



# TU Clausthal

## DSC

Drilling Simulator Celle

## Jahresbericht 2022/2023 des Drilling Simulators Celle (DSC)



Jahresbericht 2022/2023  
des Drilling Simulators Celle (DSC)

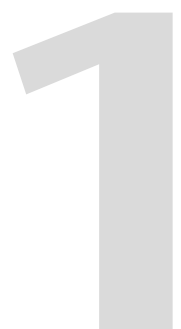
# Inhalt

1. Entwicklung des Drilling Simulators Celle (DSC) .....	4
2. Geschäftsbericht und Infrastruktur .....	8
3. Strategiebildende Forschungsprojekte in den Jahren 2022/2023.....	14
OBE: Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation.....	16
GeoTWIN: Tiefengeothermie zur Wärmeversorgung in Norddeutschland – Studie zu neuen Konzepten zur Risikominimierung beim Aufschluss geothermaler Reservoirs .....	23
GeoTES: Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in tiefen Aquiferen (Georeservoirs) im Rahmen der „Wärmewende 2030“ .....	26
OBS: Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch .....	28
OBF: Optimierung und Feldertüchtigung eines mit Spülung betriebenen Bohrhammers.....	34
Modellierung und numerische Berechnung des Mehrphasentransports in der Tiefbohrtechnik .....	38
Umlaufprüfstand mit variabler Neigung zur Charakterisierung des Bohrkleintransports ....	42
Geschlossene mitteltiefe Geothermiesysteme für die dezentrale Wärmeversorgung .....	44
4. Wissenstransfer in die Praxis.....	47
Für die Fachkräfte von morgen – Einbindung des Drilling Simulators in die Lehre der TU Clausthal .....	48
Wissenstransfer in die Praxis und zurück – Die Celle Drilling Conference .....	50
Tag der offenen Tür.....	52
5. Schlaglichter .....	55
6. Anhang.....	59





# ENTWICKLUNG DES DRILLING SIMULATORS CELLE (DSC)



## Liebe Leser:innen,

ich freue mich, dass Sie unseren Jahresbericht 2022/2023 in den Händen halten. In diesem möchten wir wieder einen Einblick in unsere Forschungsprojekte und Aktivitäten geben, in die unsere Mitarbeiter:innen am Forschungszentrum Drilling Simulator Celle (DSC) ihr Wissen, ihre Erfahrung und viel Herzblut gesteckt haben. Der Berichtszeitraum umfasst die Jahre 2022 und 2023.

Der Grundstein für den Drilling Simulator Celle wurde bereits 2013 gelegt. Mit dem Ziel, die disziplinenübergreifenden Forschungsaktivitäten des niedersächsischen Forschungsverbunds "Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik-gebo" zu verstetigen, wurde der DSC als neue Forschungsstelle unter dem Dach des damaligen Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) gegründet. Seit dem Jahr 2018 ist der DSC eines der eigenständigen Forschungszentren der Technischen Universität Clausthal. Derzeit arbeiten 14 Personen am DSC oder in standortübergreifenden Projekten mit dem DSC.

Die Energiewende in Deutschland ist beschlossene Sache und in vollem Gange. Fossile Kraftstoffe werden schrittweise durch erneuerbare Energien ersetzt. Auch am Drilling Simulator Celle setzen wir uns dafür ein, unseren Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten. Der Wärmesektor macht rund 56 % des nationalen Energiebedarfs aus, womit die energie- und volkswirtschaftliche Bedeutung des anstehenden Transformationsprozesses unterstrichen wird und zugleich die Tatsache, dass Energiewende zugleich Wärmewende bedeutet. Dies spiegelt sich auch in den Projekten wieder, die am Drilling Simulator Celle bearbeitet werden. Zunehmend werden hier Themen für uns relevant, die über die eigentliche Tiefbohrtechnik hinausgehen, auch wenn letztere eines der Schlüsselthemen bleiben wird.

Um die Wärmewende zu realisieren, werden innovative und spezifisch an die regionalen Gegebenheiten angepasste Techniken benötigt, um wirtschaftlich, umweltgerecht und nachhaltig den geologischen Untergrund energetisch nutzen zu können. Dies umfasst zunächst die grundlastfähige Geothermie, d.h. die Entnahme von Wärme aus unterschiedlichen Tiefen. Dazu gehört aber auch die Speicherung von Wärme, z.B. um saisonale Überangebote von Energie der stark fluktuierenden erneuer-

baren Energien zu kompensieren. Dies betrifft auch die Speicherung von Medien, wie etwa von CO<sub>2</sub> im Kontext der Dekarbonisierung oder von Wasserstoff. Für Niedersachsen im Besonderen ist zunehmend die Nachnutzung einer Vielzahl von Bohrungen aus der Erdöl- und Erdgasförderung von Interesse.

Der Forschungsansatz des Drilling Simulator Celle umfasst die Beschreibung und Optimierung der komplexen thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelten Prozesse bei der Realisierung und Nutzung von Tiefbohrungen. Dies betrifft die Prozesse beim Bohrvorgang selber aber auch die Vorgänge in der geologischen Formation im Nahbereich der Bohrung und deren Auswirkung auf Vorgänge in der anschließenden Produktionsphase. Ein tiefgreifendes Verständnis dieser Phänomene ist von entscheidender Bedeutung, um die inhärenten technischen, umweltrelevanten und auch wirtschaftlichen Risiken sicher beherrschen zu können. Dies erfolgt durch mathematische Modelle und numerische Berechnungsverfahren sowie durch realitätsnahe Experimente und Messungen im Technikum des Drilling Simulator Celle. Die Forschungsprojekte werden zunehmend in Kooperation mit weiteren Akteuren an der TU Clausthal und weiteren Forschungseinrichtungen und Unternehmen durchgeführt. Auf diese Weise wird zusätzliche Expertise, etwas im Bereich der Geologie, Verfahrenstechnik bis zur Energiesystemtechnik in den Projekten integriert, was den systemischen Anspruch der Projekte am DSC unterstreicht.

In den vergangenen beiden Jahren konnten einige der strategischen und strukturbildenden Großprojekte am DSC abgeschlossen werden. Dies ist zum einen das Projekt „OBS: Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch“, in dem der Funktionsumfang der experimentellen Ausstattung des DSC substantiell erweitert wurde. Dieses Projekt hatte zum Ziel, Bohrversuche mit gezielt überlagerten axialen und torsionalen Schwingungen durchzuführen. Damit können die dynamischen Prozesse im Bohrstrang realistischer als bisher möglich abgebildet werden. Mit dieser Anlage besitzt der DSC ein internationales Alleinstellungsmerkmal. Ebenfalls abgeschlossen wurde das Projekt „OBE: Optimierung der Bohroperationen für

Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation“, im Rahmen dessen der Softwaresimulator ausgebaut wurde. Beide Großprojekte wurden unter Leitung des damaligen Leiters des DSC, Prof. Joachim Oppelt, in der Zeit von 2016 bis 2023 durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) finanziell unterstützt.

Die transferorientierten Themen zur Bohrungs-optimierung werden seit Sommer 2023 fortgesetzt in dem ebenfalls vom BMWK geförderten Verbundprojekt „OBF: Optimierung und Feldertüchtigung eines mit Spülung betriebenen Bohrhammers“. Dieses verfolgt das Ziel, die Herstellungskosten von Tiefbohrungen für Geothermie, insbesondere in Hartgestein, durch Einsatz eines am Institute of Subsurface Energy Systems der TU Clausthal neu entwickelten Bohrhammers zu reduzieren. Die Weiterentwicklung und experimentelle Validierung dieses Prototypen wird in den kommenden Jahren in Celle erfolgen.

Mit dem Ziel, den Funktionsumfang der experimentellen Anlagen zu erweitern, wurde das Projekt „GeoInnoSens: Innovative Sensor- und Messtechnik für Geothermiebohrungen“ durchgeführt. Finanziert aus Mitteln der niedersächsischen Regionalförderung (EFRE – Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung) wurden ultraschallbasierte Sensor- und Messtechniken für die Analyse von mehrphasigen Transportvorgängen (flüssig-fest-gasförmig) im Fluidkreislauf für Anwendungen in der Tiefbohrtechnik angepasst und erprobt.

Mit dem Projekt „GeoTWIN: Tiefengeothermie zur Wärmeversorgung in Norddeutschland – Studie zu neuen Konzepten zur Risikominimierung beim Aufschluss geothermaler Reservoirs“, das zum Jahresbeginn 2021 startete und ebenfalls aus EFRE-Mitteln finanziert wurde, wurden neue Konzepte zur Risikominimierung beim Aufschluss geothermaler Reservoirs untersucht. Der Fokus des Projekts lag auf der theoretischen Erforschung der Gewinn- und Speicherbarkeit von Erdwärme aus Tiefen bis 1.700 Meter im norddeutschen Becken mit hohen Salzgehalten und hoher Gasbeladung in Untergrundwässern am Beispiel eines konkreten Standortes im Raum Hannover/Burgwedel.

Basierend auf den Ergebnissen aus „GeoTWIN“ wurde mit dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung auf drei Jahre geförderten Projekt „GeoTES: Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in

tiefen Aquiferen (Georeservoirs) im Rahmen der Wärmewende 2030“ ein weiteres interdisziplinäres Vorhaben initiiert, in dem – neben der Bohrtechnik – der systemische Gedanke im Vordergrund steht. Das Projekt wird zusammen mit weiteren Partnern an der TU Clausthal, der Georg-August-Universität Göttingen und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft Wolfenbüttel durchgeführt. Das GeoTES-Projekt verfolgt das Ziel, ebenfalls am Beispiel der Lagerstätte im Raum Hannover/Burgwedel, ein mathematisches Modell eines optimierten ober- und untertägigen Wärmesystems und dessen Einbindung in Wärme- und Stromnetze zu entwickeln. Im Teilprojekt der TU Clausthal/Drilling Simulator werden die bohrlochnahen Prozesse modellbasiert untersucht, um beispielweise den Einfluss der Komplettierung einer Bohrung auf den Betrieb eines geothermalem Wärmetauschers zu quantifizieren.

Ebenfalls grundlagenorientiert ist das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Vorhaben „OBGrit: Modellierung und numerische Berechnung des mehrphasigen Transports in der Tiefbohrtechnik“, in dem die Modellierung des Bohrkleintransports weiterentwickelt wird. Mittels moderner numerischer Methoden werden mehrphasige Strömungen aus nicht-Newtonschen Flüssigkeiten mit Partikeln berechnet, um abgeleitete Erkenntnisse in technischen Modellen zu aggregieren, die im Softwaresimulator des DSC integriert werden können. Ergänzt wird dieses Projekt seit diesem Jahr durch ein experimentelles Vorhaben, welches durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur und dem Industriepartner Baker Hughes INTEQ GmbH finanziert wird. Das Gesamtziel des Projekts „FLVI: Umlaufprüfstand mit variabler Neigung zur Charakterisierung des Bohrkleintransports“ besteht darin, durch experimentelle Untersuchungen ein besseres Verständnis der komplexen mehrphasigen Transportprozesse bei Bohrungen zu erlangen. Die gewonnenen experimentellen Daten werden einerseits zur Validierung numerischer Berechnungen verwendet, andererseits werden die Daten in aggregierter Form genutzt, um den Spülungsprozess im Softwaresimulator am DSC abbilden zu können.

Über die vorgenannten und weitere Aktivitäten des Drilling Simulators Celle berichten wir ausführlicher in dem nun vorliegenden Jahresbericht.

Prof. Dr.-Ing. habil. Gunther Brenner  
Wissenschaftlicher Leiter des DSC







# GESCHÄFTSBERICHT UND INFRASTRUKTUR

2.

## Geschäftsbericht 2022/2023

Die Jahre 2022 und 2023 standen im Zeichen des Abschlusses strategiebildender Vorhaben zur Erweiterung der Funktionalität der Hardware- und Software-Simulatoren des DSC und der inhaltlichen Weiterentwicklung der Forschungsagenda. In diesem Zuge wurde auch die personelle Basis der (zukünftig) am DSC tätigen Wissenschaftler:innen weiter verstärkt.

Mit dem Abschluss der beiden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekte „Optimierung des Bohrfortschrittes für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch (OBS)“ sowie „Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation (OBE)“ konnte der Funktionsumfang der beiden Großanlagen des DSC deutlich erweitert werden. So wurde im OBS-Projekt der Hardware-Simulator um eine Vorrichtung zum Einprägen dynamischer Schwingungen in den

Bohrstrang sowie um eine neue Gesteinskammer erweitert, welche eine Nachbildung der Umgebungsparameter Gebirgsdruck und Temperatur sowie eine verlängerte Bohrstrecke von nunmehr 5 Metern ermöglicht. Im Rahmen des OBE-Projekts wurde der Software-Simulator u.a. um eigenentwickelte Modelle, beispielsweise zum Wärmetransport im Untergrund, erweitert.

Mit seiner komplett erneuerten technischen Basis ermöglicht der Tiefbohrsimulator zukünftig die Verarbeitung eigenentwickelter Modelle mit deutlich höherem Komplexitätsgrad. Mit den skizzierten Funktionserweiterungen wurden beide Simulatoren in die Lage versetzt, die hochkomplexen Tiefbohrprozesse sowohl experimentell als auch simulativ deutlich realistischer abzubilden; somit wird auch eine erhöhte Validität der wissenschaftlichen Ergebnisse erwartet.

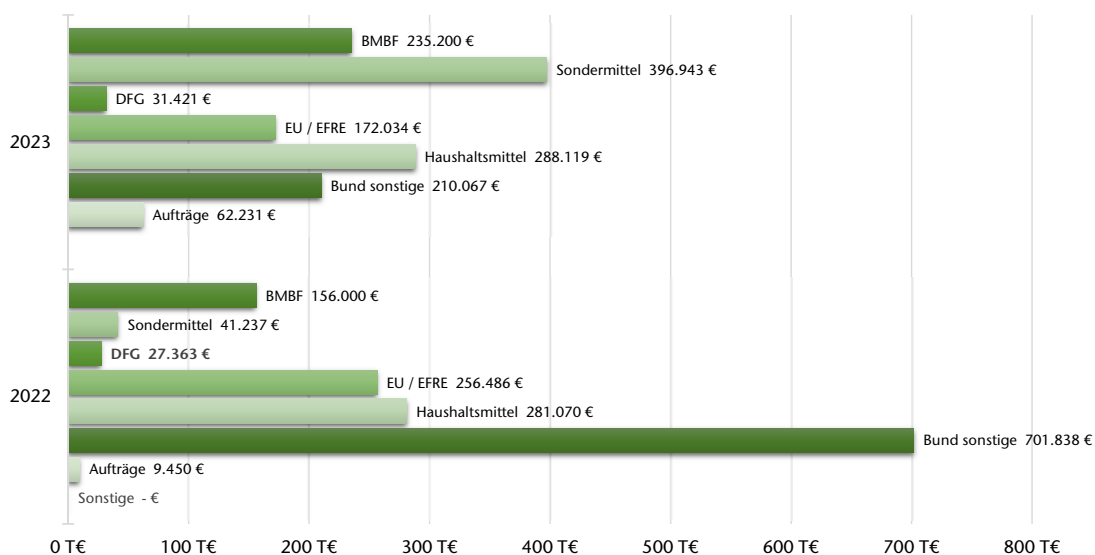
Parallel zur Weiterentwicklung des Hardware-Simulators wurden auch die experimentellen



Messmethoden weiterentwickelt. Mit Mitteln der Niedersächsischen EFRE-Förderung als Teil der Reaktion der Union auf die COVID-19-Pandemie im Rahmen des Projekts „GeolnoSens – Innovative Sensor- und Messtechnik für Geothermiebohrungen“ eine innovative ultraschallbasierte Sensor- und Messtechnik im Strömungskreislauf des Hardware-Simulators implementiert und seitdem im Rahmen weiterer Vorhaben weiterentwickelt. Das System ermöglicht die Quantifizierung mehrphasiger Transportvorgänge (flüssig-fest-gasförmig) im Fluidkreislauf, um auf diese Weise zeitaufgelöste Informationen über die räumliche Konzentrationsverteilung von Feststoffpartikeln und einer Gasphase in der Strömung liefern zu können. Dabei kommen Technologien zum Einsatz, die den harschen Bedingungen in einem Bohrloch (Druck, Temperatur, Fluideigenschaften) Stand halten.

Die in den vergangenen Jahren verfolgte Weiterentwicklung der Forschungsagenda des DSC spiegelt sich im zurückliegenden Berichtszeitraum erstmals in einer deutlich diverseren Herkunft der Drittmittel wider. So ist es u.a. gelungen, wieder Mittel der niedersächsischen EFRE-Förderung zum weiteren Ausbau der Infrastruktur sowie Kooperationsprojekte mit Unternehmen und flankierender öffentlicher Förderung einzuwerben. Der deutliche positive Trend im Bereich der Auftragsforschung wird sich erwartungsgemäß in den kommenden Jahren fortsetzen.

Perspektivisch verfolgt der DSC auch weiterhin die programmatische Zielsetzung, jeweils zu einem Drittel Forschungsprojekte der Grundlagenforschung, der transferorientierten Forschung sowie der Auftragsforschung für Unternehmen und Institutionen durchzuführen.



Der Drilling Simulator Celle verfügt derzeit über eine geplante jährliche Grundfinanzierung aus Haushaltsmitteln der TU Clausthal von gut 280.000 € pro Jahr für Personal- und Sachmittel.

Die Abbildung zeigt die Zusammensetzungen der Budgets in den Jahren 2022 und 2023 auf.

## Vorstand des DSC



Gunther Brenner,  
Vorstandsvorsitzender



Joachim Oppelt



Martin Sauter



Leonhard Ganzer



Lydia Rosandic,  
Vertreterin MTV-  
Personal



Lisette Hayn,  
Vertreterin wiss.  
Personal

## DSC-Team 2022/2023

### Service



Jens-Peter  
Springmann,  
Administrativer  
Geschäftsführer



Michael Koppe,  
Teststandleiter

### Forschung



Mohammed  
Al-Eryani



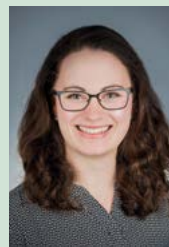
Harits Jundullah  
Alkatiri



Patrick  
Höhn



Wolfgang  
Hollstein



Katrin  
Skinder



Devanand  
Yadav



Lydia Rosandic,  
Verwaltung



Yannis Beiser,  
Technik



Ralf Gustmann,  
Technik



Michael  
Bannenberg



Erik  
Feldmann



Rodrigue  
Freifer



Lisette  
Hayn



Ke  
Li



Shahab  
Mohammadi



Ralph  
Peitz



Khizar  
Shahid





# STRATEGIEBILDENDE FORSCHUNGSPROJEKTE IN DEN JAHREN 2022/2023

3.

