

## **Monitoring, Analyse der Energieeffizienz und nachhaltige Nutzung eines Geothermiefeldes zur Gebäudeklimatisierung**

**Phillip Stoffel, Marc Baranski, Thomas Schreiber und Dirk Müller**

RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

**Keywords:** Monitoring, Datenanalyse, Energieeffizienz, Betriebsoptimierung, Simulation

### **Zusammenfassung**

Die zunehmende Integration erneuerbarer Energien in Gebäudeenergiesysteme stellt hohe Anforderungen an die Betriebsstrategie. Insbesondere die Einbindung oberflächennaher Geothermie in das Energiesystem erfordert eine geeignete Betriebsstrategie um auch langfristig Funktion und Energieeffizienz sicherzustellen. Das Hauptgebäude des E.ON Energieforschungszentrum der RWTH Aachen wird über ein Geothermiefeld und eine Wärmepumpe mit Wärme und Kälte versorgt. Das gesamte Gebäude sowie das Geothermiefeld wurden mit einer umfassenden Sensorik ausgestattet. Die erhobenen Daten werden nun kontinuierlich in eine cloudbasierte Monitoring Plattform mit integrierter Zeitreihendatenbank geschrieben. Die Analyse des Geothermiefeldbetriebs zeigt, dass sich die Erdreichtemperatur durch früheren unausgeglichene Betrieb bereits stellenweise erhöht hat. Des Weiteren unterscheiden sich die thermischen Leistungen der einzelnen Erdwärmesonden teilweise deutlich. Insbesondere in Betriebszeiten mit einer geringen Temperaturdifferenz zum Erdreich führt dies zu einem ineffizienten Feldbetrieb. Verbesserungspotenziale liegen beispielsweise in einer gezielten Ansteuerung der einzelnen Sonden oder in prädiktiven modellbasierten Regelungstechniken.

### **1. Einleitung**

Ein Schlüsselfaktor zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen und Schonung der Ressourcen fossiler Energieträger ist die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Insbesondere die oberflächennahe Geothermie spielt aufgrund ihrer geringen Volatilität, hohen Verfügbarkeit und niedrigen Betriebskosten eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der Gebäudeklimatisierung. Die Effizienz und nachhaltige Nutzung von oberflächennaher Geothermie wird stark durch die jeweilige Betriebsführung beeinflusst. Insbesondere eine unausgeglichene Energiebilanz kann zu einer Aufheizung oder Abkühlung des Feldes führen, wodurch langfristige Effizienzeinbußen entstehen (Rosen 2018; Park et al. 2012). Diese Effizienzeinbußen können sich negativ auf die Verbreitung oberflächennaher Geothermie auswirken.

Am E.ON Energy Research Center (ERC) der RWTH Aachen wird in einem interdisziplinären Team die Nutzbarmachung geothermaler Energie erforscht. Das Hauptgebäude des Forschungszentrums wird selbst über ein oberflächennahes Geothermiefeld mit Wärme und Kälte versorgt. Hierbei dient das Geothermiefeld in unterschiedlichen Forschungsprojekten als Demonstrationsobjekt. Ziel des Projektes geo:base ist es, Methoden zur Verbesserung der Betriebsführung von komplexen Gebäudeenergiesystemen mit Geothermiefeldern zu erarbeiten. Durch die Übertragbarkeit der Methoden soll die Energieeffizienz des Gebäudebestands bei gesteigertem Nutzerkomfort erhöht werden können. Zur Analyse des Systemverhaltens wurde das Gebäude und das Geothermiefeld mit einer umfangreichen Mess- und Regelungstechnik ausgerüstet und eine Monitoring Plattform zur Datenverarbeitung implementiert. Im Rahmen dieses Beitrags wird das Energiesystem, die aktuelle Betriebsstrategie und die Monitoring Plattform vorgestellt. Darauf aufbauend wird eine erste Analyse des bisherigen Geothermiefeldbetriebs durchgeführt und verschiedene Verbesserungsmaßnahmen diskutiert.

## 2. Die Energieversorgung des E.ON Energieforschungszentrum

Am E.ON Energieforschungszentrum (ERC) der RWTH Aachen wird an fünf verschiedenen Instituten zu Themen der nachhaltigen Energieversorgung geforscht. Im Hauptgebäude des ERC stehen hierfür auf 7222 m<sup>2</sup> Büroräume und Labore zur Verfügung. Darüber hinaus dient das Gebäude selbst im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben als Forschungs- und Demonstrationsobjekt. Das Energiekonzept des Gebäudes ist in Abb. 1 dargestellt. Den Kern der Energieversorgung bildet eine Wärmepumpe mit 250 kW thermischer Leistung. Die Wärmepumpe stellt Wärme auf einem Temperaturniveau von 35 °C und Kälte auf einem Temperaturniveau von 17 °C bereit. Zur Deckung von Spitzenlasten und zur Versorgung eines offenen Adsorptionsprozesses stehen außerdem ein Blockheizkraftwerk und ein Brennwertkessel zur Verfügung, welche Wärme auf einem Temperaturniveau von 80 °C bereitstellen. Über ein Rückkühlwerk kann Wärme, die nicht im Gebäude genutzt oder gespeichert werden kann, an die Außenluft abgegeben werden. (Futterer et al. 2013)

Die Wärmepumpe wird durch die Gebäudeabwärme und ein Geothermiefeld mit Niedertemperaturwärme versorgt. Das Geothermiefeld nimmt somit eine zentrale Rolle bei der nachhaltigen Klimatisierung des Gebäudes ein.

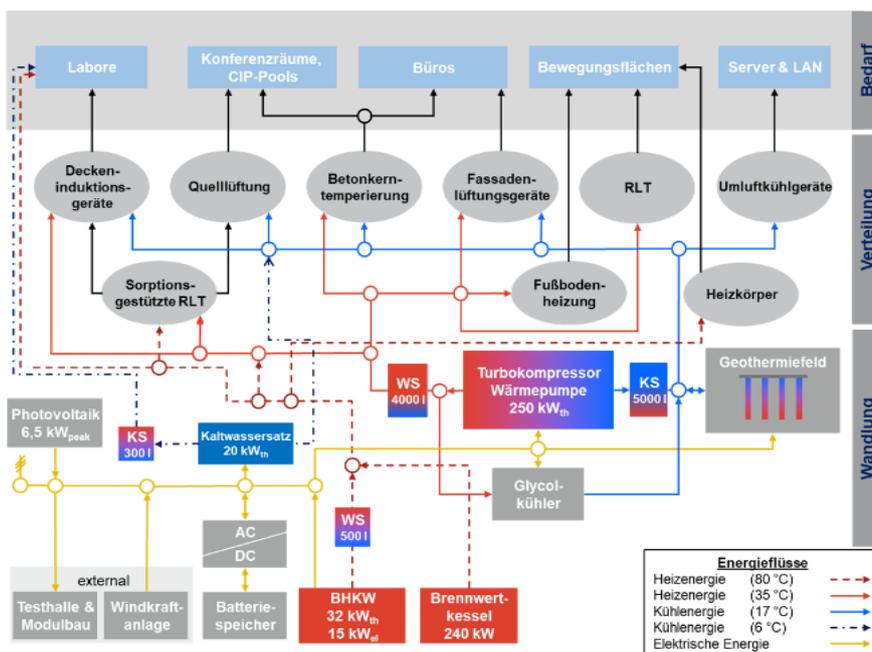


Abb. 1: Das Energiesystem des E.ON ERC Hauptgebäudes nach (Futterer et al. 2013)

