

**Antrag auf Rechenzeit für ein Großprojekt**  
**Allgemeine Angaben zum Projekt:**

**Projekttitlel:** Analyse des Einflusses des Bohrkleintransports auf die Bohrstrangdynamik  
**Entgeltsatz:** 1 (gemäß Zulassungs- und Entgeltordnung des HLRN)

**Antragsteller:**  
**Institution:** Deutsches Zentrum für Hochleistungsbohrtechnik und Automatisierung - Drilling Simulator Celle Technische Universität Clausthal

**Projektleiter:**  
Name: Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt  
Telefon: +49 5141 48706 8501  
Fax: +49 5141 48706 99 8501  
Email: Joachim.Oppelt@tu-clausthal.de

**Projektbearbeiter:**  
Name: MSc. Patrick Höhn  
Telefon: +49 5141 48706 8517  
Fax: +49 5141 48706 99 8517  
Email: Patrick.Hoehn@tu-clausthal.de

**Fachgebiet:**  
Strömungsmechanik,  
Bohrkleintransport,  
CFD/DEM/FSI.

**Zusammenfassung**

Der Fokus der Forschungsarbeiten am Drilling Simulator Celle (DSC) richtet sich auf technische Maßnahmen zur Kostensenkung bei der Erstellung von Tiefbohrungen für geothermische Anwendungen. Hierzu wurden bereits mehrere Drittmittel-Projekte erfolgreich beantragt, die sich derzeit in Bearbeitung befinden. Beispielsweise erfolgt im Rahmen des vom BMWi geförderten OBE-Projektes (FKZ: 03EE4005) die Ertüchtigung eines Software-Bohrsimulators für eine realistische Vorabplanung von Bohrungen, um damit die tatsächliche Abteufung schneller und kostengünstiger durchführen zu können. Die Aktivitäten innerhalb des vorgeschlagenen Projektes am HLRN unterstützen die vorhandenen Projekte durch die Entwicklung fortschrittlicher Modelle zur Beschreibung des Bohrkleintransports und der Dynamik des Bohrstrangs.

Hierzu wird das beschriebene Problem in einem vereinfachten kurzen Stück des Bohrloches mittels CFD-DEM und FSI näher untersucht.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden im Anschluss an das Projekt für die Erstellung echtzeitfähiger Modelle im Software-Simulator genutzt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problembeschreibung</b>	<b>2</b>
1.1	Problem und Zielsetzung des HLRN-Vorhabens . . . . .	2
1.2	Fachspezifische Bedeutung und Innovation, erwartete Ergebnisse und geplante Ergebnisverwertung des HLRN-Vorhabens	3
1.3	Eingesetzte mathematische Modellierung . . . . .	4
1.4	Eingesetzte numerische Werkzeuge und Lösungsverfahren . .	4
1.5	Vorarbeiten / Ergebnisse zum zurückliegenden Antragszeitraum	4
1.6	Beschreibung der im Antragszeitraum geplanten Untersuchungen und der Arbeitsplanstruktur . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Informationstechnische Aspekte</b>	<b>6</b>
2.1	Verwendete Software und benötigte Bibliotheken/Lizenzen, Zielarchitektur . . . . .	6
2.2	Eignung und Notwendigkeit von Parallelrechnern . . . . .	6
2.3	Parallelisierungskonzept, Skalierbarkeit und Leistungsmerkmale der Anwendung . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Betriebsmittel und Ressourcenabschätzung</b>	<b>8</b>
3.1	Arbeitsplanung und detaillierte Rechenzeitabschätzung . . . .	8
3.2	Speicherbedarf . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Anhänge</b>	<b>9</b>

## 1 Problembeschreibung

### 1.1 Problem und Zielsetzung des HLRN-Vorhabens

Im Rahmen der angestrebten Reduzierung der Kohlendioxidemissionen in die Atmosphäre werden mehrere alternative Energieträger an die Stelle konventioneller Ressourcen treten. Gegenüber beispielsweise Wind oder Photovoltaik hat dabei die Geothermie den Vorteil einer kontinuierlichen und damit grundlastfähigen Verfügbarkeit. Von besonderer Bedeutung ist, neben der Stromerzeugung, zukünftig vor allem die Nutzung der Geothermie für Wärmezwecke. Die weitere schnelle Ausweitung geothermischer Energiegewinnung in Deutschland wird jedoch u. a. durch die hohen Kosten der

Erstellung der Geothermie-Anlagen erschwert. Diese sind insbesondere dadurch bedingt, dass Tiefbohrungen auf Geothermie in der Realität häufig besonders teure Explorationsbohrungen mit einem sehr engen Budgetrahmen sind. Dieses Budget ist maßgeblich durch den im Vergleich zu Bohrungen in der Erdöl- und Erdgasindustrie erheblich niedrigeren "Return of Investment"(ROI) begrenzt. Da die Bohrkosten bis zu 75 % der Projektkosten betragen können, ist es von überragender Bedeutung zur weiteren Verbreitung geothermischer Energiequellen, das hohe Technik- und Kostenrisiko zu senken.

