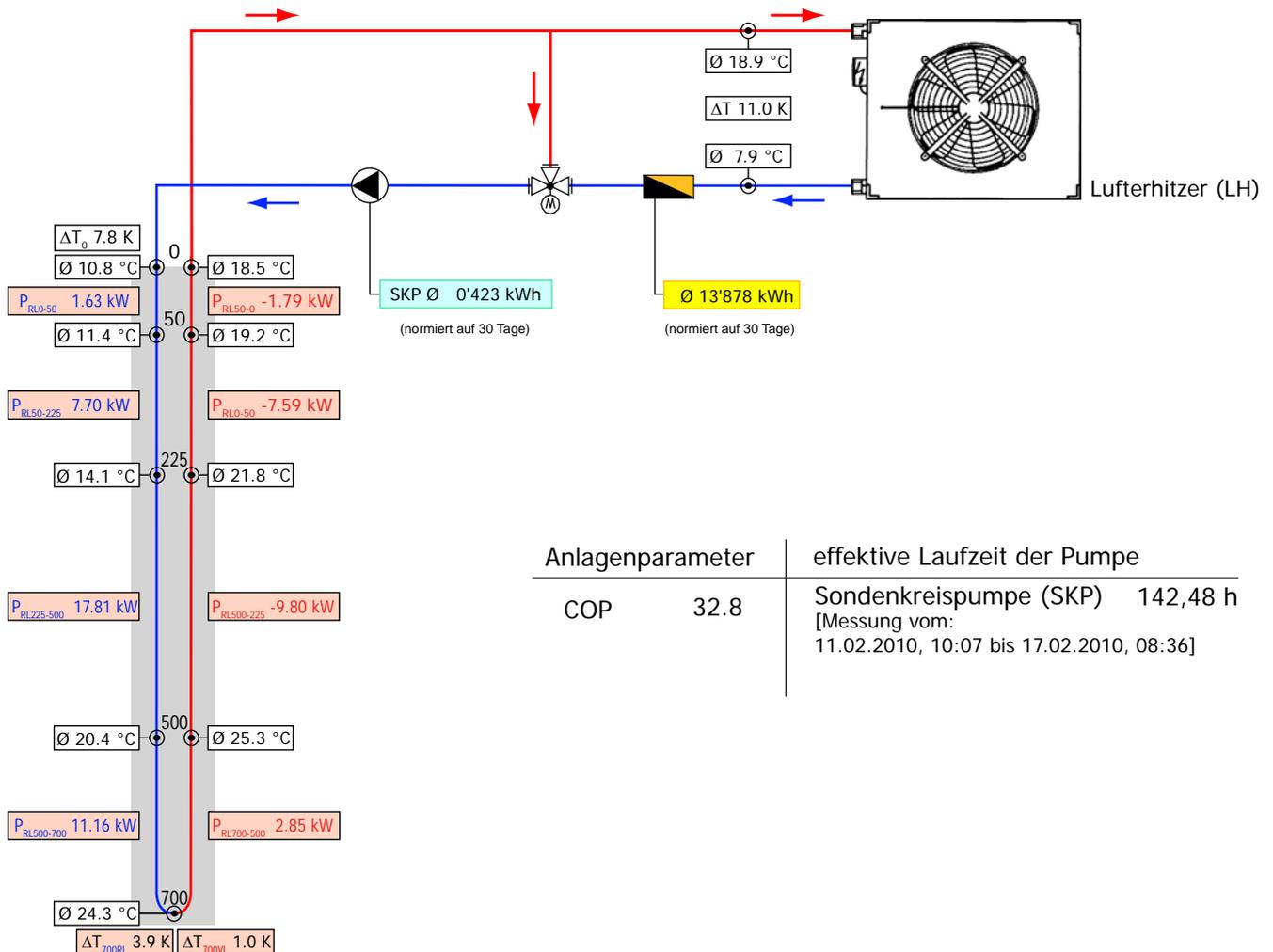


Temperatur- und Wärmebilanz bei 2.5 m³/h und 20 kW Entzugsleistung

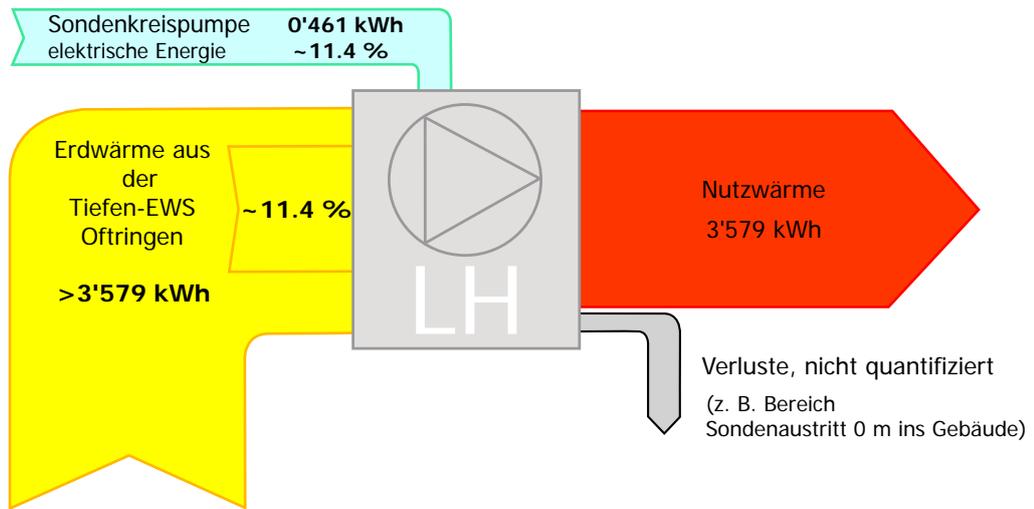


Aussentemperatur

Ø	-3.2 °C
MIN	-10.8 °C