Im Rahmen eines abgeschlossenen Forschungsprojekts (Müller et al. 2017; Bode et al. 2018) wurde für das komplexe Energiesystem eine modusbasierte Regelstrategie entwickelt. Ziel der Strategie ist zum einen ein möglichst effizienter Gebäudebetrieb und zum anderen eine langfristige nachhaltige Nutzung des Geothermiefelds. Ein Überblick über die unterschiedlichen Betriebsmodi und die Bedingungen für den Wechsel zwischen den Modi (Transitionsbedingungen) ist in Abb. 2 gegeben. Im Allgemeinen wird zwischen Heiz- und Kühlfall unterschieden. Im Heizfall wird zunächst die Wärmepumpe unter Verwendung der Gebäudeabwärme, welche beispielsweise aus Serverräumen oder Laboren stammt, verwendet. Reicht die Abwärme nicht aus, wird zudem das Geothermiefeld als Wärmequelle verwendet. Übersteigt die geforderte Heizleistung die thermische Leistung der Wärmepumpe, wird das Hochtemperaturnetz zugeschaltet. Im Kühlfall wird zunächst anhand der Außentemperatur unterschieden. Bei Kühlbedarf und einer Außentemperatur unter 8 °C erfolgt eine Freikühlung über einen Tischkühler. Diese werden in einer Hystereseschleife zwischen

8 und 10 °C aktiviert bzw. deaktiviert. Liegt die Außentemperatur über 10 °C, wird die Rücklauftemperatur aus dem Geothermiefeld zur Auswahl herangezogen. Beträgt diese weniger als 12 °C werden die Erdwärmesonden zur Freikühlung verwendet.

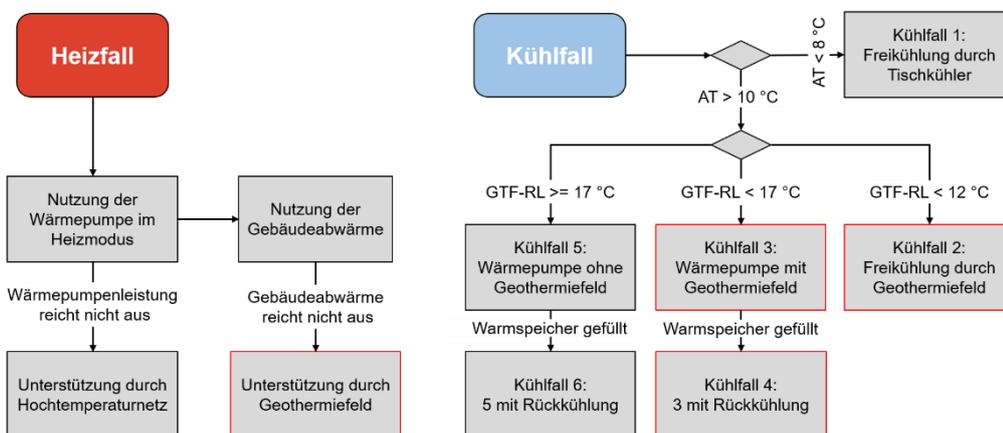


Abb. 2: Betriebsmodi der Klimatisierung nach (Bode et al. 2018)

Bei Austrittstemperaturen zwischen 12 und 17 °C unterstützt die Wärmepumpe das Feld bei der Kühlung. Wenn die Austrittstemperatur über 17 °C liegt, wird eine Kühlung mit dem Feld als nicht mehr möglich betrachtet und es wird nur noch die Wärmepumpe verwendet. Dieser Kühlfall wird auch bei einer Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur unter 0,5 K eingestellt. Bei gefülltem Wärmespeicher wird in den beiden Kühlfällen mit Wärmepumpenbetrieb der Tischkühler zur Rückkühlung verwendet.

Insgesamt ist der Kühlbedarf des Gebäudes höher als der Heizbedarf. Daher stellt in dieser Strategie die 12 °C Grenze den entscheidenden Schwellwert für eine nachhaltige Geothermiefeldnutzung dar. Dieser Wert wurde durch Simulationen festgelegt, um die Aufheizung des Feldes auf ein Minimum zu begrenzen. (Müller et al. 2017; Bode et al. 2018)

## 2.1 Das Geothermiefeld und installierte Messtechnik

Das Geothermiefeld des ERC besteht aus 41 Doppel-U Sonden mit einer Sondentiefe von je 100 m. Um den notwendigen Durchsatz von bis zu 1200 l/min zu erzeugen, werden zwei Pumpen mit 6 kW elektrischer Leistung alternierend betrieben. Die Sonden sind auf drei Schächte verteilt. Abb. 3 zeigt die Anordnung der Sonden um das Gebäude, wobei die 41. Sonde wurde zu Referenzzwecken abseits vom Feld installiert wurde und daher nicht dargestellt ist. In den Schächten, welche in der Abbildung als schwarze Rechtecke dargestellt sind, läuft die Verrohrung der Sonden zusammen. An dieser Stelle sind die Ventile der einzelnen Sonden installiert. Hierbei handelt es sich um Belimo Energy Valves, welche mit Temperaturfühlern für Vor- und Rücklauf und Volumenstromsensoren ausgerüstet sind. Die Belimo Energy Valves dienen zudem als speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) auf welchen sich Regelalgorithmen implementieren lassen. Momentan ist ein einfacher PID Regler implementiert, welcher den Volumenstrom einstellt. Außerdem wird auf jeder SPS aus den Temperatur- und Volumenstrommesswerten die aktuelle Wärmeleistung jeder Sonde berechnet. Die SPS-Software erlaubt zudem das Schreiben von Sollwerten und Auslesen von Messwerten über das BACnet Protokoll. Neben den Messungen der Stellventile in den Schächten verfügt das Geothermiefeld über glasfaseroptische Temperatursensoren. Hiermit lässt sich die Temperaturverteilung entlang der einzelnen Sonden mit einer räumlichen Auflösung von 0,2 m und einer zeitlichen Auflösung von 4 min messen. Außerdem sind in zwei der Sonden sogenannte Hybridkabel eingebracht worden. Mit diesen lassen sich definierte Wärmemengen in das Feld einbringen und somit wiederholt Thermal Response Tests durchführen. Die Hybridkabel und die

glasfaseroptischen Temperatursensoren sind jedoch nicht in das Automationsnetz integriert. Daher werden sie nicht über das, im Folgenden vorgestellte, Monitoring System überwacht. Der Fokus der Untersuchung liegt daher auf den Messwerten der Sonden Ein- und Ausgänge.