Maßnahmen zur Kostenreduzierung können an verschiedenen Stellen des Bohrprozesses ansetzen. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die sog. „non-productive-time“. Diese Zeit ist charakterisiert durch die Tatsache, dass aufgrund von technischen Störungen im weitesten Sinne nicht gebohrt werden kann, die Kosten für die Bohranlage und das Personal jedoch weiterlaufen. Technische Störungen des Bohrprozesses können sowohl durch erhöhten Verschleiß als auch ungünstige Bohrbedingungen verursacht werden. Um den Bohrprozess systematisch optimieren zu können ist es deshalb erforderlich, die relevanten physikalischen Vorgänge genauer als bisher möglich zu quantifizieren. Insbesondere sei beim Verschleiß auf Ermüdungserscheinungen im Bohrstrang durch die hohen Beanspruchungen während des Bohrens hingewiesen. In der Literatur finden sich bereits viele Untersuchungen über verschiedene Einflussfaktoren auf untertägige Schwingungen. Dabei wurden beispielsweise der Einfluss der Strömung der Bohrspülung [1] und die Interaktion des Bohrmeißels mit dem Gestein [2] untersucht. Darüberhinaus gab es bereits Forschung im Bereich von mehrphasigen Transportvorgängen im Spülsystem (Bohrkleinaustrag), z.B. [3]. Nach Kenntnis der Antragssteller wurden beide Phänomene allerdings immer separat betrachtet. An dieser Stelle setzt das hier skizzierte Projekt an, durch die Kopplung beider Phänomene genauere Vorhersagen für beide Bereiche treffen zu können.

## **1.2 Fachspezifische Bedeutung und Innovation, erwartete Ergebnisse und geplante Ergebnisverwertung des HLRN-Vorhabens**

Die im Projekt entwickelten Modelle werden nach Vereinfachungen für die Echtzeitsimulation am Software Simulator des DSC eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass dadurch die Qualität und Geschwindigkeit der Abteufung von Tiefbohrungen gegenüber dem Status Quo grundlegend verbessert werden können. Damit ergäben sich deutliche Kostensenkungspotenziale bei der weiteren Entwicklung der Geothermie in Deutschland. Auf der Basis der bisher vorliegenden Erkenntnisse sind daher die wirtschaftlichen Aussichten als positiv zu bezeichnen. Die besonders gute Vernetzung des Antragstellers mit der einschlägigen Operator- und Serviceindustrie wird darüberhinaus einer Umsetzung der Projektergebnisse in der Industrie förderlich sein.

Während des Projektzeitraums ist neben der eigentlichen Simulation eine Validierung mittels eigener oder von Testständen von Partnerinstituten geplant. Dies wird zu einer sukzessiven Verbesserung der Simulationsergebnisse in späteren Projektphasen führen.

### **1.3 Eingesetzte mathematische Modellierung**

Die bereits diskutierte Simulation der Bohrstrangdynamik fällt in den Bereich der Fluid-Struktur-Interaktion (FSI). Diese wird in der Strömungsmechanik angewandt, wenn bei numerischen Strömungssimulationen Veränderungen in den üblicherweise festen Begrenzungen des Fluids berücksichtigt werden sollen. Dies können beispielsweise Spannungen, Verschleiß oder Deformationen sein. Im Rahmen des vorgeschlagenen Projektes handelt es sich um die Interaktion zwischen der Bohrspülung und dem Bohrstrang, wobei die Koppelung durch die "Arbitrary Lagrangian Eulerian" (ALE) Methode [4] realisiert wird.

Der Bohrkleintransport wird mittels der "Discrete Particle Methode"[5], die auch in der Literatur als CFD-DEM Methode bekannt ist, modelliert. Dabei werden die Navier-Stokes-Gleichungen unter Berücksichtigung des transportierten Bohrkleins gelöst.

### **1.4 Eingesetzte numerische Werkzeuge und Lösungsverfahren**

Im vorgeschlagenen Projekt werden zwei unterschiedliche Aspekte simuliert. Dies ist zum einen der Partikeltransport, der durch die Diskrete Partikel Methode realisiert wird. Dabei wird im Fluidteil die Finite Volumen Methode eingesetzt. Diese wird auch im zweiten Teil, der Fluid-Struktur-Interaktion, zur Simulation der flüssigen und festen Phasen verwendet.