MAX	1.2 °C

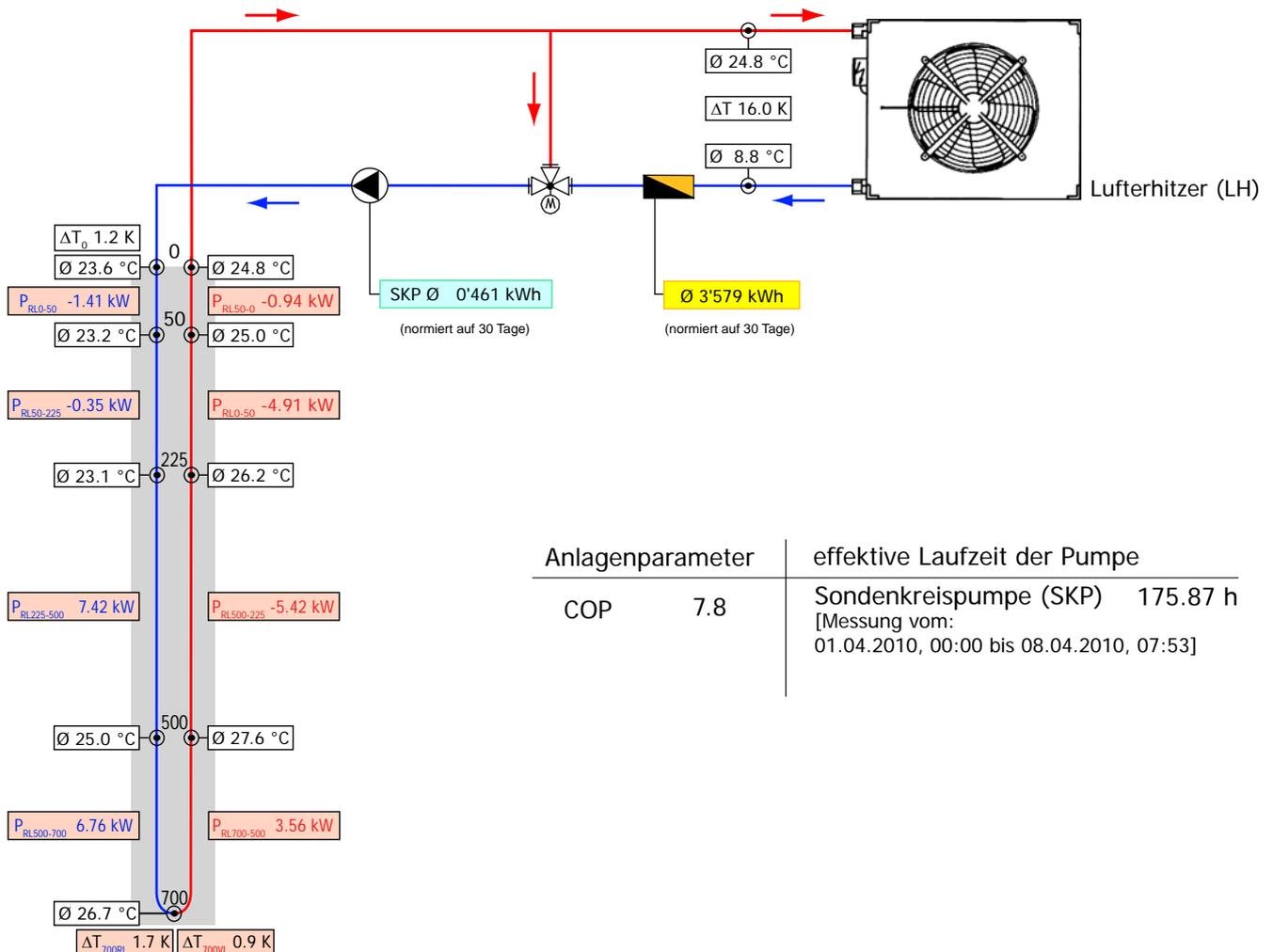


Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 5 kW Entzugsleistung



Aussentemperatur

Ø	7.0 °C
MIN	-0.7 °C
MAX	22.6 °C