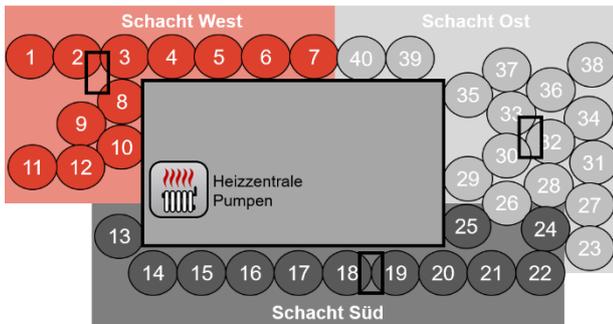


Abb. 3: Lageplan der 40 Erdwärmesonden um das ERC Hauptgebäude

### 3. Das Monitoring System des E.ON Energieforschungszentrum

Das Hauptgebäude des E.ON ERC wird selbst als Demonstrator zur Erprobung innovativer Regelstrategien und der Nutzbarmachung des Gebäudeneigesystems für (Netz-)Flexibilitätsdienste genutzt. Aus diesem Grund ist das gesamte Gebäude mit einer umfassenden Sensorik und Aktuatorik ausgerüstet. In diesem Rahmen wurde ein umfassendes Monitoring System entwickelt, welches es ermöglicht die aktuellen Werte der ca. 8000 Datenpunkte im Gebäude abzuspeichern und für weitere Analysen verfügbar zu machen. Das Monitoring System selbst durchlief in den letzten Jahren verschiedene Entwicklungsstufen. Diese sind in Abb. 4 abgebildet. Zunächst wurden die Daten des Gebäudeautomationssystems über einen OPC (Open Plattform Communication) Server in einer SQL Datenbank gespeichert (Futterer et al. 2013). Aufgrund der eingeschränkten Leistung dieser Datenbank wurde die Entwicklung einer Zeitreihendatenbank vorangetrieben. Hiermit lassen sich Echtzeit-Analysen und datenbasierte Regelungsansätze bei einer erhöhten Anwenderfreundlichkeit effizienter umsetzen. Die entwickelte Plattform kommuniziert über das MQTT Protokoll mit einem Industrie PC im Gebäudeautomationssystem. Hierzu wird der open-source MQTT Broker Mosquitto<sup>1</sup> verwendet. Die Monitoring Daten werden in einer Influx<sup>2</sup> Zeitreihendatenbank gespeichert. Einzelne Zeitreihen und Analysen lassen sich intuitiv über eine Grafana<sup>3</sup> Instanz mit Webinterface visualisieren. Des Weiteren bietet Grafana eine Alarmfunktion, welche den Nutzer automatisiert alarmiert, wenn definierte Grenzwerte überschritten werden, oder Datenpunkte über definierte Zeiträume keine Updates erhalten haben. Komplexere Analysen oder Regelalgorithmen lassen sich durch das Verwenden einer standardisierten Programmierstelle (REST<sup>4</sup> API) realisieren. Mittels dieser API lässt sich beispielsweise über Python, Matlab oder Excel mit der Plattform kommunizieren. Um die Stabilität der Plattform zu erhöhen werden die Softwarekomponenten in Docker<sup>5</sup> Containern ausgeführt. Diese verteilen die Rechenlast gleichmäßig auf verschiedene Server. Derzeit wird am ERC an einer Cloudplattform auf Basis von der open-source Entwicklung FIWARE<sup>6</sup> geforscht. Diese eignet sich insbesondere zur Einbindung

<sup>1</sup> <https://github.com/eclipse/mosquitto>

<sup>2</sup> <https://www.influxdata.com/>

<sup>3</sup> <https://grafana.com/>

<sup>4</sup> <https://restfulapi.net/>

<sup>5</sup> <https://www.docker.com/>

<sup>6</sup> <https://www.fiware.org/>

von IoT-fähigen Feldgeräten und soll insbesondere die Integration von Geräten mit dem neuen 5G Mobilfunkstandard ermöglichen. (Storek et al. 2019)