Im FSI Teil werden beide Phasen durch separate Solver simuliert, wobei beide durch eine starke Kopplung verbunden sind. Obwohl dies den Rechenaufwand erhöht, wurde dieser Ansatz zum Erreichen einer höheren Genauigkeit ausgewählt.

### **1.5 Vorarbeiten / Ergebnisse zum zurückliegenden Antragszeitraum**

Am DSC wurden bereits in der Vergangenheit Untersuchungen des Bohrkleintransports mittels OpenFOAM, CFDEMcoupling und LIGGGHTS durch Aragall durchgeführt [3]. Dabei wurde der strömungsmechanische Teil durch OpenFOAM modelliert. Der Bohrkleintransport wurde mit LIGGGHTS mittels der Kopplung CFDEMcoupling in der Simulation berücksichtigt. Basierend auf dieser Erfahrung arbeitet der Projektbearbeiter seit Anfang 2018 an erweiterten Simulationen, die die Untersuchung des Einflusses des Bohrkleintransports auf Schwingungen im Bohrstrang zum Ziel hat. Dabei erfolgt zu-

sätzlich zur bereits bestehenden Kopplung zwischen Partikeln und Fluid, eine weitere Kopplung zwischen dem Fluid und den umgebenden Wänden. Da in der OpenFOAM-Variante foam-extend bereits ein fortschrittliches Framework für FSI existiert, wurde beschlossen, CFDEMcoupling auf foam-extend zu portieren. Im Anschluss wurden die Solver aus CFDEMcoupling und dem FSI-Toolkit miteinander integriert. Ein Zwischenstand wurde bereits auf dem OpenFOAM Workshop 2019 präsentiert. Im Nachgang der Konferenz wurde entschieden den vorhandenen Code vom FSI-Toolkit auf die fortschrittlichere solids4foam Bibliothek [6] zu portieren. Der Abschluss der Arbeiten hierzu wird bis Ende 2019 erwartet. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Entwicklung erste vereinfachte Problemstellungen getestet, die bis zum Projektbeginn in der finalen Komplexität fertiggestellt werden sollen. Diese bilden auch die Basis für die Abschätzung des Rechenaufwandes.

## 1.6 Beschreibung der im Antragszeitraum geplanten Untersuchungen und der Arbeitsplanstruktur

Die Arbeiten im Antragszeitraum sind in vier Arbeitspakete unterteilt (siehe Abbildung 1). Dabei werden im ersten Arbeitspaket die Genauigkeit und korrekte Ausführung des vereinfachten Simulationsproblems verifiziert. Im selben Zeitraum werden auch erste Validierungsexperimente durchgeführt. Dabei wird eine Parametervariation der folgenden Größen durchgeführt:

- Neigung des Bohrlochs
- Strömungsgeschwindigkeit
- Partikelkonzentration
- Partikelgröße
- Bohrstrangdurchmesser
- Bohrlochdurchmesser

Das Flüssigkeitsverhalten bildet hierbei sowohl newtonische als auch Herschel-Bulkley Fluide nach. Basierend auf dem erfolgreichen Abschluss des ersten Arbeitspaketes wird die Simulation sukzessive durch die Berücksichtigung weiterer Effekte erweitert, um die Vorgänge im Bohrloch immer wirklichereitsnäher abbilden zu können. Dabei werden zusätzlich zu den oben genannten Parametern die folgenden Größen variiert:

- Rotationsgeschwindigkeit des Bohrstrangs (AP2)
- Exzentrizität des Bohrstrangs (AP2)
- Rheologie des Fluids (AP3)

- Partikelgrößenverteilung (AP4)

Die oben angegebenen Parameter werden in 150 verschiedenen Parameterkombinationen untersucht, die nach der Methodik "Design of Experiments" [7] bestimmt werden. Durch diese Vorgehensweise ist es ebenfalls möglich, den Parameterraum bei Bedarf nochmals zu erweitern. Dieselben Kombinationen, wie in der Simulation, werden auch im Rahmen der Validierungsversuche messtechnisch untersucht und ermöglichen dadurch eine umfassende Überprüfung der im Rahmen der Forschung mit dem Solver erzielten Ergebnisse.