# OBE: Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation

## Kurzfassung

Geothermische Energie kann einen wichtigen und vor allem zuverlässigen und unterbrechungsfreien Beitrag zur Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Quellen leisten. Im Vergleich zu Bohrungen auf Öl und Gas liegen im Fall der Geothermie erst relativ wenig Erfahrungen vor, was grundsätzlich zu einer unerwünschten Kostenerhöhung führt. Abhilfe schaffen kann eine optimale Planung. Ziel des vorliegenden Projekts ist die Schaffung eines Simulators, mit dem kritische Bohrungen realistisch und in Echtzeit geplant werden können, auch in der Betriebsweise als digitaler Zwilling. Den Ausgangspunkt bildete hier der Trainingssimulator DrillsIM:600 des englischen Herstellers Drilling Systems. Dieser ist u.a. mit 8 Großbildschirmen zur Visualisierung des Bohrverlaufs, einem „Cyber Chair“ und einer API (Application Programming Interface) Workstation ausgestattet. Das System ist per se auf das Training von Bohrarbeitern an dem überträgigen Bohrgerät ausgerichtet. Die implementier-

ten Algorithmen zur Beschreibung des untertägigen Bohrvorgangs sind nur sehr rudimentär und unrealistisch ausgebildet. Die wesentliche Aufgabe im Projekt bestand in der Schaffung und Implementierung neuer Modelle, die den Bohrprozess realistisch abbilden. Im Projektverlauf wurden dazu sowohl physikalische als auch empirische Modelle entwickelt, letztere auf Basis von Verfahren des maschinellen Lernens und künstlicher Intelligenz. Bevor diese Modelle, wie beispielsweise der Bohrfortschritt, in die DrillsIM:600 implementiert werden konnten, war eine erhebliche Aufwertung des vorhandenen Simulators erforderlich. Neben einer fast komplett neuen Hardware musste insbesondere die Kern-Software der Maschine völlig neu aufgebaut werden. Nur so gelang es, die für die Integration der neuen Modelle erforderlichen Eingabe- und Ausgabeschnittstellen am API zu schaffen. Die Modelle mussten u.a. dahingehend optimiert werden, dass sie in Echtzeit, oder sogar beschleunigt, gleichzeitig am Simulator ablaufen können. Die Integration einer echten Bohranlage wurde durch Einbe-

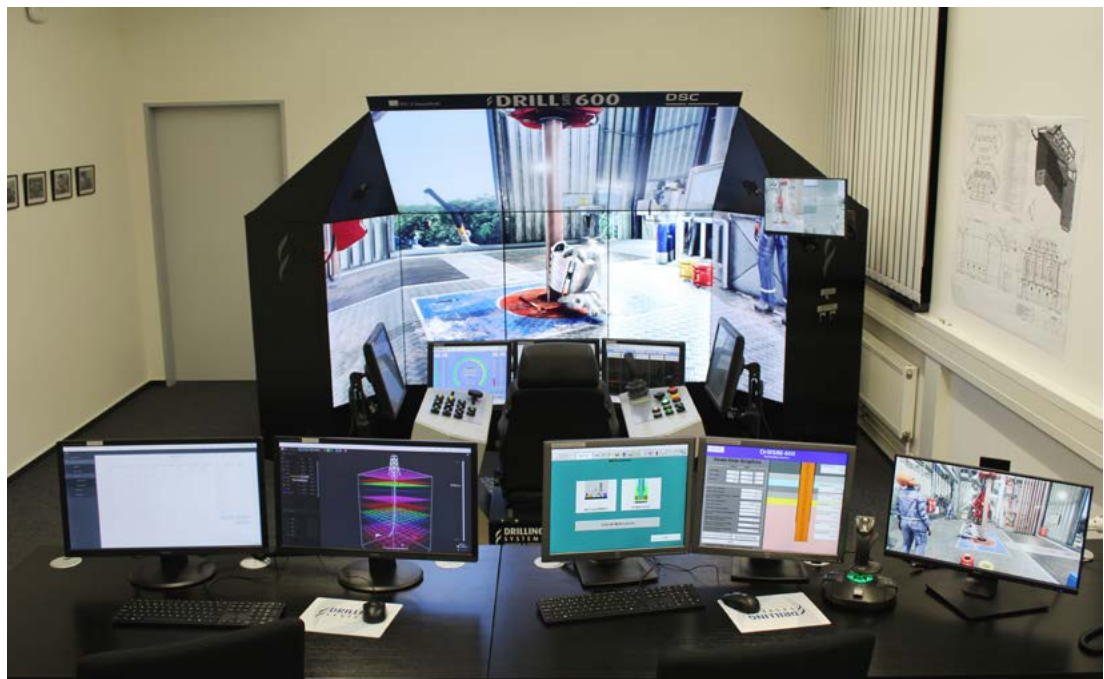


Abbildung 1: Software-Simulator DrillsIM:600 mit API Workstation und Trainer Station.



ziehung des Hardware-Bohrversuchsstands in den Datenfluss des Simulators erprobt. Dazu war die Adaption einer OPC-UA Schnittstelle erforderlich, die in der Bohrindustrie häufig im Feld eingesetzt wird. Die Bearbeitung des inzwischen abgeschlossenen Projekts erfolgte in einem interdisziplinären Team von Bohrentechnik-, Maschinenbau- und Softwareingenieuren.

## Abstract

Geothermal energy can make an important and reliable as well as uninterrupted contribution for the transition to renewable energies. Compared to oil and gas wells, in the case of geothermal drilling only little experience exists, which causes excessive costs. Optimal planning can help to mitigate this. It is the goal of this project to establish a simulator, which can plan critical wells realistically and in real-time, also used in a functionality as a digital twin. The base has been a slightly modified commercial training simulator, DrillsIM:600, by Drilling Systems Ltd., UK. It is comprised, among others, by 8 large size flat screens for visualization of the drilling trajectory, a "Cyber Chair", and an API (Application Programming Interface) workstation. The system focus is on the training of rig crew members working in surface installations. The algorithms implemented to describe the underground drilling process are very rudimentary and unrealistic. The main task in the project was to create and implement new models that realistically depict the drilling process. During the course of the project, both physical and empirical models were developed, the latter based on machine learning and artificial intelligence methods. Before these models, such as the rate of penetration, could be implemented into DrillsIM:600, a significant upgrade of the existing simulator was required. In addition to almost completely new hardware, the machine's core software in particular had to be completely rebuilt. This was the only way to create the input and output interfaces on the API required to integrate the new models. The models had to be optimized, among other things, so that they could run in real time, or even accelerated, simultaneously on the simulator. The integration of a real drilling rig was tested by including the DSC's hardware drilling test stand in the data flow of the simulator. This required the adaptation of an OPC-UA interface, which is often used in the field in the drilling industry. The project, which is concluded meanwhile, has been run by an interdisciplinary team of drilling technology, mechanical and software engineers.

## Einleitung und Projekthintergrund

Die (Vorab-) Simulation des Bohrprozesses charakterisiert in Kurzform das zentrale Forschungsthema des Drilling Simulator Celle (DSC). Von der Nutzerseite zielen die Forschungsarbeiten fokussiert auf die Energiegewinnung durch Geothermie, wobei Erdöl, Erdgas und Untertage-Speicherung weitere Anwendungen darstellen. Gerade aber in der Geothermie sind die Bohrkosten besonders kritisch für die Realisierung eines Projekts. Realistische Simulation soll bessere Bohrplanung ermöglichen und Gesteungskosten spürbar verringern. Der DSC betreibt Simulation auf zwei Ebenen, dem Hardware-Simulator und dem Software-Simulator. Letzter bildet die Plattform für das F&E-Projekt „Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation“ (OBE). Bei dem Software-Simulator handelt es sich zunächst um einen Training-Simulator der Fa. Drilling Systems (UK) Ltd. Das vom DSC angeschaffte Modell DrillsIM:600 ermöglicht mit 8 Bildschirmen die realistische Visualisierung der Handhabungsvorgänge auf einer Bohrplattform. Dabei wird zwar auch auf die im Untergrund stattfindenden Bohrvorgänge Bezug genommen. Entsprechende Simulationsalgorithmen sind aber sehr rudimentär und Bohrparameter können nicht flexibel genug variiert werden. Der Simulator am DSC verfügt über eine spezielle Schnittstelle, über die die Wissenschaftler selbst-programmierte Software in die Echtzeit-Abläufe an der DrillsIM:600 integrieren können. Im Rahmen des OBE-Projekts werden dazu Algorithmen und entsprechende Software-Programme geschaffen und in den Simulator eingebunden.

## Projektziele und Entwicklungsschwerpunkte

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, ein Werkzeug für die realistische Planung von Geothermiebohrungen zu schaffen. Dazu müssen zunächst die Fähigkeiten des vorhandenen Software-Simulators für die neue Aufgabenstellung des Echtzeit-Szenariobohrens signifikant erweitert werden.

Die grundlegenden Anforderungen hierzu sind:

- Automatisierte Eingabe von Daten aus bestehenden Bohrungen und Plandaten zukünftiger Bohrungen
- Entwicklung von Algorithmen, Modellen und Software zur realistischen Beschreibung des Bohrprozesses
- Simulation der modellierten Phänomene in

		Q2/2019	Q3/2019	Q4/2019	Q1/2020	Q2/2020	Q3/2020	Q4/2020	Q1/2021	Q2/2021	Q3/2021	Q4/2021	Q1/2022	Q2/2022	Q3/2022
TP1	<b>Datenbeschaffung und Implementierung vorhandener Bohrungen im Simulator</b>														
	AP 1-1 Beschaffung von Daten verfügbarer Bohrungen														
	AP 1-2 Aufbereitung und Formatierung der Daten für spätere Analyse und Eingabe in Simulator														
	AP 1-3 Überführen von Daten in ausgelagerte Datenbank														
TP2	<b>Datenanalyse und Modellierung</b>														
	AP 2-1 Ableitung empirischer Modelle aus Messdaten														
	AP 2-2 Entwicklung physikalischer Modelle														
	AP 2-3 Validierung und Evaluation der Modelle mittels Messdaten														
TP3	<b>Entwicklung der echtzeitfähigen Simulator-Modelle</b>														
	AP 3-1 Ertüchtigung der API für erweiterte Anforderungen														
	AP 3-2 Vereinfachung von Modellen zur Echtzeit-Fähigkeit														
	AP 3-3 Implementierung und Validierung der Echtzeit-Modelle durch neu erstellte Testzenarien														
TP4	<b>Simulations-Anwendung für neues Geothermieprojekt</b>														
	AP 4-1 Vorbohren des Bohrloches für Optimierung und Training														
	AP 4-2 Parallele Simulation während laufendem Bohrbetrieb														

Abbildung 2: Geplanter zeitlicher Ablauf der Teilprojekte.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

OBE: Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Förderkennzeichen: 03EE4005

Projektlaufzeit: 01.05.2019 – 31.07.2023

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt

### Projektkoordinator:

Harits Alkatiri, M.Sc.

### Projektbearbeiter:innen

Harits Alkatiri, M.Sc.; Patrick Höhn, M.Sc.; Shahid Kiza, M.Sc.; Waquar Hassan, M.Sc.; Dr.-Ing. Mostafa Abdelhafiz; Dr.-Ing. Lisette Hayn



Joachim Oppelt



Harits Alkatiri

Echtzeit zur Optimierung der Bohrplanung und zum Training mittels Vorbohrns geplanter Bohrungen

Nach dem Stand der Technik gibt es bei anderen Forschungsstellen keine bestehenden Konzepte für diesen umfassenden Ansatz. Der Balkenplan nach Abbildung 2 stellt den zum Projektbeginn geplanten zeitlichen Verlauf der Teilprojekte dar. Im Verlauf der Arbeiten hat der Mittelgeber eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 31.07.2023 gewährt.

Im Folgenden werden die Teilprojekte erläutert.

### TP 1 Datenbeschaffung und Implementierung vorhandener Bohrungen im Simulator

Die Schaffung einer Datenbasis stellt die Voraussetzung für die Entwicklung smarter Modelle dar. Bereits im Vorfeld des Projektes wurden die Daten der Genesys-Bohrung in Hannover-Buchholz von der BGR zur Verfügung gestellt und nach der erforderlichen Aufbereitung in den Simulator eingegeben. Hiermit konnte grundsätzlich nachgewiesen werden, dass die Daten aus bereits abgeteuften Bohrungen vom System aufgenommen und verarbeitet werden können. Darüber hinaus ist im Rahmen des Projekts die aktuelle Datenbasis durch die Beschaffung von Daten weiterer Bohrungen erheblich zu erweitern. Der Projekterfolg hängt maßgeblich von der Möglichkeit zur Beschaffung von Bohrdaten ab. Zusätzlich könnten auch Daten aus experimentellen Untersuchungen am Hardware-Simulator des DSC für die späteren Arbeitsschritte verwendet werden.

### TP 2 Datenanalyse und Modellierung

Zur Simulation der Vorgänge im Bohrloch ist es geboten, die physikalischen Phäno-

mene mittels mathematischer Formulierungen zu beschreiben. In diesem Teilprojekt liegt der Schwerpunkt auf einer sorgfältigen Analyse der Beispieldaten und darauf basierend, der Entwicklung physikalischer und empirischer Algorithmen und Modelle. Hierbei ist auch die intensive Verwendung von Techniken des maschinellen Lernens vorgesehen, wie z. B. „Deep Learning“ (Optimierungsmethoden künstlicher neuronaler Netze), Künstliche Neuronale Netze oder auch Gauß-Prozesse (stochastische Prozesse).

### TP 3 Entwicklung der echtzeitfähigen Simulator-Modelle

In diesem Teilprojekt erfolgt die Implementierung der vorher erstellten Modelle im Software-Simulator des DSC. Dazu wird die Entwicklungsumgebung bzw. Schnittstelle zum Kern des Software Simulators vom Gerätehersteller Drilling Systems zur Verfügung gestellt. Hiermit wird definiert, welche Eingabe- und Ausgabeparameter möglich sind. Da für einige Parameter der zu erstellenden Modelle derzeit noch keine Zugriffsmöglichkeit zur Verfügung steht, sollen diese im Rahmen des Forschungsprojekts durch den Hersteller Drilling Systems im Auftrag entwickelt werden.

### TP 4 Simulations-Anwendung für neues Geothermieprojekt

In der ersten Phase eines geplanten Geothermie-Bohrprojektes können die Trajektorie-Planungsdaten aus einer Bohrplanungssoftware und die Lithologie an der Lokation in den Software-Simulator eingegeben werden. Auf dieser Basis werden dann mögliche kritische Szenarien erstellt und mit der Drill-SIM:600 simuliert sowie Strategien zur Optimierung entwickelt. Dies können u.a. Änderungen der Betriebsparameter, alternative Bohrpfade, andere Verrohrungsschemata, abweichende Bohrstranggarnituren und neue Spülungszusammensetzungen sein. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können dem Operator Empfehlungen für den praktischen Ablauf des geplanten Bohrprojektes gegeben werden. Im vorliegenden Projekt müssen dafür auch die Schnittstellen geschaffen werden, die eine Anbindung und Einspeisung mit entsprechender Rückmeldung von Echtzeitdaten externer Bohroperationen an den neuen Software-Simulator erlauben.

### Erzielte Ergebnisse im Berichtszeitraum 2022/2023

Die im Projektverlauf, schwerpunktmäßig im Berichtszeitraum, erzielten Ergebnisse werden im Folgenden anhand der Struktur der Arbeitspakete kurz dargestellt. Ausführliche Ergebnisse können dem öffentlich zugänglichen Abschlussbericht des Mittelgebers BMWK/PTJ entnommen werden.

### TP 1 Datenbeschaffung und Implementierung vorhandener Bohrungen im Simulator

Die wichtigste Datenbasis bildeten die Daten von der GeneSys Geothermiebohrung in Groß-Buchholz, Hannover. Darüber hinaus wurde im Rahmen dieses Projekts die aktuelle Datenbasis erheblich erweitert, indem Daten weiterer Bohrungen beschafft worden sind. Darunter sind vor allem die verfügbaren Bohrungsdaten vom Unternehmen Equinor in Norwegen. Diese Bohrdaten sind von den Feldern Volve, Northern Lights, Sleipner, und Smeaheia.

Tabelle 1: Status vorhandene Bohrdaten am Projektende.

Nr.	Company/Source	Location	Field	Status
1.	BGR	Germany, Groß Buchholz	GeneSys	Processed
2.	Wintershall-Dea (TUC)	Germany, Hankensbüttel Süd	Hankensbüttel	Invalid/ Insufficient
3.	BGR	Germany, Burgwedel/ Thönse	Thönse	Invalid/ Insufficient
4.	BGR	Germany, Staffhorst	Staffhorst	Invalid/ Insufficient
5.	Equinor	Norway	Volve	Processed
6.	Equinor	Norway	Northern Lights	Processed
7.	Equinor	Norway	Sleipner	Processed
8.	Equinor	Norway	Smeaheia	Processed
9.	ICDP	Germany	KTB	Available

Eine zunächst manuelle und danach automatisierte Analyse erfolgte, um die Eignung der Daten für Modellierungen zu überprüfen.

- Echtzeit-Bohrdaten (tiefenbasiert und zeitbasiert)
- Geophysikalische Interpretationen
- Geowissenschaftliches Archiv
- Produktionsdaten
- Berichte
- Lagerstättenmodell (Eclipse)
- Lagerstättenmodell (RMS)
- Seismik ST10010

- Seismische VSP
- Bohrlochprotokolle (pro Bohrloch)
- Technische Daten zum Bohrloch

Zunächst erfolgten eine systematische Aufbereitung und Formatierung der Daten für die spätere Analyse und Eingabe in den Simulator. Einige Methoden, die bei der explorativen Datenanalyse verwendet wurden, sind die „Outliers Detection“, die „Recursive Feature Elimination“ (RFE), sowie die Einordnung nach der „Feature Importance“, dem „Correlations Check“ und der Erstellung von „Statistical Information“.

Als Nächstes erfolgte eine Überführen von Daten in die ausgelagerte Datenbank. Diese Datenbank sollte nicht nur die erfassten Daten, sondern auch die interpolierten, vorverarbeiteten und verarbeiteten Daten aufnehmen. Ihr Zweck besteht darin, als Eingabe für die verschiedenen im Projekt entwickelten Machine-Learning-Modelle zu dienen. Dementsprechend wurde eine PostgreSQL-Datenbank auf dem Server des DSC eingerichtet. Sowohl Rohdatensätze als auch vorverarbeitete Datensätze fanden in dieser Datenbank Platz. Unabhängig vom verwendeten DSC-System könnte auf den finalisierten Datensatz über diese Datenbank zugegriffen werden.

## TP 2 Datenanalyse und Modellierung

In diesem Teilprojekt wurden sowohl empirische als auch physikalische Modelle entwickelt, um echtzeitfähige Simulationsmodelle in den Software Simulator zu implementieren. Der Konstruktionsprozess für die empirischen Modelle umfasste die Auswahl der Daten-Eigenschaften, den experimentellen Aufbau, das Modelltraining und die Feinabstimmung („tuning“) der Hyperparameter. Jedes Vorhersagemodell nutzte Machine-Learning-Algorithmen und -Techniken, um die Zielattribute im Zusammenhang mit dem Bohrprozess vorherzusagen.

Im Projektverlauf wurden die empirischen Modelle Rate of Penetration (ROP) Prediction, Weight on Bit (WOB) Prediction, und Equivalent Circulation Density (ECD) Prediction entwickelt.

Physikalische Modelle spielen eine entscheidende Rolle in der Simulation des Bohrprozesses, insbesondere wenn es darum geht, realistische Szenarien im Bohrloch zu simulieren. Durch die Anwendung von physikalischen Zusammenhängen können verschiedene Phänomene im Bohrloch modelliert werden. Die Forschungen haben sich auf die Anpassung zu dem vorhandenen Software Simulator konzentriert, insbesondere auf die Temperaturentwicklung, Bohrkleintransport und Bohrpfadoptimierung einschließlich der Kollisionsanalysen. Ein Überblick für die entwickelten physikalischen Modelle ist in Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2: Überblick entwickelter physikalischer Modelle.

Nr.	Models
1	Advanced Temperature Model
2	Torque and Drag
3	Weight on Bit
4	Bit Right/Left & Build/Drop Tendencies (Bit Walk)
5	Well Anti-Collision Analysis
6	Cutting Transport & Drill String Dynamics Interaction

Aufgrund der entscheidenden Bedeutung in komplexen Geothermiebohrungen ist die Antikollisionsanalyse von großer Relevanz. Das physikalische Modell berücksichtigt dabei die Trajektorie des Bohrlochs nach der „Minimum of Curvature“-Methode, den Fehlerwahrscheinlichkeitsraum (englisch: "Ellipsoid of Uncertainty") unter Berücksichtigung von Messfehlern während des Bohrvorgangs sowie die Entfernung zwischen den Bohrlöchern. Weitere Modelle schließen die Dogleg Severity, Torque & Drag und den Bit Walk mit ein (Abbildung 4).

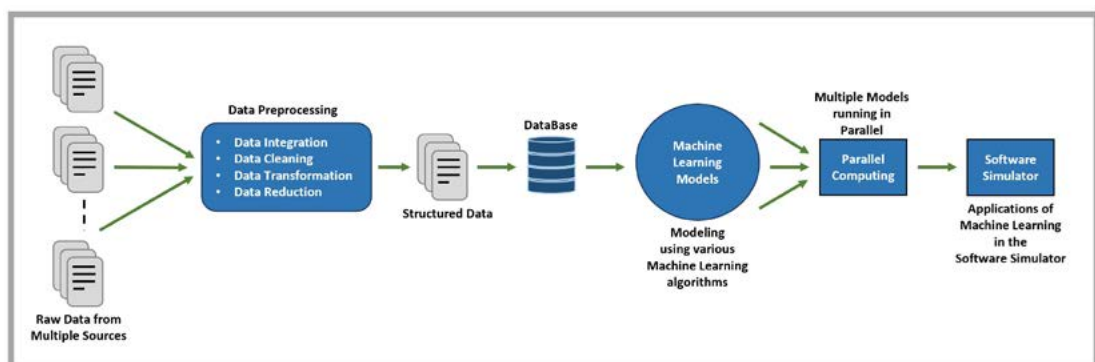


Abbildung 3: Arbeitsablauf des Modellierungsszenarios für maschinelles Lernen.