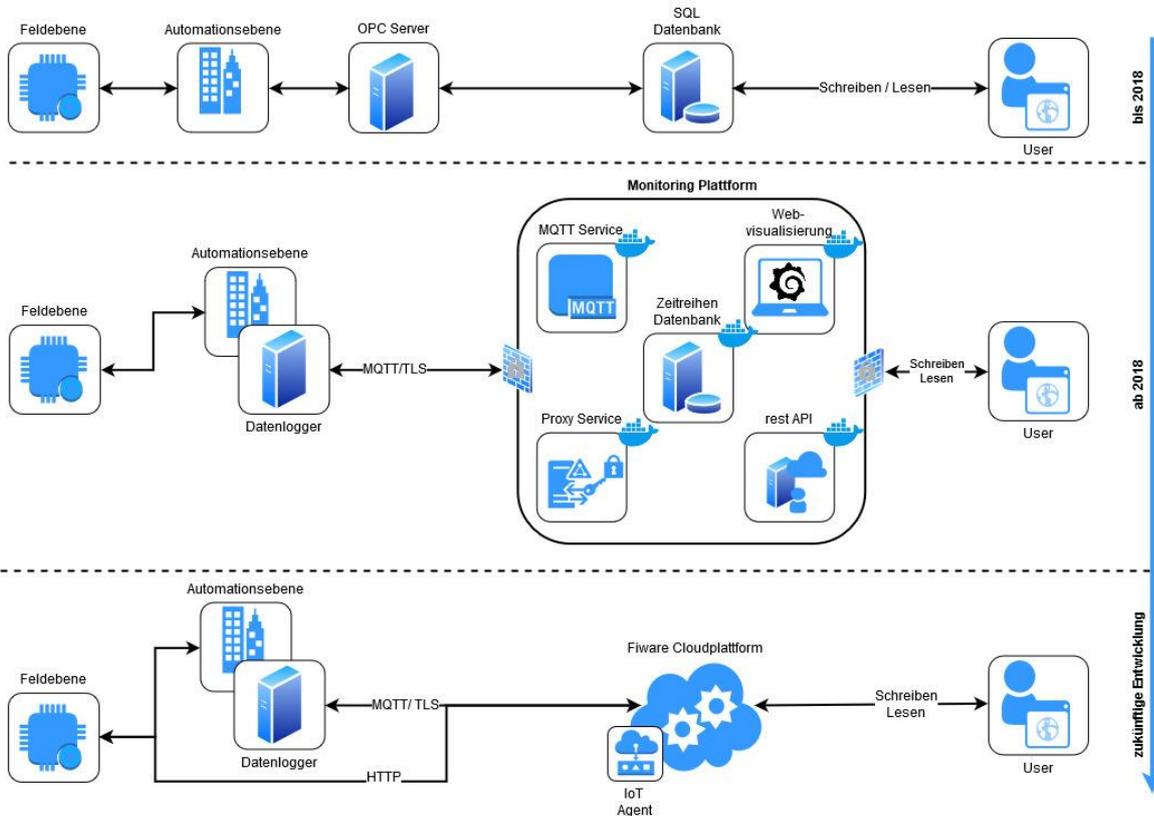


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung und Aufbau des Monitoring Systems am EBC

Parallel zu der dargestellten Plattform wird eine kommerzielle Weiterentwicklung der Plattform des Unternehmens Aedifion<sup>7</sup> eingesetzt. Damit wird der schnellen technischen Weiterentwicklung auf dem Gebiet Rechnung getragen. Außerdem kann so zwischen den Entwicklungsaktivitäten an der auf FIWARE basierenden Plattform und dem Produktsystem getrennt werden. Somit wird jederzeit eine stabile Datenspeicherung gewährleistet.



Abb. 5: Exemplarische Geothermiefeld Echtzeit Überwachung in Grafana

<sup>7</sup> <https://www.aedifion.com/>

Durch das umfassende Monitoringsystem lässt sich das Geothermiefeld in Echtzeit überwachen. Abb. 5 zeigt exemplarisch den Aufbau eines Geothermiefeld Dashboards in Grafana. Dargestellt ist der Wärmestrom und der Volumenstrom der ersten drei Sonden, sowie Vor- und Rücklauftemperatur der ersten Sonde. Außerdem wird die eingebrachte Energie im betrachteten Zeitraum berechnet und angezeigt. Neben dem Speichern und Visualisieren von Zeitreihendaten, ist das Schreiben von Sollwerten eine wichtige Funktion der Plattform. Hierdurch ist prinzipiell die Infrastruktur für die Entwicklung und Implementierung cloudbasierter Energiemanagementsystem gegeben.

#### 4. Auswertung des Geothermiefeldbetriebs

Um Verbesserungspotentiale in der aktuellen Betriebsstrategie zu identifizieren wird im Folgenden eine globale Auswertung des Betriebs des letzten Jahres vorgenommen (01.07.2018 bis 31.06.2019). Dieser Zeitraum markiert zudem den Start des neuen Monitoringsystems. Eine Analyse der Datenqualität zeigt die gesteigerte Verfügbarkeit des neuen Systems: Mit dem alten SQL System wurden monatlich ca. 2 Mio. Messwerte auf den 202 Datenpunkten des Geothermiefelds aufgenommen, demgegenüber stehen monatlich ca. 15 Mio. Messwerte 2018/19. Durch das neue Monitoring System wurde die Datendichte somit deutlich gesteigert. Die Betriebsmodi des Energiesystems im betrachteten Zeitraum sind in Abb. 6 dargestellt.

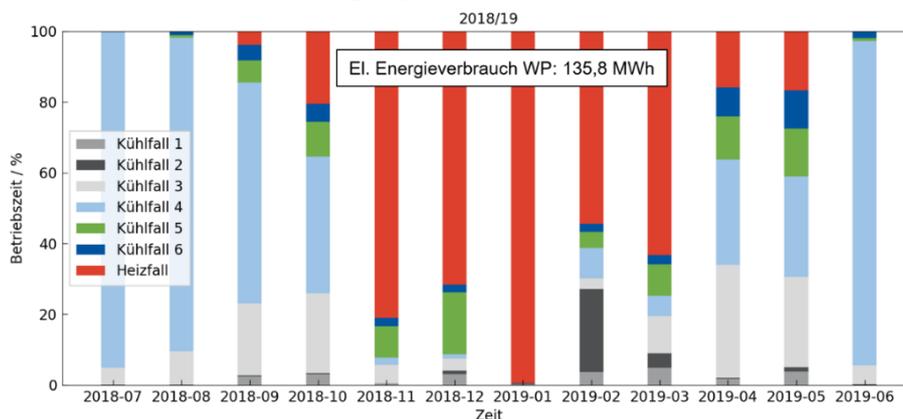


Abb. 6: Betriebsmodi des Energiesystems 2018/19

Die dominierenden Modi sind zum einen der Heizfall und zum anderen Kühlfall 4 (Geothermiefeld + Wärmepumpe + Rückkühler). Neben Kühlfall 4 wird überwiegend Kühlfall 3 zum Kühlen verwendet. In diesem Fall wird die freiwerdende Wärme im Gebäude genutzt oder füllt den Wärmespeicher. Die reine Freikühlung mit dem Geothermiefeld ist aufgrund der geringen Feldaustrittstemperatur auf die Wintermonate beschränkt. Auffällig ist die Häufung von Kühlfall 5 zwischen September und Mai. Hier wird das Feld deaktiviert, weil die Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur weniger als 0,5 K beträgt. Der elektrische Energieverbrauch der Wärmepumpe beträgt im betrachteten Jahr 135,8 MWh. Hiervon entfallen 61,4 MWh auf den Heiz- und 75,4 MWh auf den Kühlbetrieb. Aus dem Geothermiefeld werden insgesamt 65 MWh zum Heizen entnommen und 120 MWh zum Kühlen eingebracht. Da die Jahresarbeitszahl ( $Q_{\text{nutz}}/W_{\text{el}}$ ) der Wärmepumpe in etwa 5,5 beträgt, wird somit ein Großteil der zugeführten Wärme durch die Gebäudeabwärme bereitgestellt. Abb. 7 zeigt die monatliche Energiemenge, welche dem Feld entnommen bzw. in das Feld eingebracht wird. Die Tagesmittel der Ein- und Austrittstemperatur sind in Abb. 9 wiedergegeben. Die Temperaturen bewegen sich zwischen 17,5 °C im Sommer und 10,5 °C im Winter. Erkennbar ist zudem die positive Differenz im Sommer und die negative Differenz im Winter. In Abb. 9 ist zudem die Temperaturdifferenz der einzelnen Schächte dargestellt. Zu beachten ist, dass es sich auch hier zur Übersichtlichkeit um Tagesmittelwerte handelt. Innerhalb eines Tages führen Zeiten in denen das