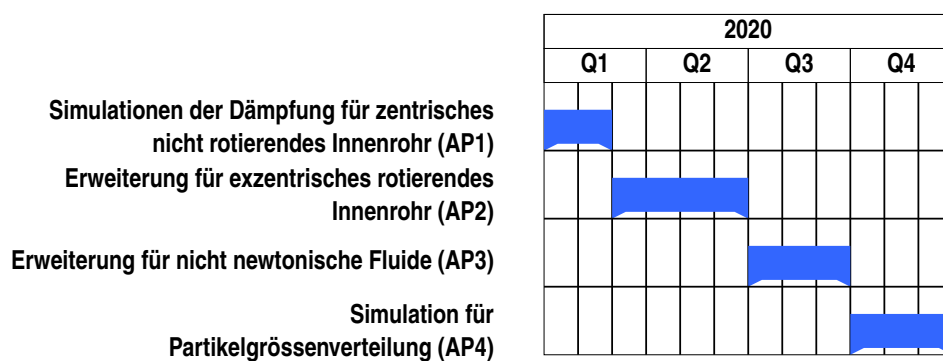


Abbildung 1: Gantt-Diagramm des vorgeschlagenen Projektes

## 2 Informationstechnische Aspekte

### 2.1 Verwendete Software und benötigte Bibliotheken/Lizenzen, Zielarchitektur

Zur Simulation der vorgestellten Problemstellung wird ein in-house entwickelter Solver verwendet. Er basiert im Wesentlichen auf zwei bereits vorhandenen Bibliotheken. Zur Simulation des FSI Aspekts wird solids4foam für foam-extend 4.0 eingesetzt [6]. Die Abbildung des Partikeltransports wird durch eine Weiterentwicklung der Programme CFDEMcoupling [8] und LIGGGHTS [9], das auf dem von den Sandia National Laboratories entwickelten LAAMPS basiert, realisiert. Alle verwendeten Programme sind als Open Source veröffentlicht und benötigen deshalb keine gesonderten Lizenzen.

### 2.2 Eignung und Notwendigkeit von Parallelrechnern

Die parallele Berechnung von Strömungsfeldern auf Computern mit verteiltem Speicher (Distributed Memory) ist etablierter Standard. OpenFOAM und LIGGGHTS, ebenso wie andere verbreitete Simulationssoftware, greifen

dabei auf das Message Passing Interface (MPI) zurück. Dabei muss beachtet werden, dass LIGGGHTS für geringe Partikelzahlen von weniger als 10000 Partikel pro CPU Kern nur sehr schlecht skaliert. Eine Bestätigung hierfür findet man auch in den gezeigten Ergebnissen der Skalierungstudie.

### 2.3 Parallelisierungskonzept, Skalierbarkeit und Leistungsmerkmale der Anwendung

Sowohl foam-extend als auch LIGGGHTS setzen zur Parallelisierung auf eine räumliche Aufteilung der Simulationsdomäne. Zur aktuellen Abschätzung des erwarteten Bedarfs an Rechenzeit und Speicherplatz wird der aktuelle Entwicklungsstand des Simulationsproblems über einen Simulationszeitraum von 6 Sekunden mit einer zeitlichen Auflösung von  $1e-4$  Sekunden berechnet. Das simulierte Problem ist vom Hron-Turek Benchmark-case für FSI-Anwendungen inspiriert und ergänzt diesen um in der Strömung befindliche Partikel. Genauere Details zur Problemgröße können in Tabelle 1 gefunden werden, wobei die Nodeanzahl für die Region Fluid in der aktuellen Konfiguration kleiner als im tatsächlichen Simulationsproblem ist. Die Tests wurden auf jeweils einem medium Node des HLRN IV in Göttingen mit 4, 10, 16, 20 und 32 Kernen durchgeführt. Dabei wurde Die Berechnung ist in zwei verschiedene Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt von zwei Simulationssekunden erfolgt die gekoppelte Berechnung von Fluid und Partikeln ohne den Einfluss der Fluid-Struktur-Interaktion.

Parameter	Region	Wert
Anzahl Nodes	Fluid	11134
Anzahl Nodes	Solid	15582
Anzahl Partikel (Durchschnitt)	DEM	2027
Zeitschritt	alle	$1e-04$ s

Tabelle 1: Details über Benchmark-Problem

Im Anschluss wird die Simulation für einen Simulationszeitraum von sechs Sekunden mit dem strukturellen Teil des FSI-Problems gekoppelt, wobei keine der Simulationen innerhalb der gesetzten Walltime abgeschlossen wurde. Es wurden zwei Testreihen mit unterschiedlichen Walltimes durchgeführt. Dies waren im Einzelnen: 12 Stunden Walltime mit 4, 16 und 32 Kernen, bzw. 48 Stunden Walltime mit 10, 20 und 40 Kernen. Anders als erwartet hat der Test mit 40 Kernen trotz der langen Zeit Phase 1 nicht abgeschlossen und wurde deshalb nicht weiter berücksichtigt. Die beobachteten Rechenzeiten für die beiden Abschnitte mit jeweils verschiedenen Kernen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Wie in der obenstehenden Tabelle ersichtlich ist, skaliert das Modell auf