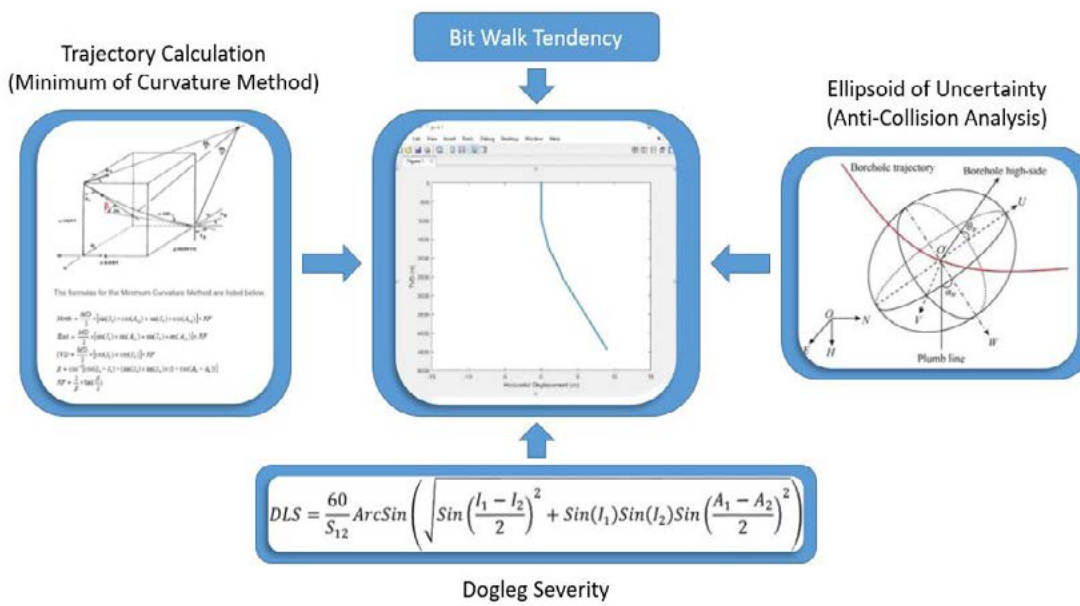


Abbildung 4: Modell zur Vermeidung von Kollisionen.

Die maschinellen Lernalgorithmen wurden anhand von Messdaten validiert und entsprechende Abweichungen festgehalten, um die am besten geeigneten Methoden zu ermitteln.

**TP 3 Entwicklung der echtzeitfähigen Simulator-Modelle**

In diesem Teilprojekt erfolgte zunächst die Ertüchtigung des API für die erweiterten Anforderungen. Die genauen Spezifikationen der Änderungen wurden in den frühen Phasen des Projekts in Zusammenarbeit zwischen dem DSC und Drilling Systems festgelegt. Die Implementierung neuer Modelle, die entscheidend für die Erstellung eines realistischeren Bohrplanungssystems zur Durchführung komplexer Echtzeit-Geothermie-Bohrsimulationen waren, wäre ohne die zusätzliche Funktionalität nicht möglich gewesen. Die Vereinfachung von Modellen zur Echtzeitfähigkeit stellte ein weiteres Arbeitspaket in diesem Teilprojekt dar. Verschiedene Optimierungstechniken wurden angewendet, um die Effizienz entwickelter Modelle zu verbessern. Schließlich erfolgten die Implementierung und Validierung der Echtzeit-Modelle durch neu erstellte Testszenarien.

**TP 4 Simulations-Anwendung für neues Geothermieprojekt**

Im Vordergrund stand hier zunächst die Entwicklung der OPC-UA-Schnittstelle für den Datenverkehr zwischen der DrillSIM:600 und einer externen Bohranlage. Deren erfolgreiche Erprobung erfolgte durch Verbinden von Software-Simulator und Bohrversuchsstand am

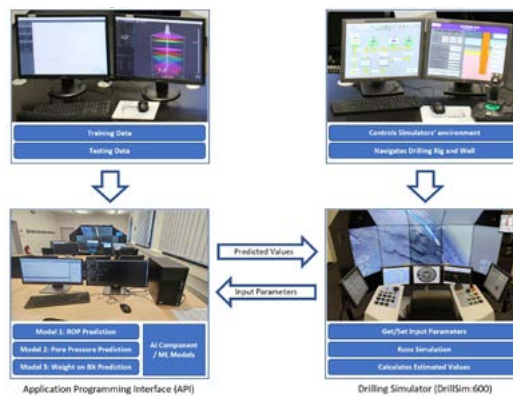


Abbildung 5: Workflow zwischen der API und Drill-SIM:600.

DSC. Zur Bearbeitung der Thematik „Virtuelle Bohrung für Optimierung und Training“ wurden Bohrsimulationen durchgeführt, und es wurde eine Echtzeit-Datenübertragung über die OPC-UA-Schnittstelle ausgeführt. Die Methodik des Szenario-Simulationsprozesses ist in Abbildung 6 dargestellt.

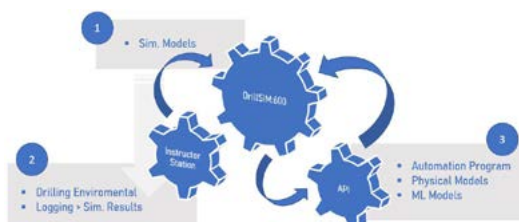


Abbildung 6: Methodik von Szenario-Bohrungen.

Die Nachbildung eines Bohrlochs und das erfolgreiche Bohren eines Abschnitts, kombiniert mit der Entwicklung eines automatisierten Programms, das Bohrparameter aus der ursprünglichen Operation nutzt, führte zu Szenario-Simulationsergebnissen, die die beobachteten Trends und Muster des tatsächlichen Bohrvorgangs widerspiegeln.

### Zukünftige Forschungsarbeiten

Im Rahmen des mittlerweile erfolgreich abgeschlossenen Drittmittelprojekts wurden umfangreiche Voraussetzungen geschaffen, um die neue Funktionalität der realitätsnahen Echtzeit-Planung für zukünftige reale Geothermiebohrungen nutzen zu können. Zu den bisherigen Errungenschaften gehört einerseits die „Öffnung“ des bisher geschlossenen Systems der DrillsIM:600. Nachdem in der Bestandsversion ein Datenaustausch nach außerhalb des Systems nur in sehr beschränktem Umfang möglich war, wurde dieser jetzt durch grundlegende Änderungen der Basiskonfiguration und des API erheblich ausgeweitet, und damit der Simulator wesentlich leistungsfähiger gemacht. Weiterhin wurden mehrere realistische Modelle, physikalischer und numerischer Art, zur Beschreibung des untätigen Bohrprozesses geschaffen, die auch in den Simulator integriert werden konnten. Damit war eine probeweise realistische Simulation von Bohrlochabschnitten möglich. Schließlich bildete die Implementierung einer industrietypischen bi-direktionalen Datenschnittstelle die Möglichkeit, den Simulator an externe Datenerzeuger, wie etwa eine aktive Bohrstelle, anzuschließen.

In einem nächsten Schritt wird es sinnvoll sein, diese Funktionalitäten einer tatsächlichen Nutzung näherzubringen. Dazu müssen weitere Aktivitäten in den beiden genannten Hauptarbeitsbereichen, Modellbildung/Simulation und Datenaustausch, weitergeführt werden, das Vorhandensein entsprechender neuer Projektmittel vorausgesetzt. Die bereits entwickelten Algorithmen und Modelle sollten zunächst an weiteren historischen Bohrdaten erweitert, erprobt und implementiert werden. Einzelne Bohrlochsektionen würden dann in diesen Feldern „nachgebohrt“ werden. Außerdem ist zu überprüfen, ob dann tatsächlich alle Voraussetzungen vorliegen, die eine Komplettsimulation der Bohrlöcherstellung von Übertage bis zum Zielpunkt ermöglichen. Danach wäre die Kontaktaufnahme mit einem Geothermie-Projekt, vorzugsweise in Deutschland, erforderlich. Mit diesem könnte eine Vereinbarung auf

Forschungsbasis getroffen werden, um deren geplante Geothermiebohrung unter Überlassung sämtlicher vorliegender Ausgangsdaten, vor Aufnahme der tatsächlichen Bohrarbeiten, am Simulator neu zu planen.

Neben dem beschriebenen Prozess der Vorab-Planung, die wünschenswerterweise dann auch einen Katalog an Empfehlungen zu einer effizienteren Abteufung des Bohrlochs liefert, müssen weitere Arbeiten an der Datenübertragung nach extern erfolgen. Hier sollte zunächst die Möglichkeit geschaffen werden, den Datenaustausch mit einer vorzugsweise nahegelegenen Bohrstelle zu erproben. In Betracht kämen hier beispielsweise Versuchsbohrungen von Technologieentwicklern der Bohrindustrie in Deutschland. Nachdem der Datentransfer insbesondere von der Bohrstelle zum Simulator störungsfrei sichergestellt ist, kann als Nächstes das Konzept des „digitalen Zwillings“ angegangen werden. Wenn der Simulator in der Lage ist, aktuelle Bohrdaten von der Lokation zumindest nahezu in Echtzeit zu empfangen, wäre mit Hilfe der beschleunigten Simulation ein „Vorbohren“ des folgenden Bohrlochabschnitts möglich. Die Ergebnisse würden dann zu Empfehlungen für ggf. geänderte Bohrparameter führen, bevor die entsprechende Teufe vom Bohrunternehmer in der Realität erreicht ist.

Im Rahmen der weiterführenden Forschungsarbeiten könnte es auch als sinnvoll erachtet werden, die Aktivitäten am Software-Simulator des DSC in eine Partnerschaft mit einem Industriebetrieb der Branche einzubringen. Dies könnte zu einer weitergehenden und professionelleren Anwendung der realitätsnahen Vorab- und Parallelsimulation in der Geothermieumgebung führen.

# GeoTWIN: Tiefengeothermie zur Wärmeversorgung in Norddeutschland – Neue Konzepte zur Risikominimierung beim Aufschluss geothermaler Reservoirs

## Kurzfassung

Im Januar 2021 startete das vom DSC koordinierte und aus EFRE-Mitteln finanzierte Forschungsvorhaben zur Entwicklung umsetzbarer Konzepte für die geothermische Nutzung des Geountergrundes anhand eines ausgewählten Szenarios im norddeutschen Becken. Gegenstand des interdisziplinären Projektes war es, sowohl wirtschaftliche als auch technische Risiken bei der hydrothermalen Gewinnung von Erdwärme aus Teufen bis 1700 m darzustellen und Maßnahmen zu deren Eingrenzung zu entwickeln.

## Einleitung und Projekthintergrund

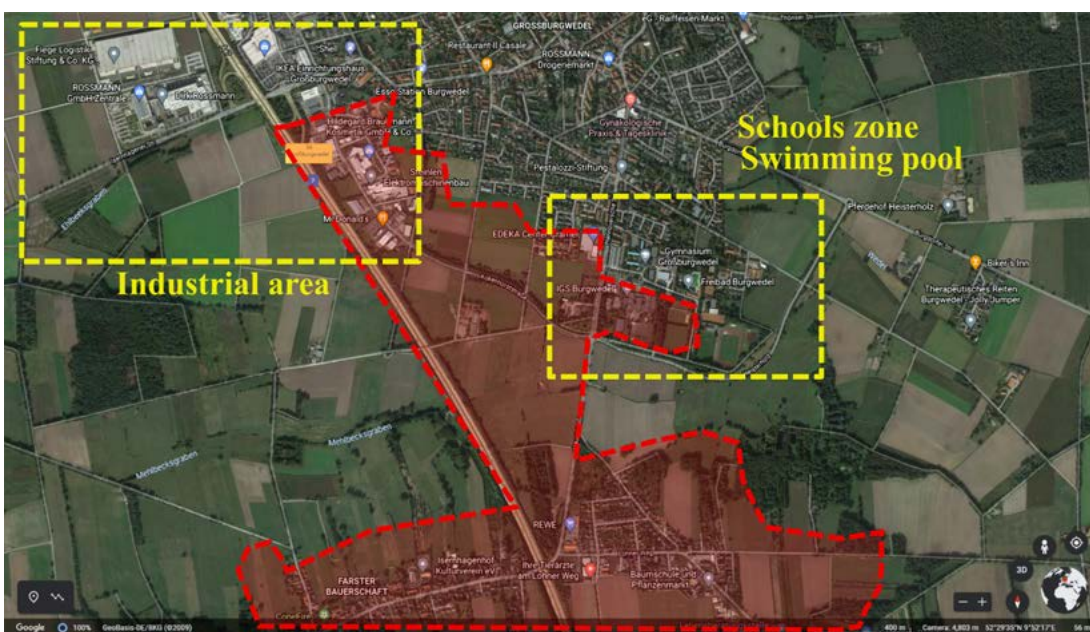
Zur Beantwortung der damit im Zusammenhang stehenden Fragen an einer gezielt ausgewählten Lokation (Großburgwedel), die im Bereich der Erkundungslizenz der TU Clausthal liegt, wurden die in größerer Zahl vorhandenen Daten älterer Bohrungen und geophysikalischer Erkenntnisse herangezogen und interpretiert. Die Daten wurden zuerst in ein 3D-Lagerstät-


tenmodell übertragen, in welcher der Charakter der Lagerstätte ersichtlich wurde.

Die sich ergebende Lithologie zeigt in der Zielformation wechselnde Schieferstein- und Sand-schichten. Letztere weisen Porositäten auf, die für eine hydrothermale Nutzung brauchbar erscheinen, so dass sich die weitere Arbeit auf diese Schichten konzentrierte.

Entsprechende Kernanalysen deuten auf das Vorhandensein der sogenannten Bückeberg- und Valangin-Formationen. Aus den entsprechenden petrophysikalischen Eigenschaften ergaben sich deutliche Korrelationen zwischen Porositäten und Permeabilitäten, die die Wahl der Sandsteinschichten als Zielformationen stützten, während die Schiefer- und Schiefer-sandsteinschichten ausgeschlossen wurden.

In der Folge wurde das geologische Modell mit der Oberflächenkarte gekoppelt, da die Anbindung an potenzielle Abnehmer der Erdwärme ein wesentlicher Entscheidungsfaktor in der Wahl der exakten Lokation darstellt. Auf der



 Potential market


 Possible wellhead location

Abbildung 1: Mögliche Standorte für Geothermiebohrungen und Wärmeabnahmen im Raum Burgwedel.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

GeoTWIN: Tiefengeothermie zur Wärmeversorgung in Norddeutschland – Neue Konzepte zur Risikominimierung beim Aufschluss geothermaler Reservoirs

### Fördermittelgeber:

Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE)



**Förderzeitraum:** 01.01.2021 – 31.12.2022

**Förderkennzeichen:** ZW 7-85105209

### Projektleiter:

Dr.-Ing. Michael Koppe  
(DSC – TU Clausthal, Gesamtprojekt);  
Prof. Dr. Philip Jaeger (ITE – TU Clausthal);  
Prof. Dr. Leonhard Ganzer (ITE – TU Clausthal)

### Projektbearbeiter:

Ke Li, M. Sc.  
Wolfgang Hollstein, M. Sc.  
Dipl.-Ing. Ralph Peitz  
Mostafa Abdelhafiz, M. Sc.



Michael Koppe



Philip Jaeger



Leonhard Ganzer

Grundlage eines sogenannten „Synergiemodells“ konnte ein vorläufiger Entwurf für ein Bohrungsdouletten-System im Lizenzgebiet der TUC entwickelt werden.

Hier sind Gesichtspunkte wie kurze Transportwege, gut erreichbare Flächen für den Bau der Übertageanlagen sowie geschützte Bereiche wie Wälder oder Wasserschutzgebiete zu berücksichtigen.

Für den designierten Standort wurde im Weiteren eine Produktionssimulation erstellt, welche zeigte, dass auch nach 50 Jahren die Förder-temperatur des geothermischen Tiefenwassers nur von etwa 75° C auf 73° C reduziert werden würde. Ein Wärmeeinspeisung während der Sommermonate könnte die Abkühlung des Reservoirs sogar zusätzlich reduzieren, was in einem nachfolgenden Projekt „GeoTES“ betrachtet wird.

Für einen möglichen Standort zwischen der A7 und Großburgwedel wurde eine Bohrplanung gemäß der Vorgabe einer hydrothermalen Dublette erstellt. Von drei ursprünglich in Frage kommenden Systemen wurde die Variante mit einer vertikalen und einer abgelenkten Bohrung ausgehend von einem einzigen Standort vor allem aus Kostengründen als optimal angesehen. Zudem ließe sich die vertikale Bohrung zunächst als Explorationsbohrung niederbringen, um das Fündigkeitsrisiko zu minimieren und gleichzeitig Kosten zu sparen.

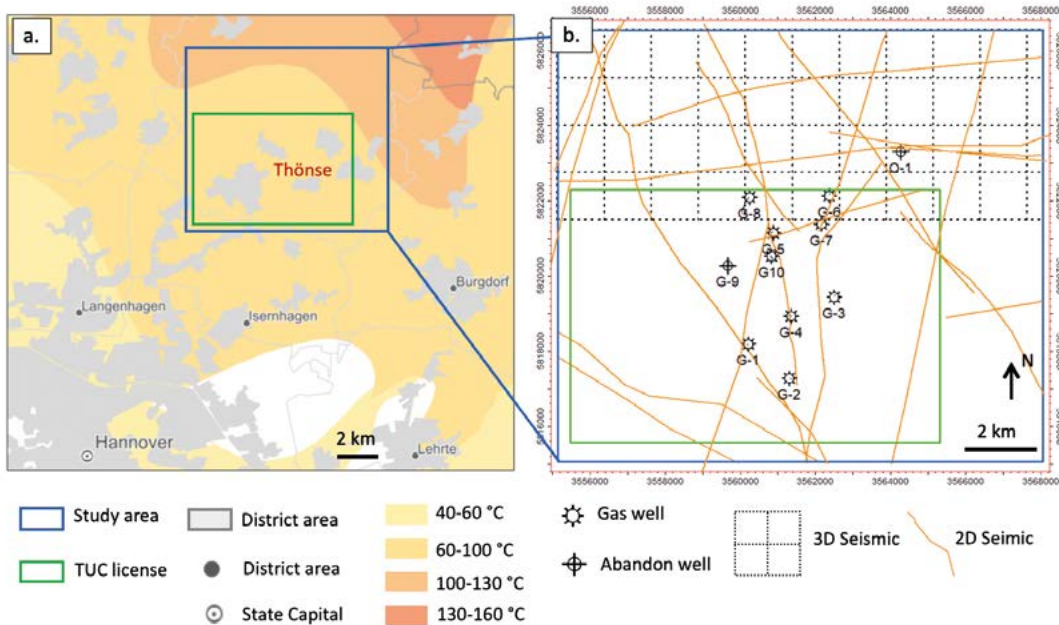
Im Rahmen der Bohrplanung wurde weiterhin eine geeignete Bohrspülung definiert, die in Anbetracht der im norddeutschen Becken vorhandenen und zum Quellen neigenden Tonlagen als besonders kritisch anzusehen ist.

Für die Verrohrung der Bohrlöcher wurde ein zweiteiliger Ausbau vorgesehen, der auf einer Teufe von 400 m abgesetzt und von dort aus bis zur Bohrlochsohle (ca. 1200 m) durchgehend komplettiert wird. Der Einsatz von neuartigen GFK-Rohren, deren Integrität unter Einsatzbedingungen in einem parallelen Projekt am Institut für Subsurface Energy Systems der TU Clausthal untersucht wird, hätte Vorteile hinsichtlich Anbackungen von Salzausfällungen (Scaling) und der Anfälligkeit gegen Korrosion.

Auf der Grundlage von umfangreichen Kenntnissen des DSC und der Tiefbohrabteilung des ITE sowie Erfahrungen aus ähnlichen Projekten in der Vergangenheit, wurde eine Risikobewertung entsprechend den Leitlinien der aus der



Erdöl- und Erdgasindustrie bekannten Norm EN ISO 17776:2002 für die Erstellung der hydrothermalen Dublette durchgeführt. Folgende Bereiche wurde in der Bewertung berücksichtigt: Besonderheiten der Gesteinsformationen, adäquater Einsatz von Ausrüstung und Materialien, Planung, Bedienung und Handhabung durch Personen, örtliche Bedingungen und Umwelteinflüsse.