Feld nicht in Betrieb ist zu einer Angleichung von Ein- und Austrittstemperatur. Außerdem kommen während eines Tages Wechsel zwischen Heizen und Kühlen vor. Daher liegt die Differenz in der Grafik zu großen Teilen unter 0,5 bzw. über -0,5 K (der Feldabschalt-Differenz). Die Grafik zeigt jedoch, dass zwischen den einzelnen Schächten deutliche Unterschiede bestehen. Die Temperaturdifferenz von Schacht Süd liegt nahezu konstant über der Differenz zwischen Vor- und Rücklauf von Schacht Ost. Im Heizbetrieb erreichen Schacht Süd und Schacht West nicht das Niveau von Schacht Ost.

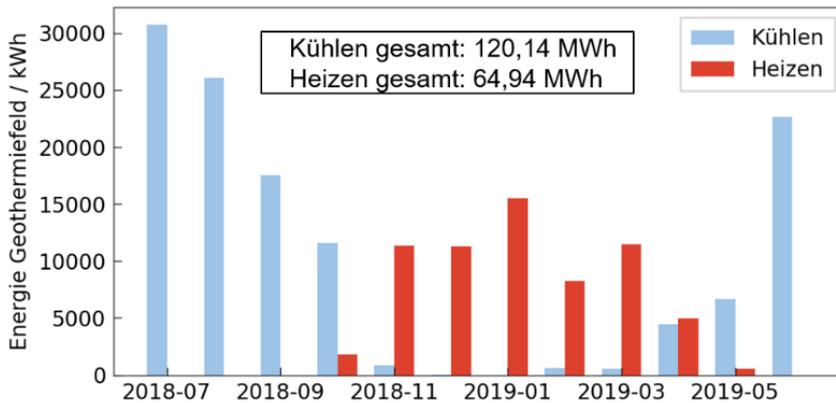


Abb. 7: Verwendung des Geothermiefelds 2018/19

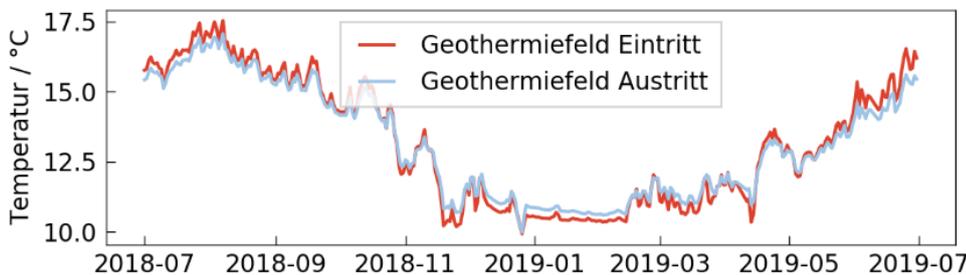


Abb. 8: Jahresgang der Geothermiefeld Ein- und Austrittstemperaturen (Tagesmittel)

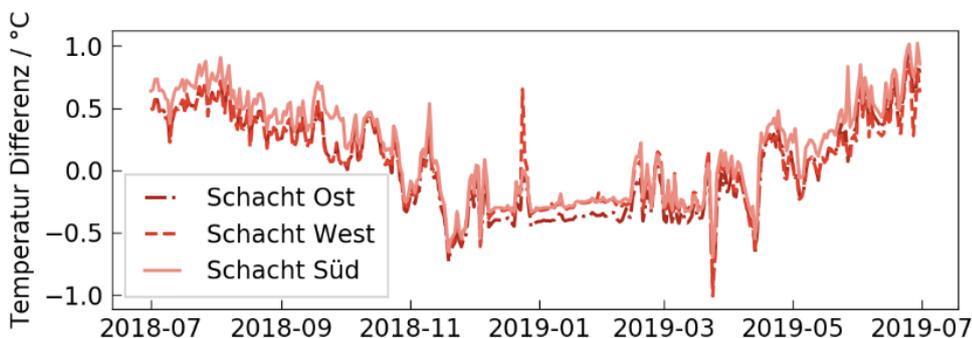


Abb. 9: Jahresgang der Differenz zwischen Vor- und Rücklauf (Tagesmittel)

Die Heizenergie der einzelnen Sonden normiert auf das im Heizbetrieb durchgesetzte Volumen ist in Abb. 10 abgebildet. Hier zeigen sich klare Unterschiede in den Schächten und den einzelnen

Sonden. Die durchschnittliche normierte Heizenergie von Schacht Ost ist 16 % höher als die der anderen beiden Schächte. In Schacht Ost leistet Sonde 26 mit 0,48 kWh/m<sup>3</sup> ca. 50 % mehr als Sonde 40. Diese verfügt im selben Schacht über die geringste normierte Heizenergie. Das durchgesetzte Volumen ist bei beiden Sonden mit 13147 m<sup>3</sup>/a bzw. 13117 m<sup>3</sup>/a nahezu identisch. In Schacht West und Schacht Süd ist das Energiegefälle zwischen den einzelnen Sonden ähnlich hoch. Ein Grund hierfür ist die unausgeglichene Energiebilanz und die dichte Sondenanordnung in Schacht Ost. Hierdurch hat sich in den vergangenen Jahren das Erdreich in diesem Bereich stärker aufgeheizt. (Müller et al. 2017)

Darüber hinaus wurde in vergangenen Forschungsprojekten (Müller et al. 2017; Michalski & Klitzsch 2018) eine Grundwasserströmung in Richtung Nord-West identifiziert. Damit wird insbesondere die in Schacht Süd eingebrachte Wärme verteilt, wodurch sich dieser Bereich weniger aufgeheizt hat als der Rest des Feldes.