<b>Kernzahl</b>	<b>Rechenzeit Phase 1</b>	<b>Rechenzeit Phase 2</b>	<b>Simulations- ende Phase 2</b>	<b>Rechenzeit Phase 2 pro Simulations- sekunde</b>
	clock seconds	clock seconds	simulation seconds	clock seconds
4	9159	31180	2.2582	120759
10	11024	159814	3.7395	91874
16	14295	28821	2.7555	38148
20	13377	158745	3.2464	127363
32	23196	2801	2.0401	69850

Tabelle 2: Anfallende Rechenzeiten für Benchmark Problem

Grund der geringen Modellgrösse sehr begrenzt. Verbesserungen werden bei Nutzung der vollständigen Modellgrösse erwartet.

### 3 Betriebsmittel und Ressourcenabschätzung

#### 3.1 Arbeitsplanung und detaillierte Rechenzeitabschätzung

Zur Berechnung des Rechenzeitbedarfs wird der effizienteste Fall aus Tabelle 2 herangezogen. Unter Berücksichtigung der reinen Rechenzeiten aus den Tests mit einem vereinfachten Modell wird eine Rechenzeit von 114000 NPL benötigt. Die Verteilung der benötigten Rechenzeit auf die einzelnen Arbeitspakete ist in Tabelle 3 dargestellt. Da hierbei ein vereinfachtes Modell und der derzeitige Entwicklungsstand des Solver berücksichtigt wurden, wird erwartet, dass sich der Bedarf bereits im ersten Arbeitspaket erhöhen wird. Basierend auf dem vollständigen Solver und dem finalen Simulationsproblem sollten bereits zu Beginn von AP1 genauere Abschätzungen aller Arbeitspakete möglich sein.

<b>Quartal:</b>	Q1 / 2020	Q2 / 2020	Q3 / 2020	Q4 / 2020
<b>Arbeitspaket:</b>	AP 1 / AP 2	AP 2	AP3	AP4
<b>NPL pro Quartal:</b>	10000	20000	60000	24000
<b>Anfallender permanenter Speicherbedarf:</b>	50 GB	100 GB	300 GB	120 GB

Tabelle 3: Erwartete benötigte Ressourcen für Arbeitspakete

#### 3.2 Speicherbedarf

Der Speicherbedarf in Tabelle 3 wurde unter Berücksichtigung des Tests mit 10 Kernen ermittelt. Dabei wurde zunächst das Simulationsproblem aus



den einzelnen Teilen rekonstruiert und alle nicht dauerhaft nötigen Daten ausgespart. Ähnlich wie bei der Abschätzung der Rechenzeit wird erwartet, dass die Werte im Rahmen von AP1 mit grösserer Genauigkeit bestimmt werden können.

## 4 Literatur

- [1] Mohammed F. Al Dushaishi, Runar Nygaard, and Daniel S. Stutts. Effect of drilling fluid hydraulics on drill stem vibrations. 35:1059–1069.
- [2] Thiago G. Ritto. Numerical analysis of the nonlinear dynamics of a drill-string with uncertainty modeling.
- [3] Roger Aragall Tera. Improvements of cuttings transport models through physical experiments and numerical investigations of solid-liquid transport.
- [4] C.W Hirt, A.A Amsden, and J.L Cook. An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds. 14(3):227–253.
- [5] P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. 29(1):47–65.
- [6] P. Cardiff, A. Karač, P. De Jaeger, H. Jasak, J. Nagy, A. Ivanković, and Ž. Tuković. An open-source finite volume toolbox for solid mechanics and fluid-solid interaction simulations.
- [7] Mark J. Anderson and Patrick J. Whitcomb. *DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation*. Productivity Press, 2nd ed edition.
- [8] Christoph Goniva, Christoph Kloss, Niels G. Deen, Johannes A.M. Kuipers, and Stefan Pirker. Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation. 10(5):582–591.
- [9] Christoph Kloss, Christoph Goniva, Alice Hager, Stefan Amberger, and Stefan Pirker. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. 12(2/3):140.

## 5 Anhänge

- Bewilligungen
- Allgemeinverständliche Kurzfassung