Für die Produktionstechnik war das Problem der Salzfrachten und der Gasgehalte am Standort zu lösen. Dafür wurde der Flowloop am ITE mit einer innovativen Ultraschallmesstechnik erweitert, um die Mehrphasenströmung während der Produktion quantifizieren zu können. Die Salzgehalte und die daraus entstehende Gefahr von Ablagerungen, insbesondere von Calciumkarbonat bei der Freisetzung von CO<sub>2</sub>, bedingt durch den Druckabfall während der Produktion, konnten durch den Einsatz einer Raman-Sonde nachgestellt werden.

Abbildung 2: Systemmodellierung und Prognose-Daten

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind die Kosten für den Ankauf bzw. die Pacht der Grundstücke nicht enthalten. Dennoch lässt sich feststellen, dass es möglich ist einen wirtschaftlichen Betrieb zu etablieren mit Kosten, die sogar noch unterhalb der Betriebskosten der Anlage in Neustadt-Glewe, die zum Vergleich herangezogen wurde, liegen. Fazit: Das GeoTWIN-Projekt konnte wichtige Erkenntnisse für die Erstellung geothermischer Anlagen zur Wärmeversorgung in Norddeutschland liefern, die in einem ausführlichen Bericht dargestellt sind, der auf Anfrage erhältlich ist.

# GeoTES: Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in tiefen Aquiferen (Georeservoiren) im Rahmen der „Wärmewende 2030“

## Kurzfassung

Zur Dekarbonisierung des Wärmesektors werden von der Tiefengeothermie wesentliche Beiträge erwartet. Durch die zusätzliche Funktion als saisonaler Wärmespeicher kann die Ausbaudynamik der Geothermie deutlich erhöht werden. Das GeoTES-Projekt verfolgt das Ziel, am Beispiel eines konkreten Reservoirs ein mathematisches Modell eines optimierten ober- und untertägigen Systems zur Entnahme, Speicherung und Rückgabe von Wärme und dessen Einbindung in Wärme- und Stromnetze zu entwickeln. Die Modellierung wird allgemeingültig formuliert und mit verfügbaren Daten der Beispiellokation parametrisiert. Dieses Vorgehen erlaubt neben der Validierung der Modellansätze die Übertragbarkeit des Gesamtmodells auf andere Standorte.

Das Projekt wird durch das BMBF im Rahmen des Geo:N Programms finanziell gefördert. An der Kooperation beteiligt sind die Clausthaler Institute für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE), Technische Mechanik

(ITM), Subsurface Energy Systems (ITE) sowie das Institut für energieoptimierte Systeme (EOS) der Hochschule Ostfalia und das Geowissenschaftliche Zentrum der Georg-August-Universität Göttingen. Die assoziierten Partner NDEW, DEUTZ und ENERCITY unterstützen das Projekt beratend.

Das Konzept beinhaltet die Wärmeentnahme aus tiefen Aquiferen mit Temperaturen von über 40°C zur Versorgung von (Groß-)Wärmepumpen und deren Einbindung in Wärmenetze, siehe Abb. 1. Die Aquifere werden über eine mit erneuerbarer Energie gespeiste Großwärmepumpe sowie über Industrieabwärme und Solarthermie regeneriert. Die Gesamteffizienz des Ansatzes ergibt sich über die Integration der thermischen Kapazität des geologischen Untergrundes mit einer ganzjährigen Verfügbarkeit hoher Temperaturen, der Effizienz von Großwärmepumpen mit Erreichung ausreichend hoher Vorlauftemperaturen sowie der Nutzung von regenerativer thermischer und elektrischer Energie und Abwärme zur Regeneration des Untergrundspeichers. Innovative Ansätze der

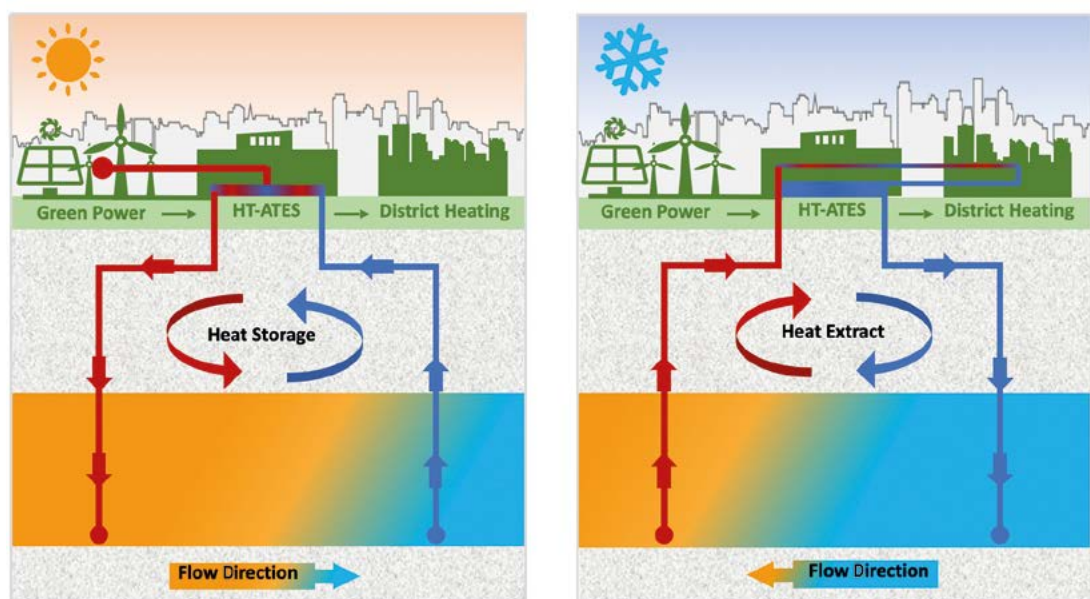


Abb. 1: Konzept der saisonalen Wärmespeicherung und Entnahme in Aquiferen.

Bearbeitung sind die numerische Modellentwicklung und durch Simulation unterstützte Konzeptentwicklung mit der modularen Kopplung von Geothermie, regenerativer Energieerzeugung, Wärme- und Stromnetz sowie der Senkenseite in einem standortunabhängigen Gesamtmodell. Das Projekt soll Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der thermischen Energiespeicherung in tiefen Aquiferen zur emissionsneutralen Energieversorgung von Neubau- und Bestandsquartieren standortneutral aufzeigen und erreicht über die transdisziplinäre Bearbeitung eine hohe Praxisrelevanz. Als exemplarisches Ergebnis ist in Abb. 2 die Energierückgewinnungsrate dargestellt, die sich im Laufe der Jahre positiv verändert und zuletzt bis zu 95% betragen kann. Zugleich ist der Einfluss des Abstands zwischen Injektions- und Förderbohrung dargestellt. Um einen thermischen Durchbruch zu vermeiden, ist dies ein kritischer Parameter.

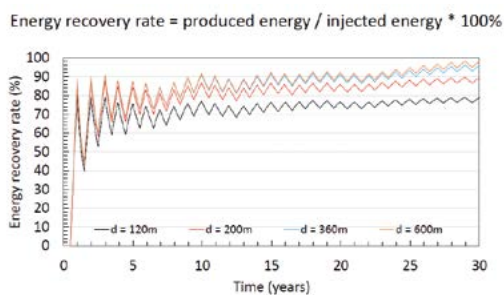


Abb. 2: Berechnete zeitliche Entwicklung der saisonalen Wärmerückgewinnung bei verschiedenen Bohrungsausführungen.

Die an dem Projekt beteiligten Arbeitsgruppen treffen sich in regelmäßigen Abständen, um Daten und Informationen auszutauschen. Das Bild entstand anlässlich eines Treffens zusammen mit Vertretern der assoziierten Partner aus der Industrie an der Ostfalia Hochschule. Weitere Informationen zum Projekt werden auf der Projektwebseite [www.geotes.de](http://www.geotes.de) veröffentlicht.

## Publikationen

K. Li et al.: Numerical Investigation of High Temperature Aquifer Energy Storage (HT-ATES) in Northern

Germany, 84th EAGE Annual Conference & Exhibition Vienna, 2023.

M. Abdelhafiz, J. Oppelt, G. Brenner and L. A. Hegele: "Application of a thermal transient subsurface model to a coaxial borehole heat exchanger system," *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 227, p. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211815>, 2023.

M. Abdelhafiz, J. Oppelt, G. Brenner and L. A. Hegele: "Numerical investigation of the convective heat transfer coefficient for a concentric annulus with rotating inner cylinder with application in the deep geothermal drilling process," *GeoEnergy Science and Engineering*, Vols. 231, Part B, <https://doi.org/10.1016.geoen.2023.212413>, 2023.

S. Mohammadi, G. Brenner: Vergleich der Effizienz von geothermischen Sonden und Dubletten, *Der Geothermiekongress*, Essen, 17. - 19. 10. 2023.

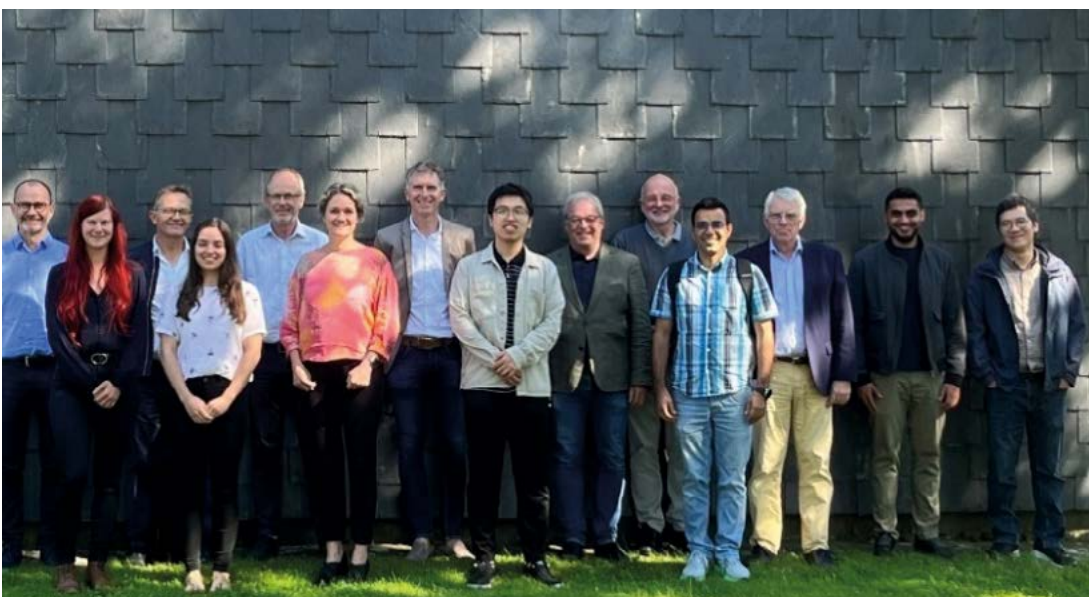


Abb. 3: Statustreffen der Mitglieder der Arbeitsgruppen und des wissenschaftlichen Beirats an der Ostfalia Hochschule am 29.9.2023.

# OBS: Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch

## Kurzfassung

Das übergeordnete Projektziel ist die Reduzierung der Herstellungskosten von Tiefbohrungen zum Zweck der Erschließung geothermaler Reservoirs durch eine gegenüber dem Stand der Technik erheblich verbesserte Kontrolle der mechanisch-dynamischen Bohrbedingungen. Ein effektiver Bohrprozess wird durch Unstetigkeiten im Gebirge, wie insbesondere die bei Geothermiebohrungen häufig anzutreffenden Störungszonen, merklich behindert. Unstetigkeiten im Gebirgsverlauf sind ein wesentlicher Auslösefaktor für unerwünschte Schwingungen und Dynamikvorgänge in der untertägigen Bohrgarnitur (BHA). In der Konsequenz führt dies zu einem niedrigeren Bohrfortschritt und kürzerer Standzeit der Meißel. Gerade die durch dynamische Lasten hervorgerufenen Funktionsstörungen in typischen Geothermie-Gesteinshorizonten sind bisher nicht ausreichend untersucht. Zu den wesentlichen Projekthalten gehören eine Analyse des Schwingungsverhaltens aus realen Bohrungen, die Entwicklung und Herstellung einer Testeinrichtung mit einer neuartigen dynamischen Ansteuerung in Interaktion mit einem zu entwickelnden virtuellen Bohrstrangmodell, die Ermittlung und Untersuchung der damit verbundenen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen BHA-Testkörper und virtuellem Bohrstrangmodell, eine modellbasierte Schwingungsuntersuchung der Testkörper, experimentelle Untersuchungen zur Meißel- und Bohrstrangdynamik, die Identifikation, Separation und Analyse der Schwingungen aus Meißel und BHA-Testkörper im Versuchsstand sowie die Erstellung von Handlungsempfehlungen für die bohrtechnische Praxis von Geothermie-Bohrungen. Im Endergebnis soll ein realitätsnahes Laborverfahren entwickelt werden, mit dem unerwünschte Schwingungen im unteren Bereich einer Bohrung, insbesondere auf Geothermie, nachgestellt werden können. Die Bearbeitung des mittlerweile abgeschlossenen Projekts erfolgt am DSC in einem interdisziplinären Team von Bohrtechnik-, Maschinenbau- und Regelungstechnikingenieuren. Das Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) der TU Braunschweig war zeitweise als Projektpartner involviert.

## Abstract

Reducing the costs of drilling geothermal wells is the governing project goal, to be accomplished through improved control of drilling dynamics. An effective drilling process is frequently noticeably hampered by discontinuities in the rock, such as the fault zones that are often encountered in geothermal drilling. Discontinuities in the rock formation are a major trigger factor for unwanted vibrations and dynamic processes in the underground drill assembly (BHA). As a consequence, this leads to slower drilling progress and shorter tool life. The dynamic dysfunctions in typical geothermal rock horizons have not been sufficiently investigated so far. The project includes an analysis of the vibration behavior from real boreholes, the development and installation of a test facility with a new type of dynamic control in interaction with a virtual drill string model to be developed, the determination and investigation of the associated interactions between the subsystems BHA test body and virtual drill string model, a model-based vibration analysis of the test body, experimental investigations into bit and drill string dynamics, the identification, separation and analysis of the vibrations from the bit and BHA test body in the test rig, and the creation of recommendations for geothermal drilling practices. Finally, the goal is to develop a realistic laboratory method that can be used to simulate unwanted vibrations in the lower area of a borehole, especially on geothermal energy. The project has been conducted by an interdisciplinary team of drilling, mechanical and control engineers. The "Institute for Dynamics and Vibrations" of Braunschweig Technical University has been involved as a project partner for the larger part of the project time.

## Einleitung und Projekthintergrund

Geothermiebohrungen im Hartgestein sind in der Regel auf Strömungskanäle in Form von Rissen im Gestein angewiesen, um den Transport des geothermalen Wassers zu ermöglichen. Risse können durch Stimulation erzeugt werden, liegen aber bevorzugt aufgrund von

Störungszonen im Gebirge bereits vor. Aus bohrtechnischer Sicht ergeben sich durch die Risse Probleme, weil der Bohrprozess durch das Auftreffen auf Spalte und Risse sowie generell gestörtes Gebirge zu Schwingungen angeregt wird. Diese behindern den Bohrfortschritt, erhöhen den Verschleiß an Bohrwerkzeugen und verschlechtern das Steuerungsverhalten der Bohrgarnitur. Ziel ist es letztendlich, durch geeignete Veränderung der Bohrparameter und angepasste Bohrstrangelemente die Dynamik weitgehend zu eliminieren. In realen Bohrungen können diese Vorgänge nur sehr bedingt untersucht werden, weil der Bohrstrang meistens nicht mit den geeigneten Sensoren ausgestattet ist. Noch dazu können keine vergleichbaren Versuchsbedingungen vorgefunden werden, weil jede Lokation und jede Bohrung anders sind. Daher bietet es sich an, diese experimentellen Untersuchungen in einer Laborumgebung durchzuführen, die entsprechend realitätsnahe Betriebsparameter ermöglicht. Dazu zählt insbesondere die freie Schwingungsentwicklung und -ausbreitung. Konventionelle Teststände besitzen eine hohe Steifigkeit, so dass die durch den Bohrprozess angeregten Schwingungen sich nicht so frei ausbreiten können, wie es in der Realität aufgrund der typischen Bohrstranglänge von mehreren tausend Metern der Fall ist. Dies galt auch für den am DSC in der Erstausrüstung installierten Versuchsstand, der den horizontalen Betrieb einer Bohrstranggarnitur von ca. 20 m Länge vorsieht. Wesentlicher Inhalt des OBS-Projekts am DSC war daher die Auslegung, Konstruktion und Installation einer erweiterten Versuchseinrichtung, die die Ausbreitung von Schwingungen in mehreren Freiheitsgraden zulässt und so erstmals eine realitätsnahe Untersuchung der In-situ-Bohrstrangdynamik im realen Maßstab ermöglicht. Aufgrund der hohen wirkenden Kräfte und Dynamik erweist sich die Teststandsertüchtigung als außerordentlich komplex und kostenintensiv. Infolgedessen wurde die ursprüngliche Projektdauer vom Fördermittelgeber mehrfach verlängert und auch in kleinerem Umfang aufgestockt. Die Berichterstattung im Folgenden bezieht sich ausschließlich auf die am DSC der TU Clausthal durchgeführten Aktivitäten.

### Projektziele und Entwicklungsschwerpunkte

Die Zielsetzung des DSC/TUC besteht darin, eine Vorrichtung zur realistischen Simulation des dynamischen Bohrprozesses unter Geo-

thermie-Bedingungen zu schaffen und daran sinnvolle experimentell-theoretische Untersuchungen durchzuführen. DSC/TUC wird die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis maßgeblich unterstützen. Der Beitrag des Projektpartners IDS der TUBS beinhaltet die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung des dynamischen Bohrstrangverhaltens. Im Verlauf des Projekts hat IDS diese Modelle für die Anwendung an einem kleinen und damit bezüglich der Realitätsnähe stark eingeschränkten Modellprüfstand entwickelt. Hieraus ergab sich für TUC/DSC die Notwendigkeit, für den eigenen „Full Scale“-Teststand selbst geeignete Modelle und entsprechende Software zu entwickeln.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

OBS: Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen: 0324115A

### Projektlaufzeit: 01.08.2016 – 30.06.2022

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt

### Projektkoordinator:

Rodrigue Freifer, M.Sc

### Projektbearbeiterin:

Dr.-Ing. Lisette Hayn



Joachim Oppelt



Rodrigue Freifer

Im Folgenden werden die OBS-Teilprojekte erläutert.

**TP 1 Teststand-Entwicklung mechanisch/hydraulisch**

Aufbauend auf der Analyse von Schwingungsdaten aus Bohreinsätzen unter besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse von geothermischen Bohrungen wird eine Versuchseinrichtung zur Schwingungsanregung mit mehreren Freiheitsgraden neu entwickelt. Die mechanischen, hydraulischen und elektrischen Komponenten der Schwingungsanregung bzw. der Dynamiksteuerung werden in die bestehende Versuchseinrichtung integriert.

**TP 2 Teststandentwicklung sensorisch/informativ**

Für die mechanischen und hydraulischen Systeme zur Schwingungsanregung werden eine geeignete Steuer- und Regelungstechnik sowie die erforderliche Software entwickelt und in das bestehende System integriert, um die Rückkopplung mit dem virtuellen Bohrstrang (TP 3) zu ermöglichen. Zur Ermittlung der angeregten Schwingungen, des jeweiligen Eigenschwingungsverhaltens und der Wechselwirkungen mit anderen Teilsystemen sind die Positionierung, Auflösung, Auswertung und Validierung der Messsysteme und deren informationstechnische/virtuelle Anbindung an echtzeitfähige Simulationssysteme herzustellen (TP 4).

**TP 3 Aufbau eines virtuellen Bohrstrangmodells und Simulation**

Um den Bohrstrang gemäß den messtechnischen Größen zu bewegen, muss die Wechselwirkung von Hexapod zu Teilbohrstrang (virtuellem Bohrstrang) und Versuchseinrichtung (Testkörper) ermittelt werden. Diese zu berechnende Aktorik muss die Gesamtdynamik auch langer Bohrstränge explizit berücksichtigen, um das Gesamtsystem aus virtuellem Bohrstrang und Bohrloch sowie dem realen Teil des Bohrstranges im Versuchsstand darzustellen.