Anlagenparameter

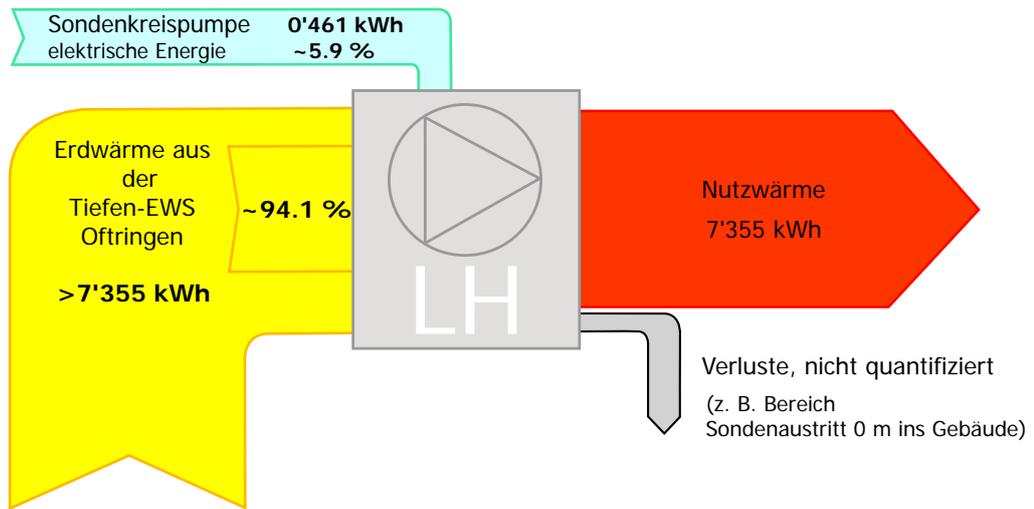
COP 7.8

effektive Laufzeit der Pumpe

Sondenkreispumpe (SKP) 175.87 h
 [Messung vom: 01.04.2010, 00:00 bis 08.04.2010, 07:53]