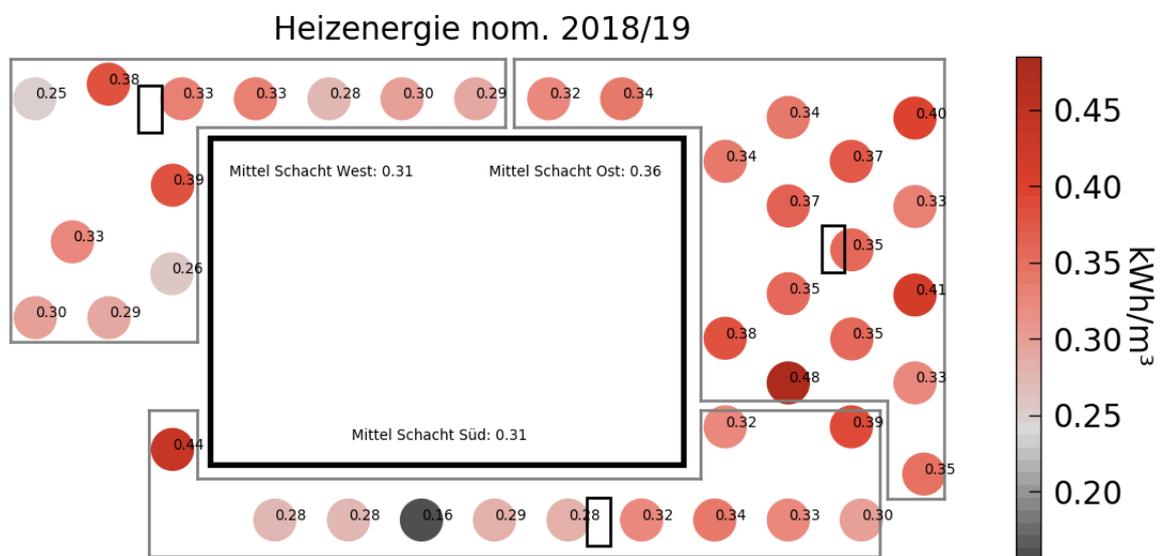


Abb. 10: Auf Volumen normierte Heizenergie der einzelnen Sonden 2018/19

Dies äußert sich in einer um 28 % erhöhten mittleren normierten Kühlenergie des südlichen gegenüber dem östlichen Schacht und in einer um 35 % erhöhten normierten Kühlenergie gegenüber dem westlichen Schacht. Prinzipiell zeigen die Sonden mit einer hohen normierten Kühlenergie eine verminderte normierte Heizleistung und umgekehrt. Die normierten Kühlenergien der einzelnen Sonden sind in Abb. 11 wiedergegeben.

Ein weiterer Grund für die Unterschiede in den Sonden ist zudem der nicht ideale hydraulische Abgleich des Feldes. Die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten verursachen Unterschiede im Wärmeübertragungsverhalten der Sonden. Das jährlich durchgesetzte Volumen der Sonden ist in Abb. 12 dargestellt. Die einzelnen Volumenströme weisen innerhalb der Schächte eine Abweichung von bis zu 17 % auf. Gut erkennbar sind außerdem vier Sonden, welche bis Ende Februar zu Referenzzwecken deaktiviert waren und daher ein deutlich geringeres durchgesetztes Volumen aufweisen.

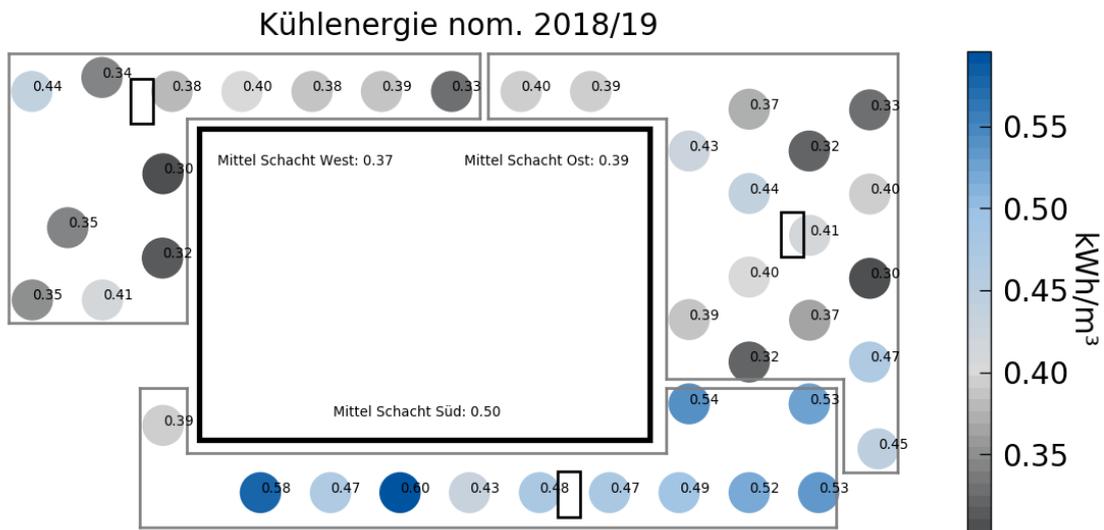


Abb. 11: Auf Volumen normierte Kühlenergie der einzelnen Sonden 2018/19

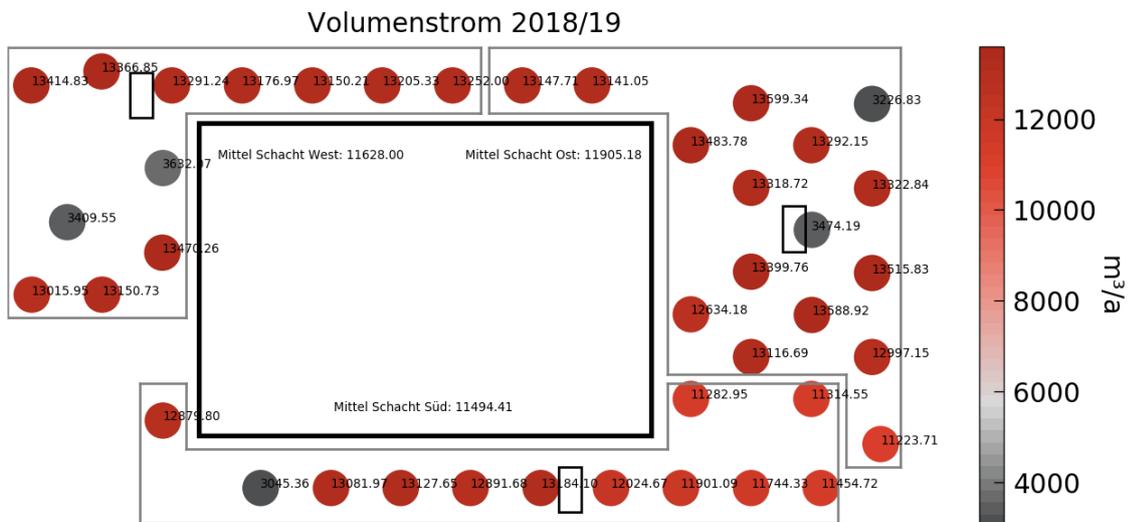


Abb. 12: Jährlicher Durchsatz

Nun wird das Verhalten des Geothermiefeldes bei wechselndem Betrieb betrachtet. Hierzu wird exemplarisch der Betrieb zwischen dem 13. und dem 17. Februar 2019 herangezogen. Abb. 13

zeigt die thermische Leistung der drei Schächte in diesem Zeitraum.