**TP 4 Beobachtbarkeit und modellbasierte Schwingungsuntersuchung der Testkörper im Teststand**

Die Realisierung realitätsnaher Dynamik auf den Testkörper muss messtechnisch validiert und verifiziert werden. Dazu sind Untersuchungen zur dynamischen, akus-

tischen und ggf. auch optischen Überprüfung des Versuchsstandes notwendig. Hierzu müssen mit geeigneten Sensoren 3D-Verfolgungsstrategien des Prüflings im Prüfstand und insbesondere in der Gesteinsprobe entwickelt werden.

**TP 5 Experimentelle Untersuchungen zur Dynamik und Gesteinszerstörung sowie Empfehlungen für die Umsetzung für Bohrungen auf Geothermie.**

Unter Berücksichtigung der geothermiespezifischen Anforderungen werden Konzepte für die Erstellung geeigneter Gesteinsprobekörper (insbesondere im Hinblick auf Störungszonen) entwickelt. In enger Abstimmung mit TP1/2 werden geeignete Gesteinsprobekörper für experimentelle Untersuchungen erstellt. Dabei ist für die Versuchsauswertung die Identifikation, Separation und Analyse der Schwingungen und BHA-Testkörper im Teststand von entscheidender Bedeutung. Abschließend werden auf Basis der Versuchsergebnisse Handlungsempfehlungen für das Abteufen von Bohrungen auf Tiefengeothermie erarbeitet.

**Erzielte Ergebnisse im Berichtszeitraum 2022/2023**

Innerhalb der Laufzeit des Projektes, das im Juni 2022 abgeschlossen worden ist, wurde ein einzigartiger Teststand entwickelt, konstruiert und errichtet, mit dem erstmals das dynamische Verhalten von Bohrstranggarnituren beim Betrieb in Störungszonen im Originalmaßstab und unter realistischen Bedingungen im Labor untersucht und analysiert werden kann. Der Fokus wurde im Projekt auf die Einleitung axialer und oszillatorischer Schwingungen gelegt. De facto geht es jedoch weniger darum, der Bohrstranggarnitur solche Schwingungen aufzuerlegen. Vielmehr sollen die Aktoriken es ermöglichen, dass die Garnitur unter dem Einfluss des Gesteins-Bohrmeißel-Kontakts so schwingen kann, wie das auch im Bohrloch der Fall wäre. Insofern stellen die Aktuatoren ein Ersatzmodell für den im Labor nicht vorhandenen, typischerweise mehrere tausend Meter langen Bohrstrang oberhalb der tatsächlich vorhanden, ca. 20 m langen, Bohrgarnitur dar. Teil des innovativen Teststands ist auch eine neuartige Gesteinskammer, die u.a. den Bohrprozess bei erhöhter Umgebungstemperatur und Untertage-Umgebungsdrücken erlaubt. Erste durchgeführte Bohrversuche im Berichtszeitraum haben die Funktion der Einrichtung bestätigt. Innerhalb der Projektlaufzeit wur-

den insgesamt drei Gesteinskammern abgebohrt, und weitere stehen für nachfolgende Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle zur Verfügung.

Über den Teststand hinaus war es auch erforderlich, geeignete Messeinrichtungen zur Erfassung in der Bohrgarnitur wirkenden Schwingungen zu schaffen. Ursprünglich ins Auge gefasste kommerzielle Geräte konnten die spezifischen Anforderungen des Teststands nicht erfüllen. Daher wurde an der Forschungsstelle eine proprietäre Messsonde entwickelt, die die Erfassung, Speicherung und Übertragung der gewünschten hochfrequenten Messwerte erlaubt. Die Messsonde verwendet Accelerometer als wesentliche Elemente zur Erfassung der Bohrstrangdynamik. Um das Schwingungs- und Frequenzverhalten der Accelerometer kennenzulernen und auch notwendige Daten für die Konstruktion der Bohrstrang-Messsonde zu gewinnen, wurde ein spezieller Accelerometer-Teststand im kompakten Maßstab entwickelt und gefertigt. Diese Einrichtung wurde für umfangreiche Tests benutzt. Sie ersetzte allerdings nicht die in-situ-Kalibrierung der komplettierten Sonden, die am Partnerinstitut ITE in Clausthal vorgenommen wurde. Eine nähere Erläuterung dazu findet sich im öffentlich zugänglichen Schlussbericht zum Projekt.

Die Innenflächen der abgebohrten Gesteinsproben wurden in Zusammenarbeit mit dem LIAG-Institut in Hannover mit akustischen und optischen Sonden vermessen. Auf diese Weise können Zusammenhänge zwischen den gemessenen Schwingungen an der Bohrstranggarnitur und den vom Bohrmeißel erzeugten Schleifspuren im Gestein untersucht werden.

Im Projektverlauf erwiesen sich die technischen Herausforderungen zur Schaffung der echtzeitfähigen Schwingungs-Testanlage als noch wesentlich gravierender als dies vorher erwartet worden war. Grenzen wurden hier erreicht sowohl in Bezug auf die herrschenden Kräfte, den Energiebedarf, die Festigkeiten von Fundamenten und Gebäuden, als auch die Gesteinskosten. Um die Grenzen nicht zu überschreiten waren zeitaufwendige Optimierungen der Komponenten und des Gesamtsystems erforderlich. Im Endergebnis konnte jedoch eine Testeinrichtung geschaffen werden, die in ihrem Ansatz und der Ausführung einzigartige Möglichkeiten zur Analyse und nachfolgend auch zur Minimierung der meist schädlichen Bohrstrangdynamik in Störungszonen bildet, was letztlich in der Praxis der Geothermie zu einer Kostenreduzierung führt.



Abbildung 1: Die Ausrüstung des Teststands vor Projektbeginn.



Abbildung 2: Die Ausrüstung des Teststands bei Projektende.

Eine neuartige Gesteinskammer wurde mit den folgenden funktionalen Erweiterungen gegenüber früheren Versionen ausgeführt:

- Kontrollierte Temperatur des Gesteins
- Vergrößerter Durchmesser der Gesteinsprobe
- Vergrößerte Masse der Gesteinsprobe
- Wiederverwendbarkeit durch Austauschbarkeit des Innenrohrs mit Gestein



Abbildung 3: Montierte Gesteinskammer mit thermischer Isolierung.

Aufgrund der großen Massen und Beschleunigungskräfte des neuen Prüfstands war es erforderlich, die Fundamente für die Gesteinskammer im Außenbereich des DSC erheblich zu verstärken.

Weitere Details zum Aufbau der Versuchsanlage können dem Abschlussbericht zu dem vom BMWK geförderten Projekt entnommen werden.

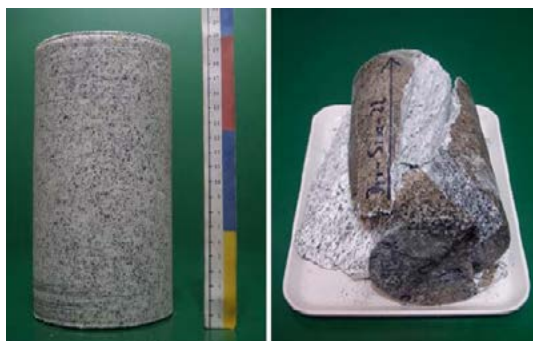


Abbildung 4: Granitprobe vor (links) und nach dem Triaxialversuch.

Experimentelle Untersuchungen wurden an Sandsteinen und Granitsteinen vorgenommen. Die physikalischen Eigenschaften dieser Gesteine wurden vorher detailliert in Zusammenarbeit mit Prof. Düsterloh im Labor des Instituts für Endlagerforschung der TU Clausthal durchgeführt.

Für die Vor- und Nachbereitung der Bohrversuche wurden erforderliche Zubehör-Apparaturen entwickelt und gefertigt.



Abbildung 5: Zubehör zur Vorbereitung und Nachbereitung von Bohrversuchen.

Die durchgeführten Experimente mit dem Bottom Hole Assembly und den Gesteinskammern dienten einerseits der Ermittlung des schwingungstechnischen Verhaltens der Versuchsanordnung und andererseits der Untersuchung der Meißeldynamik im Bohrloch. Auswertungen hierzu wurden auch mit Unterstützung des LIAG in Hannover durchgeführt.



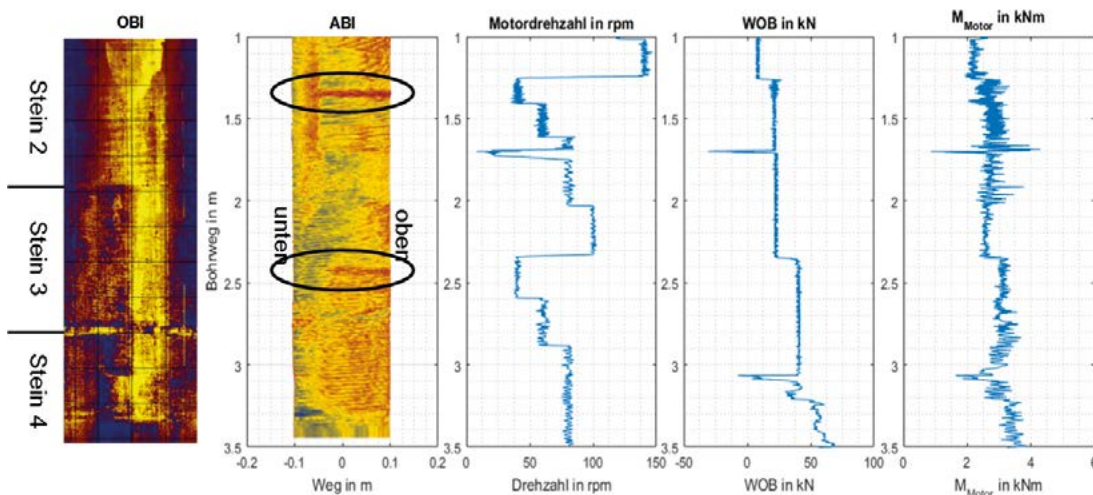


Abbildung 6: Auswertung einer Bohrlochvermessung.

Weitere Einzelheiten zu den durchgeführten Experimenten können dem Abschlussbericht für das BMWK entnommen werden. Zusätzliche systematische Auswertungen erfolgen im Rahmen von aktuell durchgeführten Dissertationsarbeiten der ehemaligen Mitarbeitenden. Die am DSC geschaffene neuartige Versuchseinrichtung sowie eine größere Anzahl bereits vorbereiteter Gesteinsproben ermöglichen die Fortsetzung der im geförderten Projekt begonnenen Forschungsarbeiten zur realistischen Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Bohrstranggarnituren in Horizontalbohrungen.

### Zukünftige Forschungsarbeiten

Mit der Erstellung der neuartigen Testeinrichtung wurden die Voraussetzungen geschaffen, um diverse Bohrstrang-Komponenten im Bereich der ca. 20 m langen Versuchsstrecke auf ihr Dynamikverhalten zu untersuchen. Die dynamische Aktorik ermöglicht die gezielte Anregung der Bauteile, bzw. kann auch dafür verwendet werden, selbsterregte Schwingungen der Bohrwerkzeuge gegenüber dem virtuellen Bohrstrang wirksam werden zu lassen. Erste Messungen des Schwingungsverhaltens am Bohrmeißel sowie entsprechende Analysen wurden durchgeführt. Die Forschungsstelle wird diese Arbeiten im Rahmen der weiteren Nutzung der Testeinrichtung in zukünftigen Projekten systematisch fortsetzen. In Abhängigkeit geeigneter bewilligter Forschungsprojekte bzw. Industrienaufträge wird hierfür ein Zeitraum von 5 Jahren nach Projektende veranschlagt.

Erste industriegeführte Vorhaben zur Nutzung der Testeinrichtung befinden sich bereits in Vorbereitung: So werden mit einem Unternehmen

aus der Bohrservice-Industrie aktuell Untersuchungen zur Erprobung neuartiger Hartgesteins-Zerstörungsprozesse konkret geplant, welche auch Schwingungen von BohrstrangkompONENTEN berücksichtigen werden.

Die bereits im OBS-Projekt durchgeführten Experimente haben u.a. zu einer Frequenzanalyse der Torsionsschwingungen am Bohrmeißel geführt. Weiterhin wurde im Rahmen der Erstellung und des Aufbaus der Testeinrichtung das Eigenschwingungsverhalten der Testeinrichtung ermittelt, um die Dynamik von Testapparatur und Testkörper voneinander trennen zu können. Diese Arbeiten sollen innerhalb eines Zeithorizonts von 3 Jahren nach Projektende fortgeführt und möglichst auch abgeschlossen werden.

Im Rahmen des OBS-Projekts wurde eine Reihe von Gesteinsproben vorbereitet, die mit einer definierten Rissstruktur ausgestattet sind. Diese stellen entsprechende Verhältnisse in Hartgesteinen nach, wie sie auch in Lagerstätten für Geothermienutzung vorkommen. Gemeinsam mit einem Industriepartner werden aktuell Überlegungen zur Analyse torsionaler und lateraler Schwingungen am Bohrstrang im realen Bohrbetrieb angestellt. Im Zuge dieses bereits geplanten, und auch weiterer zu beantragender Projekte an der Forschungsstelle, werden die genannten Gesteinsproben bebohrt und die Versuchsergebnisse entsprechend der ursprünglichen Aufgabenstellung des OBS-Projekts analysiert. Auf diese Weise können die vorgesehenen Handlungsempfehlungen erstellt und an die einschlägigen Nutzer übermittelt werden. In Abhängigkeit geeigneter bewilligter Forschungsprojekte bzw. Industrienaufträge wird hierfür ein Zeitraum von 5 Jahren nach Projektende veranschlagt.

# OBF: Optimierung und Feldertüchtigung eines mit Spülung betriebenen Bohrhammers

## Zusammenfassung

Das Verbundprojekt „OBF“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und zielt darauf ab, die Herstellungskosten von Tiefbohrungen im Bereich der Geothermie zu reduzieren. Ein spülungsgetriebener Bohrer wird durch die TU Clausthal sowie namenhaften Industriepartnern entwickelt, um die Kosten und Risiken der tiefen Geothermie zu senken. Das Projekt strebt nun die Feldertüchtigung dieses Bohrhammers an, um die Voraussetzungen für die zukünftige Vermarktung und den kommerziellen Einsatz zu schaffen. Die Entwicklungsschwerpunkte umfassen die Optimierung des Prototyps im Labor, die Herstellung von Prototypen unterschiedlicher Durchmesser, Bohrversuche im Labor und im Feld sowie die Analyse der Ergebnisse für die nachfolgende Herstellung der Marktreife der Technologie.

## Abstract

The collaborative project "OBF" is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and aims to reduce the drilling and construction costs of deep geothermal wells. Renowned partners from industries and the TU Clausthal are involved in the project. A mud-driven hammer is developed to decrease the costs and risks associated with deep geothermal exploration. The project seeks to test the prototype mud-driven hammers under laboratory and field environment to establish the conditions for future marketing and commercial deployment. Key developments focus on optimizing the prototype in the laboratory, manufacturing prototypes of different diameters, conducting drilling tests in both laboratory and field settings, and analyzing the results for subsequent production readiness of the technology.

## Einleitung und Projekthintergrund

Das Verbundprojekt „Optimierung und Feldertüchtigung eines mit Spülung betriebenen Bohrhammers – OBF“, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK) geför-

dert wird, verfolgt das übergeordnete Ziel, die Herstellungskosten von Tiefbohrungen im Bereich der Geothermie, insbesondere in Hartgesteinen wie Granit, Gneis oder sehr festen Sandsteinen, zu verringern.

Die Projektpartner setzen sich aus namenhaften Industrieunternehmen zusammen, darunter die H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH aus Hessisch-Lichtenau und die Sirius-ES aus Celle. Zudem sind die ausführenden Stellen der TU Clausthal als Koordinatorin des Verbundprojektes beteiligt, einschließlich des Institute of Subsurface Energy Systems und des Drilling Simulator Celle.

Im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms wurde vom Antragsteller (TUC) unter dem Schwerpunkt der „Weiterentwicklung der Bohrtechnologie sowie neuer Werkzeuge und Verfahren mit dem Ziel, die Bohr- und Komplettierungskosten zu reduzieren“ ein neuartiger, spülungsgetriebener Bohrer an der TUC (FKZ 0324242) entwickelt, welcher durch Schaffung effizienterer Bohrbedingungen die Kosten und Risiken der tiefen Geothermie zu senken vermag.

Beabsichtigt ist nun, dass der Bohrer, der bislang in einer Laborumgebung eingesetzt worden ist, eine wesentliche Feldertüchtigung erfährt. Dies steht im Einklang mit dem 7. Energieforschungsprogramm, das u. a. unter den strategisch wichtigen FuE-Themen eine Weiterentwicklung der Technologie unter den Aspekten der Kostensenkung, Effizienzsteigerung, Risikominimierung etc. fordert. Im Fall des spülungsgetriebenen Bohrhammers sind dazu erhebliche Anstrengungen in Richtung weiterer Optimierung, Wahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren und insbesondere die Langzeiterprobung unter Realbedingungen im Feld Voraussetzung.

Die zentrale Absicht des im oberen Segment des Technical Readiness Levels (6-9) angesiedelten Verbundprojektes ist die weitgehende Feldertüchtigung, welches die Voraussetzung bilden



Abbildung 1: Einbau des Prototypen auf einer Bohrung an der TU Darmstadt.

soll für die angestrebte zukünftige Vermarktung und den kommerziellen Einsatz des spülungsgetriebenen Bohrhammers im Anschluss an das Projekt.

### Projektziele und Entwicklungsschwerpunkte

Es ergeben sich die folgenden technischen Ziele und Teilprojekte in der Entwicklungsarbeit:

- Optimierung des vorhandenen Prototyp-Werkzeugs im Laborversuchen und Simulationen
- Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Prototypen der Größe 6 ¾"
- Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Prototypen der Größe 9 ½"
- Bohrversuche im Labor und im Feld
- Feldeinsätze in Tiefbohrungen
- Analyse der Ergebnisse und Schaffung der Voraussetzungen für eine nachfolgende Herstellung der Marktreife dieser Technologie

#### TP 1 Optimierung Labor-Prototypwerkzeug in Laborversuchen und Simulationen

Das Teilprojekt 1 widmet sich eingehend der vertieften Analyse und Optimierung des im vorangegangenen Projekts OBH entwickelten Prototypen für den Laborbetrieb. Zudem liegt der Fokus auf der

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

OBF: Optimierung und Feldertüchtigung eines mit Spülung betriebenen Bohrhammers

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK)

**Förderzeitraum:** 01.07.2023 – 31.12.2026

**Förderkennzeichen:** 03EE4050A

### Projektleiter:

Prof. Dr. Philip Jaeger (ITE – TU Clausthal)

### Verbundpartner:

H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbau-gesellschaft mbH;

Projektleiter: Peter Kriebel

Ansprechpartner: M. Huber, Juergen Stumpf

Sirius-ES Deutschland GmbH;

Ansprechpartner: Dr. Bianca Buchner, Philip Wachtel, Alexander Buchner

### Projektkoordinator:

Erik Feldmann, M. Sc.

### Projektbearbeiter:

Dr.-Ing. Michel Bannenber, Wolfgang Hollstein, M.Sc.



Philip Jaeger



Erik Feldmann

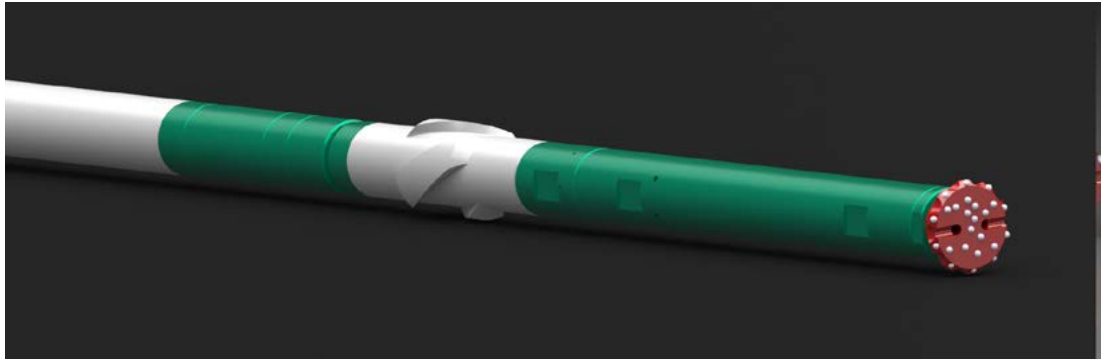


Abbildung 2: Grafische Darstellung des Prototypen in der Bohrstranggarnitur.