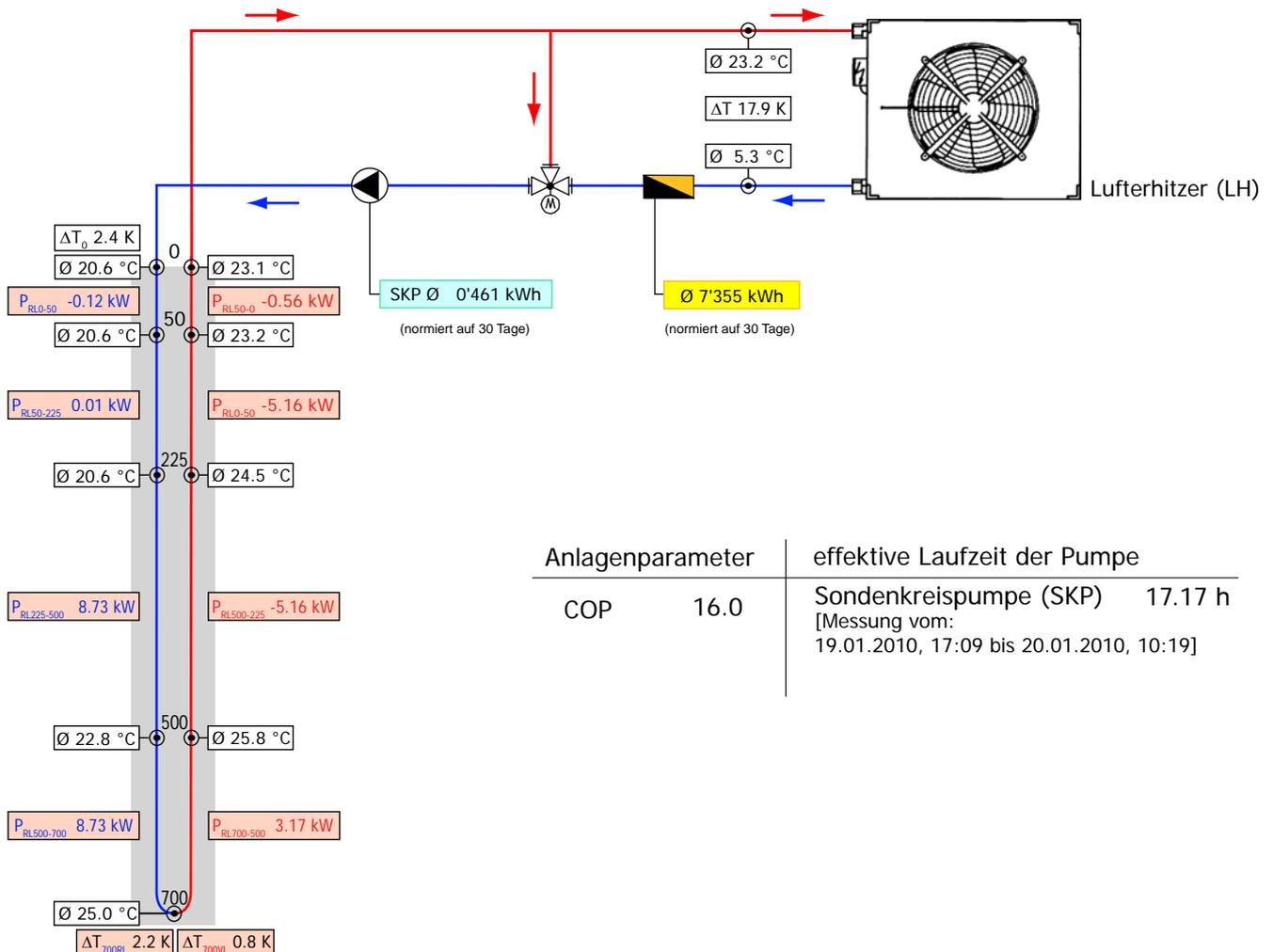


Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 10 kW Entzugsleistung



Aussentemperatur

Ø	0.2 °C
MIN	-0.6 °C
MAX	0.8 °C



Anlagenparameter

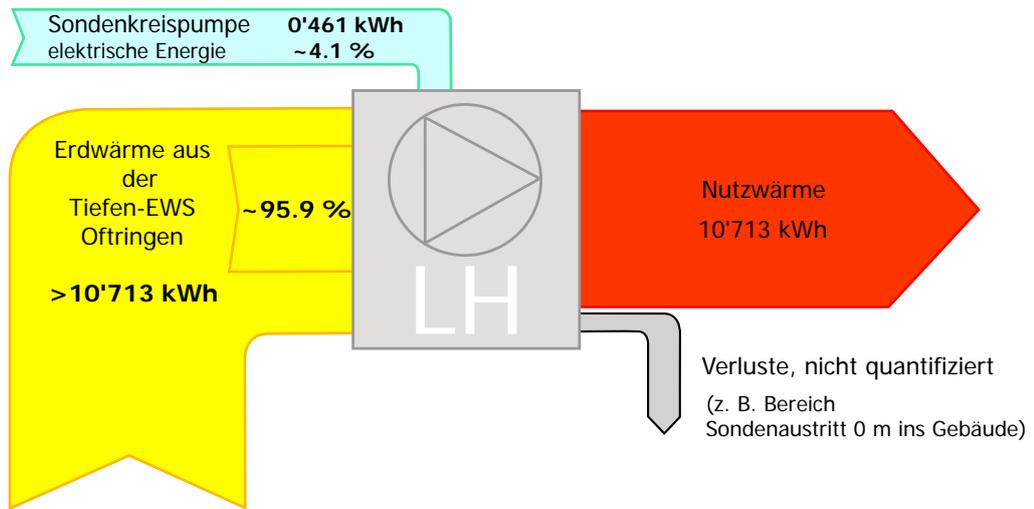
COP 16.0

effektive Laufzeit der Pumpe

Sondenkreispumpe (SKP) 17.17 h
 [Messung vom: 19.01.2010, 17:09 bis 20.01.2010, 10:19]