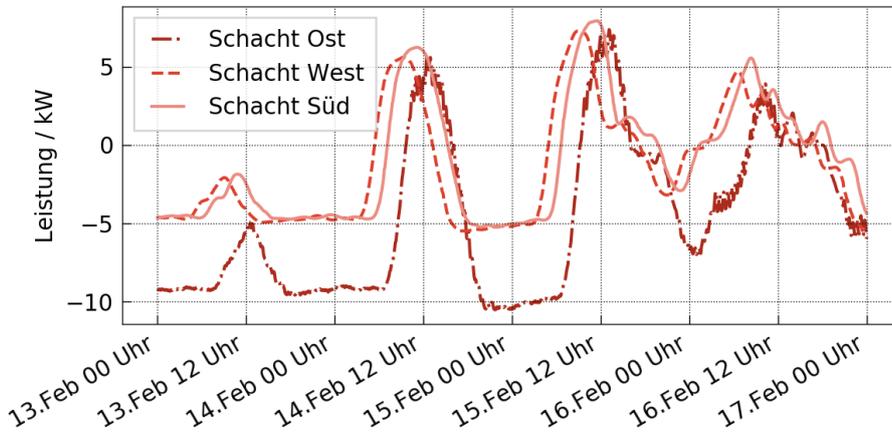


Abb. 13: Mittlere Leistung der Schächte bei wechselndem Betrieb

In diesem Zeitraum wurde das Feld nachts zum Kühlen und tagsüber zum Heizen verwendet. Der Betriebsmodus wechselt tagsüber häufig zwischen Kühlfall 2, Kühlfall 5 und Heizfall. Es wird deutlich, dass die Schächte sehr unterschiedliche Zeiten benötigen, um vom Kühl in den Heizbetrieb zu wechseln. Die thermische Leistung von Schacht Ost wechselt erst 5 Stunden nach Schacht Süd ins positive und kühlt damit erst ab diesem Zeitpunkt. In der Zwischenzeit heizen bzw. kühlen die Schächte daher gegeneinander. Die mittlere Leistung der einzelnen Sonden am 14.2 zwischen 7 und 8 Uhr morgens ist in Abb. 14 dargestellt. In diesem Zeitraum arbeiten die einzelnen Schächte nahezu vollständig gegeneinander. Da die hydraulische Pumpe währenddessen im Nennbetrieb läuft, wird der exergetische Wirkungsgrad des gesamten Systems stark gemindert. Das gezeigte Verhalten der exemplarischen vier Februartagen lässt sich zu mehreren Zeitpunkten im November, Februar und März beobachten. Durch den häufigen Wechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb liegt die homogene Sonden Eintrittstemperatur sehr dicht an der inhomogenen Erdreichtemperatur, wodurch einzelne Sonden (oder ganze Schächte) gegensätzlich zum gewünschten Betriebsfall arbeiten.

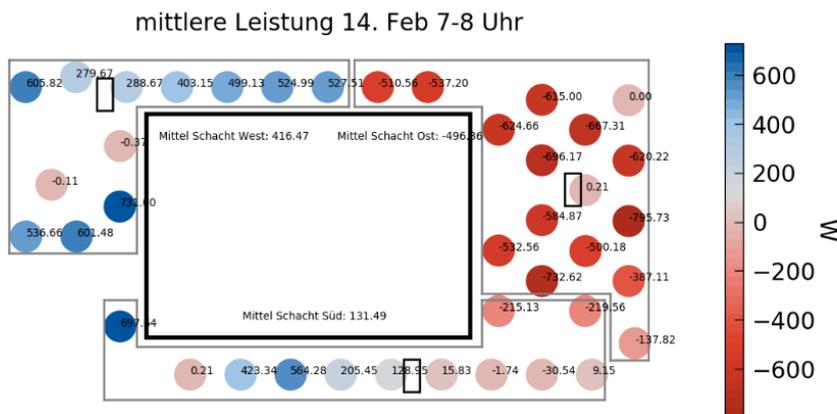


Abb. 14: Mittlere Leistung der Sonden am 14. Februar zwischen 7 und 8 Uhr

Zusammenfassend werden damit folgende Probleme im Geothermiefeldbetrieb festgehalten: fehlender hydraulischer Abgleich, unausgeglichene Energiebilanz, unterschiedliche Heiz- und

Kühlpotenziale der einzelnen Schächte und Sonden, häufig wechselnder Betrieb in den Übergangszeiten und fehlende Betrachtung der elektrischen Pumpleistung.

## **5. Ansätze zur Betriebsverbesserung und aktuelle Forschungsthemen**

Ausgehend von diesen Ergebnissen lassen sich verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Betriebs ableiten.

An erster Stelle ist der hydraulische Abgleich der Sonden zu nennen. Dieser ist dynamisch zu implementieren, um auf ein Zu- oder Abschalten einzelner Sonden reagieren zu können. Darauf aufbauend ist eine bedarfsgerechte Regelung der hydraulischen Pumpe sinnvoll. Hier ist denkbar, den Volumenstrom bei einer geringen thermischen Leistung des Feldes zu reduzieren. Bei einem ausreichend großen Abstand zwischen Eintritts- und Erdreichtemperatur lässt sich so die Temperaturspreizung bei einer reduzierten Pumpleistung erhöhen. Dies ist insbesondere im Kühlbetrieb vorteilhaft, da sich hier elektrische Pumpleistung einsparen lässt. Im Heizbetrieb müsste die Wärmepumpe die höhere Temperaturspreizung kompensieren. Daher ist im Heizbetrieb ein vorsichtiges Abwägen zwischen eingesparter hydraulischer Leistung und Zusatzverbrauch der Wärmepumpe nötig.