Einrichtung einer neuen Testmöglichkeit, die eine gezielte Überprüfung der Funktionalität und des Betriebsverhaltens der Bohrhämmerprototypen ermöglicht. Insbesondere werden derzeit die Testkapazitäten am DSC zu diesem Zweck erweitert, sowie Simulationen im fortgeschrittenen Status durchgeführt.

#### TP 2 Erprobung und Optimierung des vorhandenen Prototyps im Labor

Gegenstand von Teilprojekt 2 ist die Bereitstellung einer neuen Generation des spülungsgetriebenen Bohrhammers, der auch für den Einsatz in kommerziellen und professionellen Bohrlochumgebungen als deutlich verbesserter Prototyp geeignet ist. Die Grundlage für die Weiterentwicklung der ersten Generation stellen hierfür die Ergebnisse aus TP 1 dar.

#### TP 3 Entwicklung, Konstruktion und Fertigung des Prototyp-Werkzeugs 9 1/2"

Im Teilprojekt 3 wird eine weitere Werkzeuggröße (9 1/2") entwickelt, die in Geothermiebohrungen für 12 1/4" Bohrlochdurchmesser eingesetzt werden kann. Diese stellt nach dem 8 1/2" Bohrlochdurchmesser den zweitwichtigsten Bereich dar, um tiefe Bohrungen auf Geothermie im Hartgestein mit teleskopischen Komplettierungen zu ermöglichen. Grundlage für den ersten Entwurf stellen hier die errechneten Simulationsergebnisse dar. Aufgrund des größeren Bohrlochdurchmessers werden die erzeugte Schlagenergie und Schlagleistung in der Konzeptionierung auf den Bedarf zum Bohren angepasst. Außerdem wird die Konstruktion um die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem 6 3/4" Prototyp erweitert, woraus ein

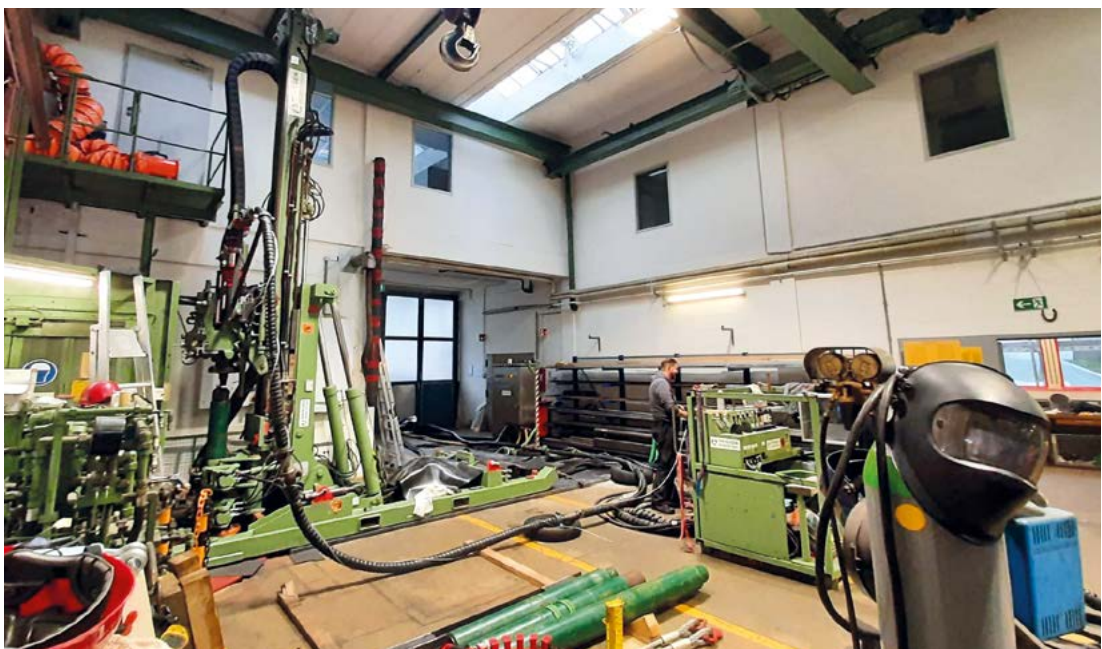


Abbildung 3: Versuchsbohrung mit dem Prototypen am vertikalen Versuchsteststand im 30 m tiefen Schacht am Institute of Subsurface Energy Systems (ITE).

Bohrhammerprototyp resultieren wird, der gleichfalls nahe an die Marktreife herangeführt wird.

Sirius-ES ermittelt und derzeit in der Simulation eingesetzt. Gleichzeitig laufen Planungen für die Entwicklung neuer Prototypengenerationen in den Baugrößen 6.3/4" sowie 9.1/2".

#### **TP 4 Bohrversuche im Labor und im Feld (Testbohrungen)**

Das Teilprojekt 4 startet bereits zu Beginn des Projektes und stellt die Entwicklungsstufe vor dem eigentlichen Einsatz der Bohrhammerprototypen in Geothermiebohrungen im Feld dar. Zu den Vorbereitungen hierfür gehört mit AP 2 auch die Auslegung und Bereitstellung einer optimierten Bohrspülung, die die Bohrlochintegrität ebenso sichert wie ein optimales Betriebsverhalten, insbesondere bezüglich des Verschleißwiderstands.

#### **Zukünftige Forschungsarbeiten**

Schwerpunkte der zukünftigen Forschungsarbeit im Rahmen des Projektes sind die Simulation der neuen Generation der Prototypen sowie ausgiebige Versuchsarbeiten mit den Prototypen am Drilling Simulator in Celle um jene für Versuche im Feld vorzubereiten. Des Weiteren gilt es, die Akquise von Feldtestmöglichkeiten gezielt voran zu treiben.

#### **TP 5 Feldeinsätze in Geothermieprojekten**

Die eigentliche Entwicklung der neuen feldgängigen Prototypen sollte nach TP 4 soweit abgeschlossen sein, so dass im Teilprojekt 5 die Einsätze der neuen Werkzeuge in „echten“ Geothermiebohrungen erfolgen können. Dazu wird die Akquise von Feldtestgelegenheiten im Rahmen von Geothermieprojekten kontinuierlich während der gesamten Projektlaufzeit betrieben.

#### **TP 6 Analyse der Ergebnisse und Planung für Kommerzialisierungsphase**

Das Teilprojekt 6 behandelt schwerpunktmäßig die Verwertung des bis hierhin erzielten Entwicklungsergebnisses und stellt das letzte Teilpaket dar. Dazu gehören die detaillierte Analyse der Feldtestergebnisse, die Optimierung des Hammerkonzeptes nach den Feldtests, die Kommunikation der Entwicklungsergebnisse sowie die Planung der nachfolgenden Kommerzialisierungsperiode.

#### **Erzielte Ergebnisse zum Berichtszeitraum**

Seit Projektbeginn am 01.07.2023 wurden insbesondere die Testkapazitäten am Drilling Simulator in Celle in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner, der H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH, erweitert. Diese stellt eine vertikale Bohrlafette zur Verfügung, um die Durchführung der Versuche zu ermöglichen. Der bereits existierende Prototyp wurde überholt, um Daten zur Verifizierung der Simulationen in den bevorstehenden Versuchen zu generieren. Daten über Spülungsinformationen wurden in Zusammenarbeit mit

# Modellierung und numerische Berechnung des Mehrphasentransports in der Tiefbohrtechnik

## Kurzfassung

Strömungsmechanik spielt eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung eines sicheren und effizienten Bohrbetriebs. Der Transport des Bohrkleins muss sichergestellt werden für die bei Tiefbohrungen typischen Bedingungen, d.h. bei hohem Druck und hohen Temperaturen, unter Verwendung von Bohrspülungen mit komplexer Rheologie und über Entfernungen von mehreren Kilometern. Das Ziel des DFG-Projekts ist die Entwicklung und Anwendung von validierten und effizienten Modellen zur Vorhersage des Transports von Bohrklein unter Berücksichtigung realistischer Flüssigkeitseigenschaften (z.B. Rheologie), Partikeleigenschaften wie Größenverteilung, sowie Betriebsbedingungen Druck und Temperatur, der Bohrstrangrotation und Durchflussraten. Schließlich sollen diese Modelle die Echtzeitvorhersage des Bohrkleintransports und die Optimierung von Betriebsbedingungen ermöglichen. Um diesem Ziel näher zu kommen, werden mehrphasige CFD-Berechnungen durchgeführt, die eine breite Variation der zuvor genannten Parameter berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser aufwändigen Berechnungen werden in makroskopischen Modellen, z.B. dem Drift-Flux-Modell oder Mehrschicht-Modellen, aggregiert. Außerdem werden sie verwendet, um grundlegende Zusammenhänge von Bohrkleintransport, Druckverlust, Partikeleigenschaften, Flüssigkeitseigenschaften und Betriebsparametern zu beschreiben.

In dem Projekt werden einerseits skalenauflösende und rechenaufwändige Verfahren für grundlegende Betrachtungen des mehrphasigen Transports verwendet. Darauf aufbauend werden effiziente Euler-Lagrange-Verfahren weiterentwickelt und eingesetzt, um den Transport für ein breites Spektrum an Parametern untersuchen und Daten für aggregierte Modelle liefern zu können.

Das skalenauflösende Modelle basiert auf einer Kombination der Immersed Boundary Methode (IBM) in der Software OpenFOAM zur Berechnungen der Strömung der kontinuierlichen

Phase und einer Discrete Element Methode (DEM) zur Berechnung der Dynamik einzelner Partikel. Im Berichtsjahr 2022 wurde ein Programm von Zhang, Wu und Nandakumar [1] weiterentwickelt und an die spezifischen Anforderungen des vorliegenden Projektes angepasst. Insbesondere wurde ein impulsbasiertes Kollisionsmodell zur Auflösung der Partikel-Partikel-Wechselwirkung implementiert. Die numerische Methode wurde anhand des bekannten "Drafting Kissing Tumbling"-Testfalls und eigener experimenteller Daten [2] validiert. Das Verfahren wird nunmehr eingesetzt, um die Auswirkungen von Partikelgröße und Reynolds-Zahl auf die Transporteffizienz in einem horizontalen Bohrlochabschnitt zu untersuchen (Abb. 1). In einem weiteren Projektabschnitt werden Partikelmischungen mit Durchmessern von 1 mm bis 6 mm betrachtet. Hier stehen Messergebnisse zur Validierung zur Verfügung mit einer Partikelkonzentration von bis zu 1 Vol.%. Zudem werden Vergleiche von skalenauflösenden (IBM) und nicht skalenauflösenden Methoden (Euler-Lagrange-Methode) angestellt.

In einem weiteren Schritt soll die Interaktionsdynamik zwischen den Partikeln und dem Fluid untersucht werden. Für Newtonsche Fluide ist diese recht gut erforscht, nicht so für nicht-Newtonsche Fluide. Zudem sollen Parameter wie Partikelgröße, -form und -konzentration untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten dienen dazu, nicht-skalenauflösende Modelle wie die Euler-Lagrange-Methode, die in einem weiteren Teilprojekt eingesetzt wird, bzgl. der Interaktionsdynamik zu ertüchtigen.

Der Transport im Ringspalt für typische Bedingungen beim Bohrbetrieb wird mittels Euler-Lagrange-Verfahren abgebildet. Parameter wie Exzentrizität des Bohrstrangs, Rotationsgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit und Partikelkonzentration können hier umfassend variiert werden. Der Fokus liegt insbesondere auf dem Auftreten von Sekundärströmungen, den sogenannten Taylorwirbeln, die in vertikalen Bohrungen einen negativen Effekt auf die Transporteffizienz haben.

Um eine breite Parametervariation durchführen zu können, wird diese in Form eines DoE (Design of Experiments) zunächst für den vertikalen Transport im Ringspalt geplant. Dabei wird der Einfluss von Parametern auf den Bohrkleintransport, auf den Druckverlust und auf die Bildung von Taylorwirbeln quantifiziert. Die variierten Parameter sind die Durchflussgeschwindigkeit, die Bohrklein-Konzentration und die Rotationsgeschwindigkeit des Bohrstrangs. Alle geplanten Parametervariationen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: DoE-Parametervariationen.

Parameter	Symbol	Bereich	Einheit
Strömungsgeschwindigkeit	$u_f$	0 - 1	m/s
Dichte der Flüssigkeit	$\rho_f$	700 - 1000	kg/m <sup>3</sup>
Viskosität der Flüssigkeit	$\nu_f$	40 - 80	mPa s
Durchmesser der Partikel	$d_p$	0.1 - 5	mm
Konzentration der Partikel	$\alpha_p$	0 - 5	%
Dichte der Partikel	$\rho_p$	1500 - 2500	kg/m <sup>3</sup>
Rotation des Bohrstrangs	$\omega$	0 - 200	rpm
Exzentrizität des Bohrstrangs	$\varepsilon$	0 (konzentrisch) - 80	%
Neigungswinkel der Bohrung	$\gamma$	0 - 90	°

Bohrklein-Partikel ordnen sich vorzugsweise im Bereich der höchsten Strömungsgeschwindigkeiten an. Bei Rotation des Bohrstrangs wandern sie allerdings aufgrund der Zentrifugalkraft in den außen liegenden Bereich des Ringspalts mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten, siehe Abb. 2. Daher wird bei vertikalen Bohrungen der Transport durch Rotation des Bohrstrangs negativ beeinträchtigt. In Abb. 3 ist das Ergebnis zweier Rechnungen mit Taylorwirbeln und Bohrklein visualisiert, wobei sich Bohrklein-Partikel in den Wirbeln konzentrieren. Erste Hinweise auf eine Transporthemmung durch Taylorwirbel sind in Abb. 4 erkennbar.

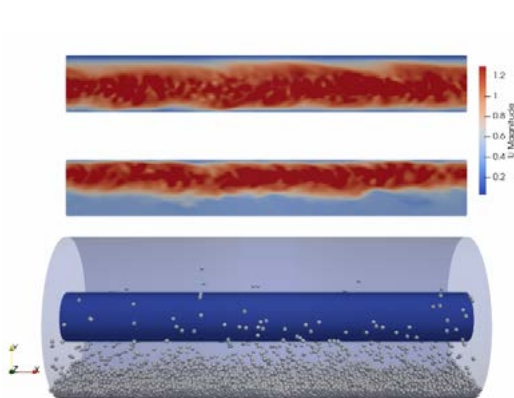


Abbildung 1: Ergebnis einer Berechnung des Bohrkleintransports mit der IBM in einem horizontalen Bohrabschnitt von 1 m bei einer Reynolds-Zahl von  $Re = 1.400$ , mit 10.000 Partikeln mit einem Durchmesser von  $d = 5$  mm. Oben: Strömungsgeschwindigkeit der Bohrspülung in m/s. Unten: Bohrklein sedimentiert aufgrund der Gravitation.

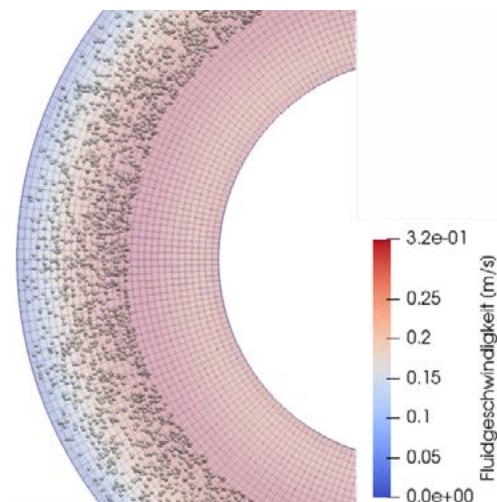


Abbildung 2: Anordnung der Bohrklein-Partikel bei Rotation des Bohrstrangs. Durch die Zentrifugalkraft werden Partikel in die äußeren Regionen des Ringspalts gedrängt, wo die Fluidgeschwindigkeit geringer ist. Das führt zu einer geringeren Transporteffizienz.

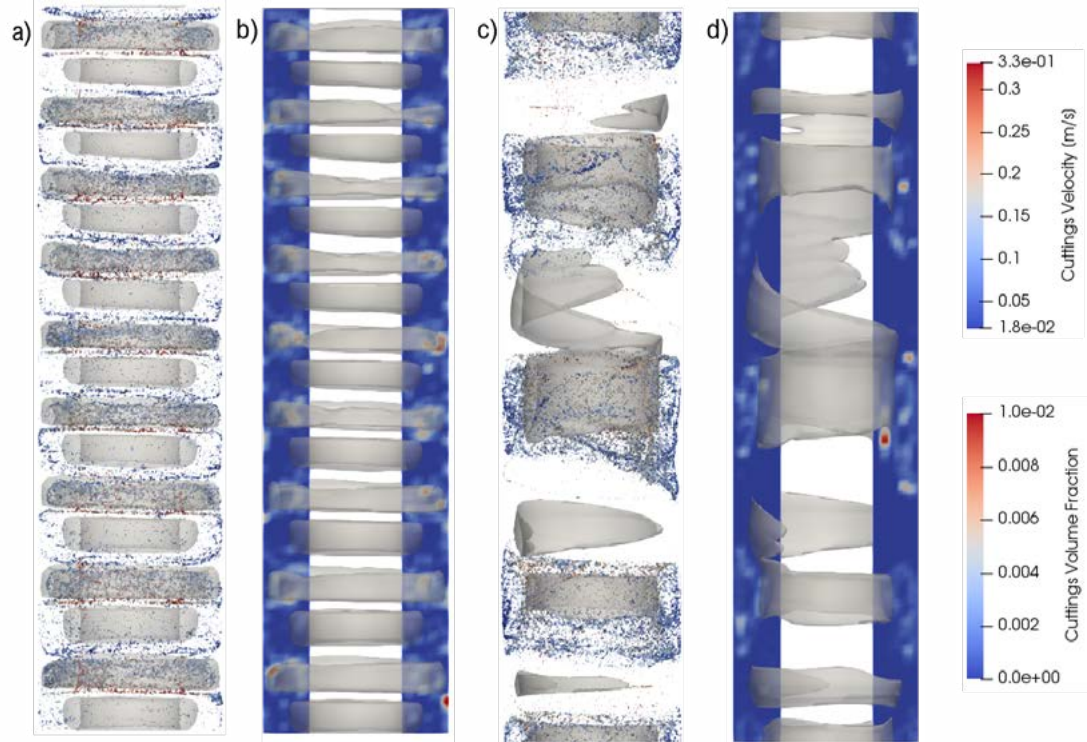


Abbildung 3: Anordnung von Bohrklein-Partikeln in einer Taylor-Strömung. Partikel konzentrieren sich in den Wirbeln. (a), (b): geringe Durchflussrate, mittlere Umdrehungsgeschwindigkeit (100 rpm).  $Ta = 357$ ,  $Re = 28$ . (a): Taylorwirbel und Bohrklein, (b): Taylorwirbel und Volumenanteil des Bohrkleins. (c), (d): mittlere Durchflussrate, hohe Umdrehungsgeschwindigkeit (200 rpm).  $Ta = 714$ ,  $Re = 280$ . (c): Taylorwirbel und Bohrklein, (d): Taylorwirbel und Volumenanteil des Bohrkleins.