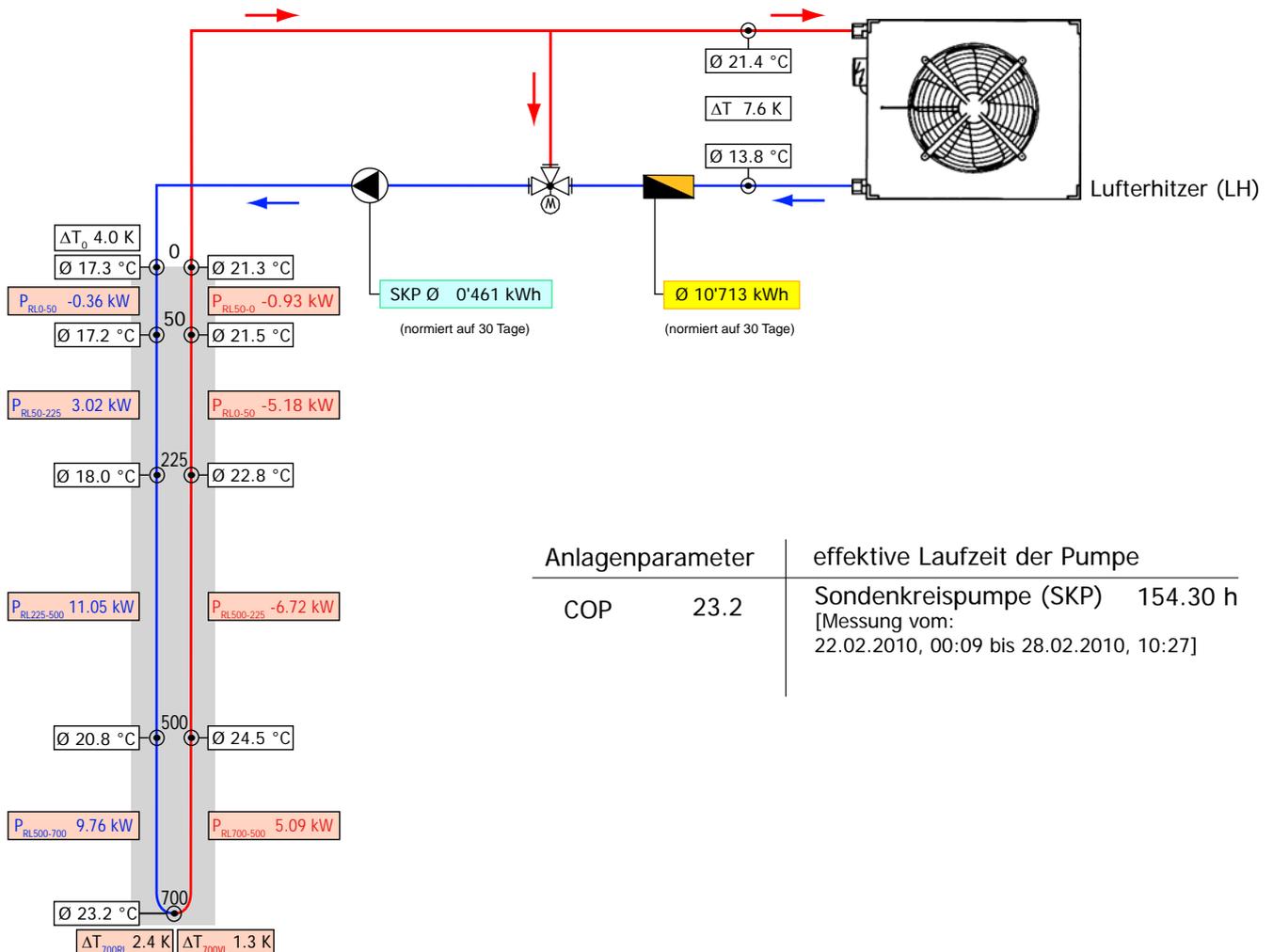


Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 15 kW Entzugsleistung

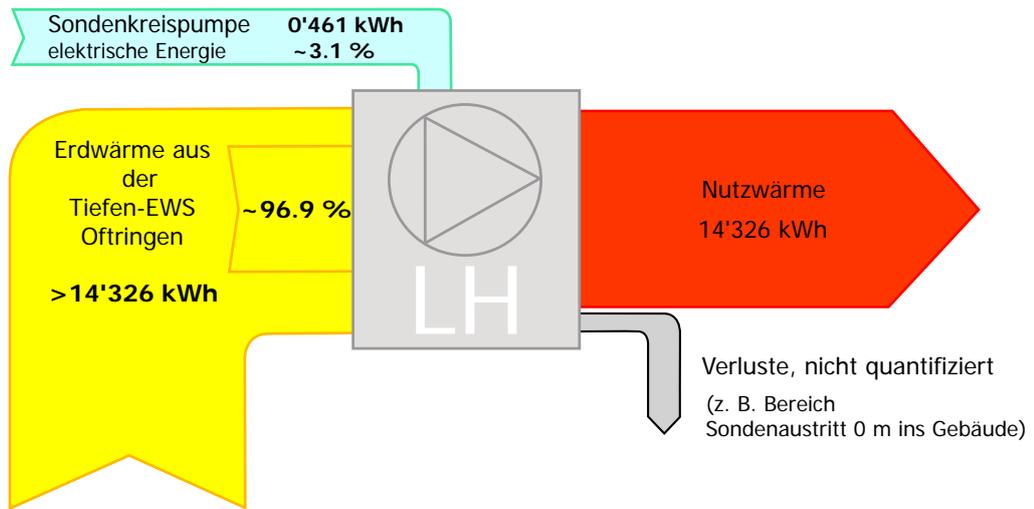


Aussentemperatur