Das Verhältnis zwischen Kälte- und Wärmebedarf des Gebäudes ist nicht beeinflussbar. Um die Auswirkungen der nicht ausgeglichenen Energiebilanz abzumildern, ist vorstellbar das Feld als wechselseitigen Speicher zu betreiben. Schacht Ost wurde durch den bisherigen Betrieb stärker aufgeheizt als die anderen beiden Schächte. Durch eine geeignete wechselseitige Strategie ist es möglich das Niveau der drei Schächte wieder anzugleichen. Schacht Ost könnte beispielsweise vorerst alleine die Heizenergie bereitstellen, um diesen vor dem gleichmäßigen Betrieb herunter zu kühlen.

Da die Sonden einzeln ansteuerbar sind, ist zudem denkbar die Sonden nach Heiz- und Kühlverhalten zu Clustern. So wird ermöglicht, Wechsel zwischen Heiz- und Kühllast durch intelligentes Ansteuern der Sonden (-Cluster) zu vollziehen, ohne dass Teile des Feldes die Gesamtleistung negativ beeinflussen. Des Weiteren könnte das Gebäudeenergiesystem durch eine Luft-Wasser-Kältemaschine erweitert werden, welche einen Teil des Kühlbedarfs übernimmt. Durch die Verwendung einer prädiktiven Regelung des Energiesystems lässt sich außerdem die Anzahl der Wechsel zwischen Heiz- und Kühlfall reduzieren, da vorrausschauend auf wechselnde Bedarfe reagiert werden kann. Durch den Einbezug von Wetter und Strompreisvorhersagen wird darüber hinaus eine Steigerung der Energieeffizienz, eine Senkung der Energiekosten, sowie die Nutzbarmachung des Gebäudeenergiesystems für Netzdienste ermöglicht. In einer ersten Studie wurde gezeigt, dass sich durch eine prädiktive Strategie zudem der langfristig nachhaltige Betrieb des Geothermiefelds sicherstellen lässt (Baranski et al. 2019). Um die Potentiale und Auswirkungen der genannten Strategien fundiert zu bewerten, werden in laufenden Projekten die gesammelten Daten im Zusammenspiel mit verschiedenen Simulationswerkzeugen verwendet. Das technische Fundament für diese Untersuchungen und die spätere Implementierung in das reale System wurde durch die präsentierte Cloudplattform bereits gelegt. In der Regel werden Geothermiefelder nicht so hochaufgelöst überwacht wie in diesem Forschungsobjekt. Die verwendeten Sensoren sind jedoch vergleichsweise einfach nachrüstbar, wodurch sich die Erkenntnisse auch auf andere Felder übertragen lassen. Aus diesem Grund werden aus den Ergebnissen der Studien zudem allgemeingültige Handlungsempfehlungen zur Verbesserung des Betriebs oberflächennaher Geothermiefelder abgeleitet.

## **6. Endergebnis**

Das Geothermiefeld des E.ON Energieresearch Centers in Aachen leistet einen entscheidenden Beitrag zur nachhaltigen Klimatisierung des Gebäudes. Darüber hinaus wird es in aktuellen Forschungsprojekten als Demonstrator verwendet. Aus diesem Grund ist das Feld mit

umfangreicher Mess- und Regeltechnik ausgestattet. Eine am Lehrstuhl für Raum- und Gebäudeklimatechnik entwickelte Monitoring Plattform ermöglicht es, das Feld in Echtzeit zu überwachen und komplexe daten- und modellbasierte Betriebsstrategien für das gesamte Energiesystem zu entwickeln. Die Auswertung der Betriebsdaten von Juli 2018 bis Juli 2019 zeigt, dass das Feld überwiegend zum Kühlen verwendet wird. Aus diesem Grund hat es sich bereits stellenweise aufgeheizt. Des Weiteren wird deutlich, dass die einzelnen Sonden teilweise sehr unterschiedliches Heiz- und Kühlverhalten aufweisen. Liegt die Vorlauftemperatur im Bereich der Untergrundtemperatur, liefern daher einige Sonden einen, der aktuellen Betriebsstrategie entgegenwirkenden Wärmestrom. Zukünftig wird daher untersucht inwieweit sich das Feld als wechselseitiger Speicher mit gezielter Ansteuerung der einzelnen Sonden betreiben lässt und ob sich eine Effizienzsteigerung und nachhaltigere Nutzung durch prädiktive Betriebsstrategien erzielen lässt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden verwendet, um allgemeine Betriebsstrategieempfehlungen für oberflächennahe Geothermiefelder aufzustellen.

*Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Förderkennzeichen 03ET1552B.*

### **Quellenangaben**

- BARANSKI, M., STOFFEL, P., KÜMPEL, A., STILLER, M., STOREK, T., SCHUHMACHER, M., MÜLLER, D. (2019): Distributed model predictive control of building energy systems coupled to geothermal fields: CISBAT: Climate Resilient Cities - Energy Efficiency & Renewables in the Digital Era 2019.
- BODE, G., FÜTTERER, J., MÜLLER, D. (2018): Mode and storage load based control of a complex building system with a geothermal field. In: *Energy and Buildings* 158, S. 1337–1345.
- FÜTTERER, J., CONSTANTIN, A., SCHMIDT, M., STREBLOW, R., MULLER, D., KOSMATOPOULOS, E. (2013): A multifunctional demonstration bench for advanced control research in buildings— Monitoring, control, and interface system: IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 11/10/2013, S. 5696–5701.
- MICHALSKI, A., KLITZSCH, N. (2018): Temperature sensor module for groundwater flow detection around borehole heat exchangers. In: *Geothermal Energy* 6 (1), S. 149.
- MÜLLER, D.; CLAUSER, C.; STINNER, F.; MICHALSKI, A.; FÜTTERER, J. (2017): Exergetisch optimierte Betriebsführung der Wärme- und Kälteversorgung eines Gebäudes unter Nutzung eines dynamischen Regelungssystems und flexibler Einbindung eines vollständig überwachten Erdwärmesondenfeldes Endbericht. [RWTH Aachen University, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate].
- PARK, H., LEE, J., KIM, W., KIM, Y. (2012): Performance optimization of a hybrid ground source heat pump with the parallel configuration of a ground heat exchanger and a supplemental heat rejecter in the cooling mode. In: *International Journal of Refrigeration* 35 (6), S. 1537–1546.
- ROSEN, M. (HRSG.) (2018): *Geothermal energy*. John Wiley & Sons, [Place of publication not identified].
- STOREK, T., LOHMÖLLER, J., KÜMPEL, A., BARANSKI, M., MÜLLER, D. (2019): Application of the Open-Source Cloud Platform FIWARE for Future Building Energy Management Systems: CISBAT: Climate Resilient Cities - Energy Efficiency & Renewables in the Digital Era 2019.

Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52074 Aachen  
phillip.stoffel@eonerc.rwth-aachen.de