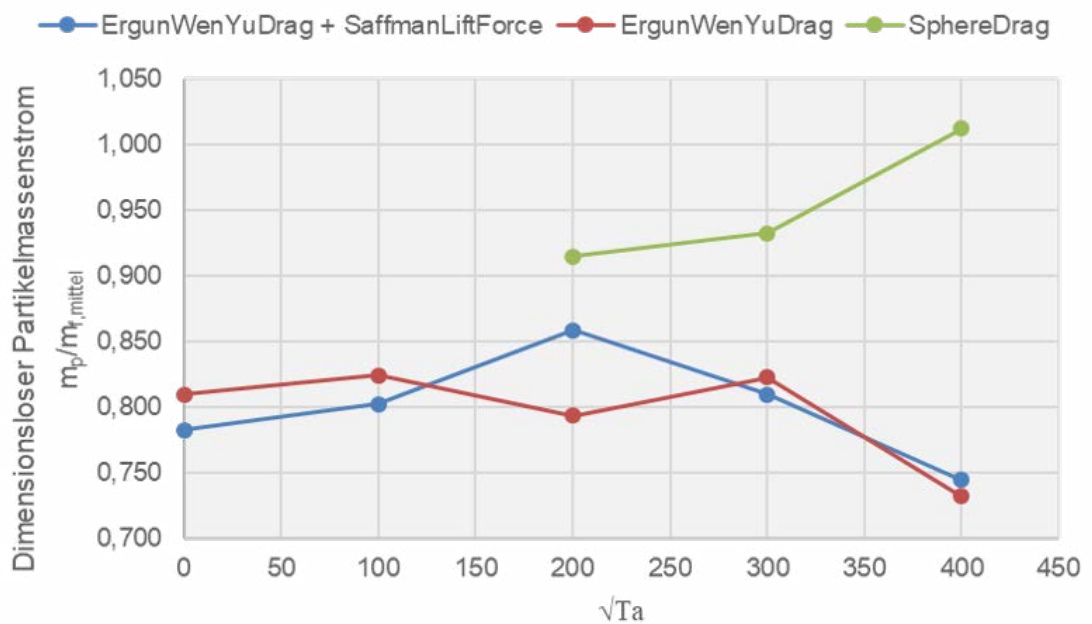


Abbildung 4: Transporteffizienz als Funktion der Taylorzahl. Eine höhere Taylorzahl ist gleichbedeutend mit einer höheren Rotationsgeschwindigkeit. Mit dem Auftreten von Taylorwirbeln sinkt die Transporteffizienz. Der Vergleich verschiedener Interaktionsmodelle zeigt, dass diese Effekte nur dann richtig abgebildet werden, wenn die relevanten physikalischen Vorgänge modelliert werden.



## Referenzen

1. Chenguang Zhang, Chunliang Wu, and Krishnaswamy Nandakumar: Effective geometric algorithms for immersed boundary method using signed distance field. *Journal of Fluids Engineering*, 141(6):061401, 2019.
2. R. Aragall, V. Mulchandani, G. Brenner: Optical measurement and numerical analysis of mono- and bidisperse coarse suspensions in vertical axisymmetric sudden-expansion, 3. *International Journal of Multiphase Flow*, Volume 69, 2015, Pages 63-80, <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.002>.
3. K. Skinder, H. Ibrahim, G. Brenner: Numerical investigation of the influence of secondary flow structures on drill cuttings transport, to be submitted to: *International Journal of Multiphase Flow Geoenergy Science and Engineering*, 2023.
4. K. Skinder, G. Brenner: Numerische Simulation des Bohrkleintransports in einem Ringspalt unter Berücksichtigung der Bohrstrangrotation, Jahrestreffen der ProcessNET Fachgruppen CFD + Mischvorgänge + Aggl und Schüttguttechnik, 2022.
5. H. Ibrahim, G. Brenner: Simulation of Cuttings Transport in Horizontal Wells using high Resolution Numerical Methods, *Celle Drilling* 2023.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Modellierung und numerische Berechnung des Mehrphasentransports in der Tiefbohrtechnik

### Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft

### Förderkennzeichen:

BR 1864/16-1

### Laufzeit:

01.04.2021 – 31.12.2025

### Berichtszeitraum:

01.01.2022 – 31.12.2023

### Ausführende Stelle:

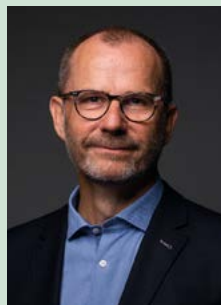
Drilling Simulator Celle (DSC) und Institut für Technische Mechanik (ITM)

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Gunther Brenner

### Projektbearbeiter:innen:

Kathrin Skinder, M.Sc.,  
Hozan Ibrahim, M.Sc.



Gunther Brenner



Kathrin Skinder

# Umlaufprüfstand mit variabler Neigung zur Charakterisierung des Bohrkleintransports

## Kurzfassung

Der überwiegende Teil der Kosten zur Erschließung des geologischen Untergrunds wird durch den Bohrprozess verursacht. Dies gilt für fossile Energieträger und im verstärkten Maße besonders bei der energetischen und stofflichen Nutzung des geologischen Untergrundes, bspw. zur Gewinnung von Erdwärme oder der großtechnischen Speicherung von (Ab-)Wärme oder regenerativ erzeugtem Wasserstoff. Insbesondere zum Ausbau der Geothermie sind daher zwingend vorhandene Technik- und Kostenrisiken substanziell zu senken. Entsprechende Maßnahmen können an verschiedenen Stellen des Bohrprozesses ansetzen. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist die Reduzierung der nicht-produktiven Zeiten, die beispielsweise durch technische Störungen, durch erhöhten Verschleiß oder ungünstige Bohrbedingungen hervorgerufen werden können. Erfahrungswerte aus aktuellen Bohrprojekten belegen, dass etwa 40% der nicht-produktiven Zeiten und somit ein erheblicher Teil der Kosten eines Bohrprojektes auf Probleme des Spülungsprozesses zurückzuführen sind.

Um den Bohrprozess systematisch zu optimieren ist es erforderlich, die relevanten physikalischen Vorgänge genauer als bisher möglich quantifizieren zu können. An dieser Stelle setzt das vorliegende Projekt an, um die mehrphasigen Transportvorgänge im Spülungs- (Bohrkleinaustrag) unter Einbeziehung der Dynamik des Bohrstrangs experimentell zu untersuchen. Hierzu soll am Standort des Forschungszen-

trums Drilling Simulators Celle eine modular aufgebaute Anlage im Technikums-Maßstab konzipiert und in Betrieb genommen werden. Alleinstellungsmerkmale der Anlage sind die Kombination moderner hochauflösender Messtechnik zur quantitativen Analyse von Mehrphasenströmungen (liquid/solid) unter realistischen und reproduzierbaren Bohrprozessbedingungen bzgl. der Rheologie der Flüssigkeit sowie der variablen Neigung des rotierenden verstellbaren Innenrohrs. Im Projekt werden optisch zugängliche Modellflüssigkeiten mit angepasster Rheologie eingesetzt sowie Partikel mit definierter Form und Größenverteilung. Damit werden wichtige und fundierte Daten für die Validierung von Modellen zur Optimierung von Bohrprozessen geliefert. Die Anlage ergänzt diesbezüglich die Arbeiten in einem DFG-Projekt, in dem Computermodelle für den Bohrkleintransport entwickelt werden.

Sowohl bei der Planung als auch bei der Durchführung einer Bohrung ist die genaue Kenntnis des Druck- und Temperaturprofils als auch der Effizienz zum Bohrkleintransports notwendig, um eine geothermische Tiefenbohrung sicher und schnell erstellen zu können. Die Kenntnis über die strömungsmechanische Situation muss sich dabei sowohl auf die zu erwartenden Parameter beziehen, als auch auf die zu erwartenden Änderungen derselben bei Variation der Rand- und Bohrbedingungen. Somit ist die Simulation des Bohrkleintransports Bestandteil einer integrierten strömungsmechanischen Simulation. Probleme mit der Bohrlochreinigung bedingen zeitintensive Korrekturmaß-

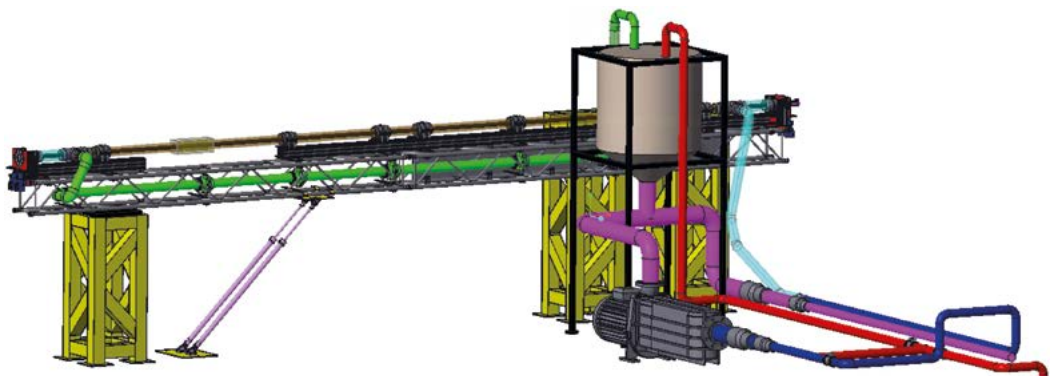


Abbildung 1: Entwurf der geplanten Anlage.

nahmen und verursachen unplanbare Kosten für Geothermiebohrungen. Variierende Bohrlochneigungen und Strömungsquerschnitte entlang der Bohrpfadefasern erfordern jederzeit und für jeden Ort entlang des geothermischen Bohrlochs ein Verständnis des Zusammenwirkens der Bohrkleinpartikel mit der strömenden Bohrspülung.

Ein wichtiger zu klärender Aspekt ist die optimale Bohrstrangrotation unter Berücksichtigung der übrigen Betriebsparameter, die beim Bohren des Bohrlochs auftreten. Dieser Parameter ist in der Lage, die Reinigungsbedingungen im Bohrloch zu verbessern, wobei die resultierenden Drücke entlang des Bohrlochs nur geringfügig variieren. Zu hohe Rotationen können jedoch zu einem ermüdungsbedingten Versagen des Bohrgestänges führen. Das Verständnis der Auswirkungen der Rotation auf die Bohrlochreinigung bei unterschiedlichen Exzentrizitäten hat das Potenzial, diesen wichtigen Parameter zu optimieren und den Bohrprozess zu verbessern.

Neben dem eigentlichen Aufbau der Versuchsanlage soll in dem Projekt basierend auf den Vorarbeiten am DSC ein Datenmodell vorbereitet werden für die datenbasierte Modellierung des Bohrkleinaustrags. Hierfür kommen Methoden des maschinellen Lernens (ML) zum Einsatz. Die Vorarbeiten am DSC, u.a. im OBE-Projekt, haben gezeigt, dass ein erheblicher Teil des Aufwands aus der Vorverarbeitung der Daten resultiert. So ist z.B. zu klären, wie Daten aus bildgebenden Messverfahren, wie z.B. PIV (particle image velocimetry), zielführend mit ML ausgewertet werden können.

Parallel zu den Arbeiten in diesem Projekt werden in einem DFG-Projekt am ITM physikalische motivierte Modelle entwickelt. Ergebnisse dieser Berechnungen sollen nach Inbetriebnahme der Anlage durch Messdaten validiert werden. Diese Berechnungsdaten können genutzt werden, um die datenbasierte Modellierung zu unterstützen. Dazu werden transiente Daten für Partikelgeschwindigkeiten und Partikelkonzentrationen aus den numerischen Berechnungen im Datenmodell verwendet und aggregiert.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Umlaufprüfstand mit variabler Neigung zur Charakterisierung des Bohrkleintransports

### Förderprogramm Durchbrüche:

Unterstützung von Kooperationsprojekten zwischen Wissenschaft und Wirtschaft

### Fördermittelgeber:

Baker Hughes INTEQ GmbH und Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur MWK

### Förderkennzeichen:

11-76251-4311/2023 ZN 4260

### Ausführende Stelle:

Drilling Simulator Celle (DSC) und Institut für Technische Mechanik (ITM)

### Projektlaufzeit:

01.10.2023 – 30.9.2025

### Berichtszeitraum:

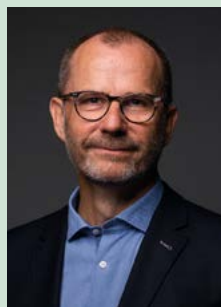
01.10.2023 – 31.12.2023

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Gunter Brenner

### Projektbearbeiter:

Harits Jundullah Alkatiri, M.Sc.



Gunther Brenner



Harits Jundullah Alkatiri

# Geschlossene mitteltiefe Geothermiesysteme für die dezentrale Wärmeversorgung

## Kurzfassung

Das beantragte Vorhaben zielt auf eine systematische und flächendeckende Nutzung der mitteltiefen Geothermie, insbesondere für Kommunen, mittelständische Industriebetriebe und Einrichtungen, die nicht über einen Anschluss an größere Wärmeverbände bzw. Fernwärmenetze verfügen. Die Wärmeversorgung muss daher zur Vermeidung von Wärmeverlusten dezentral erfolgen. Darüber hinaus sind die Erstellungskosten und -risiken geothermaler Projekte zu minimieren. An der Bandbreite der unterschiedlichen Gewerke und Fachfirmen, die an Geothermieprojekten beteiligt sind, wird die Komplexität der Aufgabenstellung deutlich und es existieren diverse Beispiele für Projekte, die nicht erfolgreich waren bzw. stark nachgebessert werden mussten.

Es handelt sich hier um ein Vorhaben zur Entwicklung von Leittechnologien der Energiewende, die sich mit drei Themenfeldern und den zugehörigen Fragestellungen schwerpunktmäßig befasst:

- b) Energiebereitstellung: „Können mitteltiefe Erdwärmesonden wirtschaftlich und technisch so optimiert werden, dass sie integrierter Teil eines Gesamtkonzeptes für eine nachhaltige Wärmeversorgung werden?“
- c) Systemintegration: Anbindung der Geothermie an dezentrale Wärmeabnehmer, die z.B. nicht an Fernwärmenetze angeschlossen sind oder Gemeinden, die über keine eigenen Stadtwerke verfügen
- d) Systemanalyse und Digitalisierung: systematische Bestandsaufnahme, Datenanalyse und KI-basierte Optimierung der Bohrtechnik

Dabei hat jedes neue Geothermie-Projekt spezifische Herausforderungen, sowohl aufgrund des inhomogenen Geountergrundes als auch der lokal spezifischen Anforderungen der potenziellen Abnehmer. Dieses IGF-Projekt der industriellen Gemeinschaftsforschung soll in dieser Gemengelage einen entscheidenden Beitrag liefern, die mitteltiefe Geothermie zu einem Pfeiler in der zukünftigen Wärmeversorgung auszubauen und über Synergien der beteiligten Partner insbesondere für kmU zu zukunftswei-

senden und international konkurrenzfähigen Produkten führen. Aufgrund der traditionell interdisziplinär ausgerichteten Struktur der Forschungseinrichtung Institute of Subsurface Energy Systems (ITE), die alle wichtigen Bereiche der Erschließung des Geountergrundes für die geothermische Energieversorgung abdeckt, ist diese Einrichtung in besonderem Maße für die Koordinierung und Anleitung eines entsprechenden F&E-Vorhabens unter Prof. Philip Jaeger geeignet. Als weiteres Themenfeld, das für eine erfolgreiche industrielle Umsetzung essenziell ist, wurde eine bedarfsgerechte und alle Randbedingungen berücksichtigende Anbindung an bestehende bzw. an neu zu schaffende Wärmenetze identifiziert und mit dem Institut für energieoptimierte Systeme an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften unter Leitung von Prof. Lars Kühl ein kompetenter Kooperationspartner in das Konsortium aufgenommen. In bohrtechnischen Fragestellungen wird das Konsortium durch den Drilling Simulator in Celle (DSC) unter wissenschaftlicher Leitung von Prof. Gunther Brenner ergänzt, der gleichzeitig einen Lehrstuhl am Institut für Technische Mechanik (ITM) innehält. Mittels der realitätsnahen Modellierung von komplexen Tiefbohrprozessen im Realmaßstab sollen die technisch-wirtschaftlichen Risiken von Tiefbohrungen in enger Zusammenarbeit mit dem ITE bereits im Vorfeld umfassend analysiert und minimiert werden. Darüber hinaus ist der langjährige und sichere Betrieb entsprechend einer fundierten ingenieurtechnischen Auslegung durch Simulationen sowohl der zeitlichen Temperaturverteilungen im Geountergrund als auch des Wärmeproduktionssystems zu optimieren und abzusichern. Dieser Aufgabenbereich wird ebenfalls von Prof. Brenner (ITM/DSC) an der TU Clausthal übernommen.

Die inhaltliche Verzahnung des Projektes betrifft sämtliche Arbeitsinhalte von der gemeinsamen Bestandsaufnahme, der Untersuchung notwendiger Grundlagen in Modell und Experiment, gemeinsam geplanten und durchgeführten Bohrversuchen, Durchführung von Testläufen an einem Pilotteststand, der zugehörigen Simulationen, der Kostenoptimierung und Risikoreduzierung in sämtlichen AP bis hin zu einer techno-ökonomischen Gesamtbewertung. Die

Randbedingungen bilden auf der einen Seite die potenziellen Abnehmer in Bezug auf Wärmeleistung und Jahreskennlinie. Die hier zu analysierende bzw. zu entwickelnde Technologie ist im Wesentlichen auf kleinere Gemeinden, Industrieparks und Einrichtungen ausgerichtet und muss sowohl robust funktionieren als auch wirtschaftlich darstellbar sein. Hier beginnt die Verzahnung mit der Technologie zur Bereitstellung der Wärme und einer Vorhersage über eine realistische Wärmeleistung sowie einen dauerhaft garantierten Betrieb. Ein wesentlicher Kostenfaktor ist die Bohrung und Komplettierung, die daher als integrativer Bestandteil in das Vorhaben mit aufgenommen wurden. Sowohl am ITE als auch ITM/DSC bestehen hier langjährige und komplementäre Erfahrungen, die in diesem Vorhaben kombiniert werden.

Die Vorwettbewerblichkeit von IGF-Projekten ist an dieser Stelle von großer Bedeutung, da es hier um die Schaffung von wichtigen Grundlagen geht, die für eine spätere erfolgreiche und lokale Umsetzung entscheidend sind, und sowohl interessierten Anwendern als auch beteiligten Firmen zur Verfügung gestellt werden sollen. Aufgrund der Tatsache, dass die zu untersuchende Sondentechnologie im Gegensatz zu hydrothermalen Systemen sehr viel unabhängiger von limitierenden Faktoren im Geountergrund dargestellt werden kann, ist nach der Entwicklung eines prinzipiell funktionierenden Gesamtkonzeptes, dieses auch für die Anwendung im Ausland, z.B. bei der großen Zahl an stillgelegten Bohrungen im Nigerdelta geeignet. Entsprechende Kontakte befinden sich bereits im Aufbau. Deutsche Anbieter können sodann auf Erfahrungen hierzulande verweisen und einen Wettbewerbsvorteil erlangen.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Geschlossene mitteltiefe Geothermiesysteme für die dezentrale Wärmeversorgung

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

### Förderzeitraum:

01.12.2023 – 30.11.2026

### Förderkennzeichen:

62402/007-01#70

### Ausführende Stelle:

FE 1: Institut für energieoptimierte Systeme (EOS), Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Prof. Dr. Lars Kühl

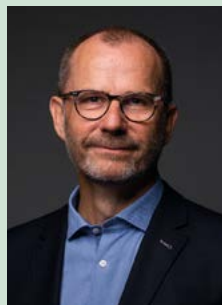
FE 2: Institute of Subsurface Energy Systems (ITE), TU Clausthal, Prof. Dr.-Ing. Philip Jaeger

FE 3: Drilling Simulator Celle (DSC) und Institut für Technische Mechanik (ITM), TU Clausthal, Prof. Dr.-Ing. Gunther Brenner

Forschungsvereinigungen DGMK e.V. und DECHEMA e.V.