Ø	4.9 °C
MIN	-2.2 °C
MAX	11.2 °C

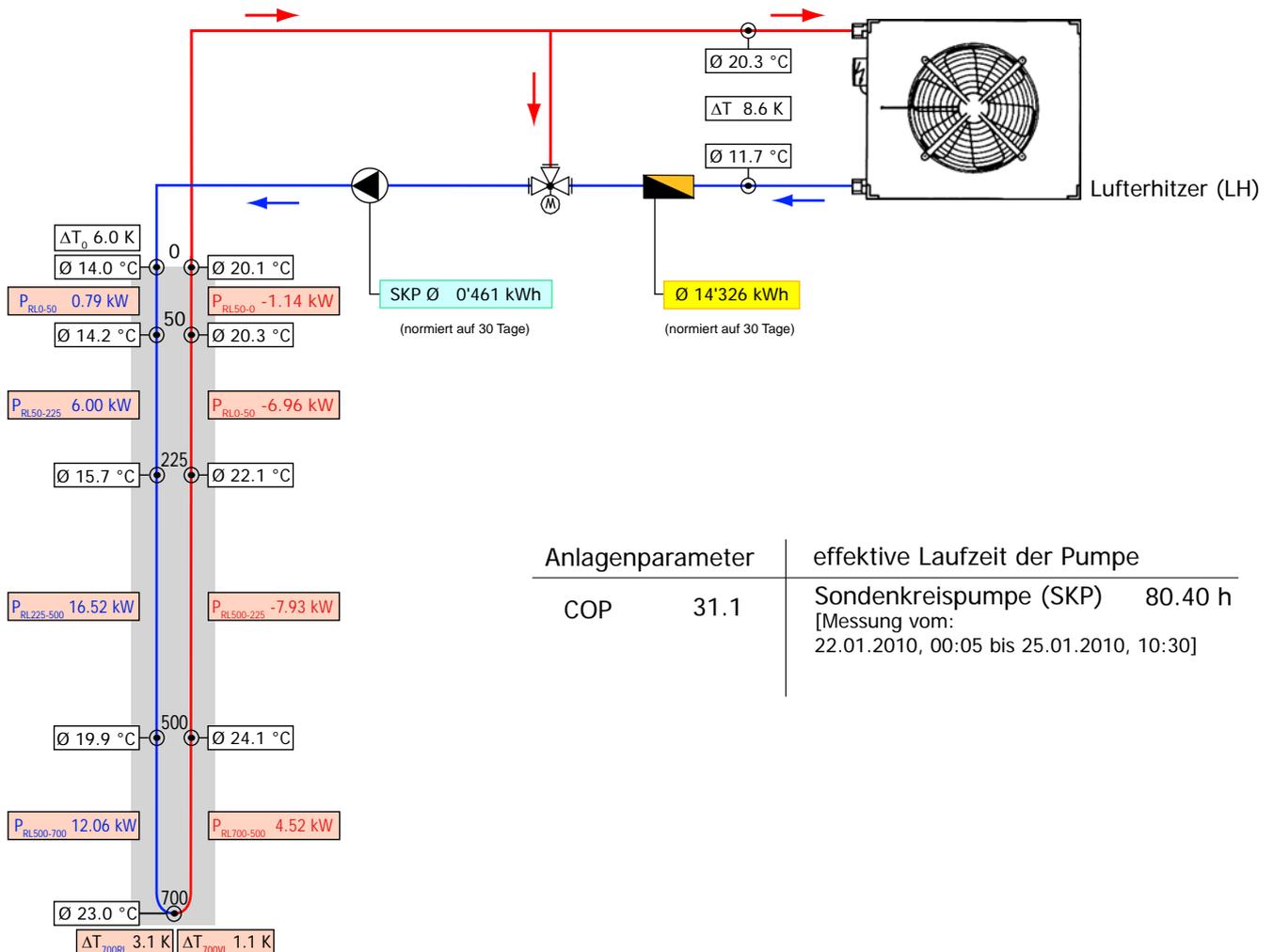


Temperatur- und Wärmebilanz bei 3.5 m³/h und 20 kW Entzugsleistung



Aussentemperatur

Ø	0.7 °C
MIN	-3.5 °C
MAX	3.8 °C



Anlagenparameter

COP 31.1

effektive Laufzeit der Pumpe

Sondenkreispumpe (SKP) 80.40 h
 [Messung vom: 22.01.2010, 00:05 bis 25.01.2010, 10:30]