### Projektleiter:

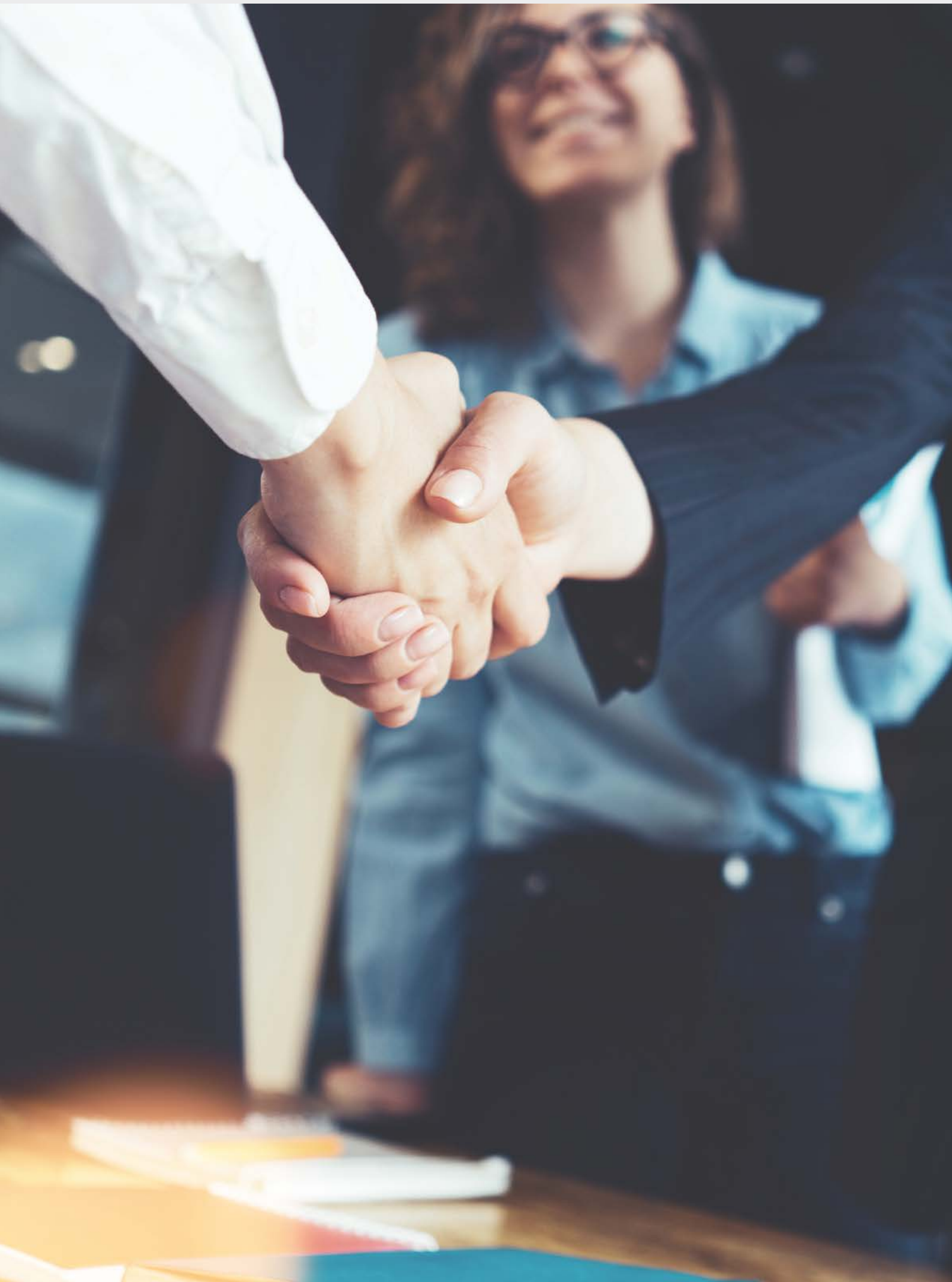
Prof. Dr.-Ing. Gunther Brenner,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Philip Jaeger,  
Prof. Dr.-Ing. Lars Kühl, Hochschule Ostfalia



Gunther Brenner



Philip Jaeger





# WISSENSTRANSFER IN DIE PRAXIS

4.

# Für die Fachkräfte von morgen – Einbindung des Drilling Simulator in die Lehre der TU Clausthal

Im Rahmen der Vorlesung „Anwendungen der Bohrtechnik“ besuchten Student:innen der TU Clausthal den Drilling Simulator in Celle, um grundlegende und vertiefende Betriebsprozesse sowie Szenarien beim tiefen Bohren in den Untergrund mithilfe des dortigen Software-Simulators zu erlernen.

Die zunehmenden interdisziplinären Anforderungen an zukünftige Ingenieur:innen erfordern eine frühzeitige und umfassende Auseinandersetzung mit den verschiedenen bohrtechnischen Systemen und den damit verbundenen Steuerungsprozessen an Tiefbohranlagen. Der Simulator am DSC bietet an dieser Stelle eine sehr gute Gelegenheit, die theoretische Grundlagen und Abläufe beim Bohren in einer interaktiven und visuell ansprechenden Umgebung zu studieren, zu vertiefen und zu festigen.

Bei ihrem Besuch im Wintersemester 2022/2023 durchliefen die Student:innen die in der Vorlesung zuvor besprochenen Szenarien wie Pipe Handling, Bohren, Kick Detection und Blow Out-Prevention, um diese Anwendungen der Bohrtechnik in einer visuell interaktiven und realitätsnahen Umgebung anzuwenden und zu verinnerlichen. Dabei wurden die folgenden Schritte am Simulator in Celle durchgeführt:

1. Einführung in den Trainingssimulator, einschließlich der Bedienung des Cyberchairs
2. Theoretische Erarbeitung der Trainingsszenarien
3. Erlernen der praktischen/ferngesteuerten Handhabung
4. Durchführung der Trainingsszenarien am Simulator
5. Auswertung und Evaluierung der Aktivität



Bild 1: Die Studierenden um Betreuer Erik Feldmann (2. v.r.) nach Abschluss des Seminars am DSC.





Bild 2 und 3: Studierende üben am Software Simulator des Drilling Simulators den Ablauf von Tiefbohrungen.

Neben der Ausbildung von Student:innen ist mit der Integration des Software-Simulators in das Lehrangebot der TU Clausthal auch die Entwicklung innovativer Ausbildungsmodulare für neue Anwendungsgebiete im Bereich der Nutzung des geologischen Untergrundes verbunden, um auch externe (Nachwuchs-)Fachkräfte in diesen Bereichen qualifizieren zu können.

Vorlesung	Anwendungen der Bohrtechnik
Zeitraum	Wintersemester 2022/23
Dozent:	Erik Feldmann, M.Sc.
Teilnehmende:	8 Studierende der Studiengänge Bachelor Geo-Energy Systems/ Master Petroleum Engineering



## Wissenstransfer in die Praxis und zurück – Die Celle Drilling Conference

Seit dem Jahr 2011 findet die jährliche „Celle Drilling Conference“ im Zentrum der deutschen Erdöl-, Erdgas- und Geothermieindustrie in Celle statt. Auf dieser Veranstaltung treffen sich jährlich internationale Expert:innen aus Wissenschaft und Industrie, um neueste Entwicklungen und Trends im Bereich der Tiefbohrtechnik sowie der Modellierung und Simulation von Tiefbohrprozessen zu diskutieren. Die internationale Fachtagung, welche vom regionalen Branchennetzwerk GeoEnergy e.V. organisiert wird, wird seit jeher maßgeblich von Wissenschaftler:innen der TU Clausthal mitgestaltet.

Insbesondere die 12. Auflage der Veranstaltung im September 2023, die insgesamt rund 270 Teilnehmer:innen aus 19 Ländern in das Zentrum der deutschen Tiefbohrindustrie nach Celle führte, bot Nachwuchswissenschaftler:innen der TU Clausthal eine ideale Gelegenheit, ihre Ergebnisse am internationalen Stand der Forschung zu messen und damit die Sichtbarkeit der Hochschule um den Themenbereich „High Performance Drilling“ zu steigern.

So berichteten Shahab Mohammadi und Hozan Ibrahim (beide Institut für Technische Mechanik) aus strömungsmechanischer Perspektive



Das Drillbotics-Team der TU Clausthal mit der in diesem Jahr siegreichen automatisierten Bohranlage (von links): Kanaan Al Maasarani, Ali Alkhwaja, Charalampos Soilemezidis und Lilav Koro.



Die Clausthaller Referenten Shahab Mohammadi (rechts) und Hozan Ibrahim (links) gemeinsam mit ihrer Kollegin Susanne Skinder vor dem Celler Tagungszentrum.

über eine vielversprechende Möglichkeit zur thermischen Energiespeicherung in Aquiferen, die über klassische Geothermie hinausgeht, sowie über eine neue Berechnungsmethode für mehrphasigen Transport von sphärischen und nicht-sphärischen Festkörper-Partikeln, wie sie etwa das Bohrklein darstellt.

Vom Clausthaller Institute of Subsurface Energy Systems (ITE) stellte Ramez Abdalla die Möglichkeiten maschinellen Lernens zur Optimierung des automatisierten Richtungsbohrens vor, während Michel Bannenber (ebenfalls ITE) über den aktuellen Stand des Hammerbohrens berichtete.

Ebenfalls vom DSC stammen neue Ansätze zur Vorabsimulation von Tiefbohrprozessen, wie beispielsweise die Integration neu entwickelter physikalischer Modelle sowie KI-Methoden in eine Echtzeit-Simulationsumgebung und die Modellierung eines dynamische angeregten Bohrstrangs unter Verwendung experimenteller Daten, wie sie von Harits Alkatiri und Patrick Höhn vorgestellt wurden.

Für das im Jahr 2023 im internationalen studentischen „Drillbotics“-Wettbewerb siegreiche Team des ITE berichtete Charalampos Soilemezidis über ein neuentwickeltes automatisiertes

Steuerungskonzept für Tiefbohranlagen. Auch auf der begleitenden Fachausstellung erfuhr der Clausthaller Wettbewerbsbeitrag große Resonanz.

Im Ergebnis hat sich die TU Clausthal mit ihrer Forschung im Bereich der Hochleistungsbohrtechnik, die eine entscheidende Rolle in der Entwicklung tiefengeothermischer Projekte spielt, und vor allem der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses international weiter profiliert.

## Tag der offenen Tür

Am 03.09.2022 öffnete der Drilling Simulator Celle erstmalig der interessierten Öffentlichkeit seine Türen, um Einblicke in die aktuellen Forschungstätigkeiten geben zu können.

In geführten Laborrundgängen erhielten die Besucher:innen Einblicke in die Forschungsmöglichkeiten in Celle. Unter dem Leitthema der TU Clausthal, der „Circular Economy“, also der nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, präsentierten sich auch weitere Einrichtungen der Hochschule am Standort Celle. Wie der gesellschaftliche Wandel hin zu mehr Nachhaltigkeit gelingen

kann, wurde im Projekt „FragFritzi!“ gezeigt, einem innovativ digital-gestützten Planspiel zum Thema Kreislaufwirtschaft. Passend dazu konnten in Kooperation mit dem regionalen Abfallwirtschaftsbetrieb private Haushalte ihre ausgedienten Elektrokleingeräte oder Handys kostenlos an einer Sammelbox abgeben.

Für die musikalische Untermalung an diesem Thema sorgte eine kleine Besetzung der Big Band der TU Clausthal. Attraktionen für Kinder sowie Snacks und Getränke rundeten das Programm an diesem spätsommerlichen Tag ab.



*Impressionen vom Tag der offenen Tür 2022.*









# SCHLAGLICHTER

5.



## Zukunftstag am Drilling Simulator

03.05.2022

Nach zwei Jahren pandemiebedingter Pause haben sich 12 Schüler:innen über die Arbeiten des Drilling Simulators Celle informiert.



## Forscher aus Brasilien zu Gast am DSC

22.06.2022

Alljährlich lädt die DGMK – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e.V. Fachleute aus Wissenschaft und Praxis aus dem In- und Ausland zu ihrer Frühjahrstagung nach Celle ein. Dieses Ereignis nahm Prof. Andreas Nascimento aus Brasilien zum Anlass, sich vor Ort über die Forschungstätigkeiten am Drilling Simulator Celle zu informieren.



## Forschungsprojekt zur Integration geothermaler Energie gestartet

08.09.2022

Am Drilling Simulator Celle (DSC) ist ein von der TU Clausthal koordiniertes Verbundprojekt zur Einbindung geothermaler Lagerstätten in Wärme- und Stromnetze gestartet.





## Tiefbohrtechnik anschaulich gemacht: Schul-AG aus Lachendorf zu Besuch am Drilling Simulator Celle

11.05.2023

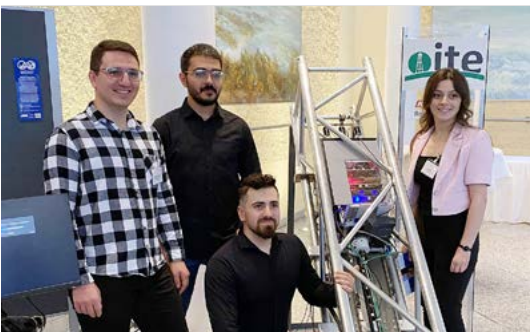
Welche Rolle spielt die Tiefbohrtechnik bei der Energiewende? Um diese und weitere Fragen klären zu können, haben Schülerinnen eine Exkursion zum Drilling Simulator Celle (DSC) der TU Clausthal unternommen.



## Celler Expertise in Norwegen gefragt

25.07.2023

Doktorand des Drilling Simulator Celle (DSC) als Gastredner zu norwegischer Geothermie-Konferenz eingeladen.



## Hochleistungsbohrtechnik: Clausthaler Expertise sehr gefragt

27.09.2023

Bei der diesjährigen internationalen „Celle Drilling Conference“ haben aktuelle Forschungsergebnisse der TU Clausthal eine starke Resonanz erfahren.



## „Durchbrüche“ in der Tiefbohrforschung

17.10.2023

Das Land Niedersachsen und die Firma Baker Hughes fördern neuartige Forschungsanlage am Drilling Simulator Celle.





# ANHANG

5.

# Publikationen

## 2022

### Studentische Abschlussarbeiten

BASHARA, Ahmed Rahim Kreem, 2022. Torque on Bit Prediction with Empirical and Machine Learning Models. 2022.

IBRAHIM, Hozan, 2022. Tuning of a PID-controller based kick handling solution in a simulated environment. 2022.

### Conference Paper

HÖHN, Patrick, Roger ARAGALL und Joachim OPPELT, 2022. Application of solids4Foam to The Damping of Drill String Vibrations. In: 17th OpenFOAM Workshop 2022. Cambridge, UK. 11 Juli 2022.

HÖHN, Patrick, Ahmed Rahim Kreem BASHARA, Carlos PAZ und Joachim OPPELT, 2022. Optimizing Models for Predicting Torque on Bit Using Data From the Volve Field in Norway. In: Volume 10: Petroleum Technology [online]. Hamburg, Germany: American Society of Mechanical Engineers. 5 Juni 2022. S. V010T11A011. [Zugriff am: 27 Juni 2023]. ISBN 978-0-7918-8595-6. Verfügbar unter: <https://asme-digitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/OMAE2022/85956/V010T11A011/1148112>.

IBRAHIM, Hozan, Patrick HÖHN, Damiano VARGNOLO und Joachim OPPELT, 2022. Tuning of a PID-Controller Based Kick Handling Solution in a Simulated Environment. In: Celle Drilling 2022 The way ahead International Conference and Exhibition for Advanced Drilling Technology. Celle Drilling. September 2022.

### Videoaufnahme

Application of solids4Foam to The Damping of Drill String Vibrations, 2022. [online]. [Video]. virtual: OpenFOAM-Workshop. Verfügbar unter: [https://www.youtube.com/watch?v=2vWb1iO2R\\_E](https://www.youtube.com/watch?v=2vWb1iO2R_E).

### Zeitschriftenartikel

HÖHN, Patrick, Felix ODEBRETT, Khizar SHAHID, Carlos PAZ und Joachim OPPELT, 2022. Framework for automated generation of real-time rate of penetration models. Journal of Petroleum Science and Engineering. Juni 2022. Bd. 213, S. 110369. DOI 10.1016/j.petrol.2022.110369.

## 2023

### Conference Paper

LI, Ke, 2023. High-Temperature Aquifer Energy Storage (HT-ATES) Feasibility Project in North Germany Geo-TES: Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in tiefen Aquiferen im Rahmen der „Wärmewende 2030“ Funding by Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF 06G0917A). In: Geothermie-Fachmesse GeoTHERM 2023. MESSE OFFENBURG. 2 März 2023.

LI, Ke, Leonhard GANZER, Philip T. JAEGER, S. PANG und X. WANG, 2023. Numerical Investigation of High Temperature Aquifer Energy Storage (HT-ATES) in Northern Germany. In: 84th EAGE Annual Conference & Exhibition [online]. Vienna, Austria,; European Association of Geoscientists & Engineers. 2023. S. 1–5. [Zugriff am: 29 Januar 2024]. Verfügbar unter: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202310766>.

MOHAMMADI, Shahab, 2023a. Vergleich der Effizienz von geothermischen Sonden und Dubletten. In: Der Geothermie Kongress 2023. Haus der Technik, Essen. 17 Oktober 2023.

MOHAMMADI, Shahab, 2023b. Numerische Simulation der Wärmeübertragung in einem geothermischen Dublett und seiner Umgebung. In: Clausthal Conference on Circular Economy: CCCE 2023. Clausthal. 23 November 2023.

SKINDER, Kathrin Susanne, Hozan IBRAHIM und Gunther BRENNER, 2023. Modelling and numerical simulation of the multiphase transport in deep drilling technology. In: Clausthal Conference on Circular Economy: CCCE 2023 [online]. Clausthal-Zellerfeld. 23 November 2023. Verfügbar unter: <https://www.tu-clausthal.de/ccce>.

### Vortrag

LI, Ke, 2023a. High Temperature Aquifer Energy Storage (HT-ATES) in Northern Germany. Sino-German Underground Clean Energy System Forum. Conference. Chengdu, China. 22 September 2023.

LI, Ke, 2023b. Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in tiefen Aquiferen (Georeservoiren) im Rahmen der „Wärmewende 2030“. GeoTES. invitation presentation. Southwestjiaotong University, ChengDu, China. Oktober 2023.

MOHAMMADI, Shahab, 2023. Modeling of heat and mass transfer in geothermal systems for energy storage and extraction. Celle Drilling 2023 [online]. Conference. Celle, Germany. September 2023. Verfügbar unter: [www.celle-drilling.com/program/conference-program-2023/](http://www.celle-drilling.com/program/conference-program-2023/).

### Zeitschriftenartikel

BRENNER, Gunther und Jens-Peter SPRINGMANN, 2023a. Erdwärme umweltgerecht und wirtschaftlich nutzen. Technologie-Informationen: ti. 2023. Bd. 2, S. 18.

BRENNER, Gunther und Jens-Peter SPRINGMANN, 2023b. Erdwärme umweltgerecht und wirtschaftlich nutzen: Risiken ermitteln, Technik entwickeln, Potenzial erschließen. [online]. 2023. [Zugriff am: 11 September 2023]. DOI 10.60479/72B]-H806. Verfügbar unter: <https://www.wissenhochn.de/de/themen/auswahl-und-uebersicht/einzelansicht/erdwaerme-umweltgerecht-und-wirtschaftlich-nutzen>.

# Abschied von Dr.- Ing Michael Koppe

Ende Juli 2023 mussten wir Abschied vom langjährigen Teststandsleiter Dr.-Ing. Michael Koppe nehmen, der plötzlich und unerwartet verstorben ist.

Dr. Koppe war seit Gründung des Forschungszentrums „Drilling Simulator Celle“ für den Aufbau und den Betrieb der komplexen Teststände zur Untersuchung von Tiefbohrprozessen verantwortlich. Seine Expertise war bei der initialen technischen Planung und Ausstattung des DSC von essentieller Bedeutung, auf deren Grundlage sich unsere Einrichtung zu einer führenden Institution im Bereich der Tiefbohrforschung entwickeln konnte.

Wir bedanken uns bei Dr. Koppe und werden ihm ein ehrendes Andenken bewahren.



## Impressum

### **Herausgeber**

Vorstand des Drilling Simulators Celle (DSC)  
Zum Drilling Simulator 1  
29221 Celle  
Telefon: (0 51 41) 4 87 06-85 00  
Telefax: (0 53 23) 72-99 85 00  
E-Mail: [info-dsc@tu-clausthal.de](mailto:info-dsc@tu-clausthal.de)  
Internet: [www.dsc.tu-clausthal.de](http://www.dsc.tu-clausthal.de)

### **Redaktion**

Dr. Jens-Peter Springmann

### **Lektorat**

wortschmiedin.de, Sandra Köhler

### **Layout und Satz**

Franziska Ottow, TU Clausthal

### **Bildnachweis**

<https://www.geotis.de> (bearbeitet: S. 25 Bild a); S. 26: Li, K., Ganzer, L., Jaeger, P., Pang, S. and Wang, X., 2023, June. Numerical Investigation of High Temperature Aquifer Energy Storage (HT-ATES) in Northern Germany. In 84th EAGE Annual Conference & Exhibition (Vol. 2023, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202310766>; stock.adobe.com: S. 4 (©Panya Studio); S. 8 (©wutzkoh); S. 14, 46 (©Alex from the Rock); S. 54 (©chones); S. 58 (©Suphansa)

Hier nicht erwähnte Fotos entstammen dem Privatarchiv der jeweils abgebildeten Personen oder dem Archiv der TU Clausthal.

Mai 2024