TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
Institut für Dynamik und Schwingungen

Dynamik und Schwingungen

Mathias Tergeist

# Partikelmethoden zur Modellierung der Kontakte von Bohrstrang und Gestein beim Tiefbohren

SHAKER VERLAG

Schriftenreihe
Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

# Partikelmethoden zur Modellierung der Kontakte von Bohrstrang und Gestein beim Tiefbohren

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation


| | |
|---|---|
| von: | Mathias Tergeist |
| aus (Geburtsort): | Mettingen |



| | |
|---|---|
| eingereicht am: | 13.09.2018 |
| mündliche Prüfung am: | 29.03.2019 |

| | |
|---|---|
| Vorsitz: | Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch |
| Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer<br>Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade |

2019

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

**Mathias Tergeist**

# Partikelmethoden zur Modellierung der Kontakte von Bohrstrang und Gestein beim Tiefbohren

Shaker Verlag
Düren 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6848-1
ISSN 1865-9101

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

# Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Das Forschungsprojekt wurde durch das Unternehmen Baker Hughes gefördert.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter dieses Institutes, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer, für die fortwährende Unterstützung dieser Arbeit und das große in Forschung und Lehre entgegengebrachte Vertrauen.

Den Vertretern des Unternehmens Baker Hughes, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Michael Neubert und Herrn Dr.-Ing. Hanno Reckmann, danke ich für ihren Einsatz für das Projekt und die Gelegenheit zur Veröffentlichung. Für viele inhaltliche Beiträge möchte ich Herrn Leroy W. Ledgerwood und Herrn Dr.-Ing. Andreas Hohl danken.

Ich danke allen Kollegen und Freunden, die mich in der Phase der Promotion unterstützt haben. Unter diesen möchte ich Frau Katja Hentrich, Frau Christina Kamm, Herrn Armin Kück, Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Michael Müller, Herrn Dr.-Ing. Frank Schiefer und Frau Annette Struckmann besonders hervorheben.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade für seine Tätigkeit als Gutachter und Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Osnabrueck, 1. Juni 2019 Mathias Tergeist

# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und beispielhafte Anwendung einer speziellen Diskrete-Elemente-Methode zur Modellierung von Gesteinsverformungsprozessen beim Tiefbohren. Auf Grundlage einer anwendungsbezogenen Material-Modellbildung im Hauptteil der Arbeit werden im Anwendungsteil Kontaktmodelle erzeugt, mit denen neue Erkenntnisse zum Einfluss des umgebenden Gesteins auf das Schwingungsverhalten von Tiefbohrsträngen gewonnen werden.

Den Ausgangspunkt der Material-Modellbildung bildet eine zweidimensionale Diskrete-Elemente-Methode, die auf Bonded-Particle-Modellen im Sinne der Autoren Potyondy und Cundall beruht. Diese Modelle bilden die zementierte Kornstruktur eines Gesteins als System rauer, elastischer Kreispartikel nach, zwischen denen elastische Bindungen endlicher Festigkeit bestehen. Durch Einstellung elementarer Partikel-Wechselwirkungen werden gesteinstypische Verformungseigenschaften des Partikelsystems erreicht.

Für ein Diskrete-Elemente-Modell des Ausgangstyps wird auf Grundlage von Triaxialversuchen an Carthage Kalkstein demonstriert, dass die residuale Fließspannung von granularisiertem Gesteinsmaterial unter hohen allseitigen Drücken nicht realitätsnah abgebildet werden kann. Entsprechende Verformungsbedingungen sind für die Tiefbohranwendung wesentlich, weil der unter Tage vorherrschende Umgebungsdruck verformtes Gesteinsmaterial vergleichbar zusammenhält. Als Ursache unzureichender Parameterkontrolle über diese Fließspannung wird das widerstandslose Abrollen der kreisrunden Partikel im Zustand feiner Granularisierung identifiziert. Es werden zwei Rollwiderstandsformulierungen zur impliziten Berücksichtigung von Kornform-Wechselwirkungen entwickelt. Beide Formulierungen ermöglichen eine gute Approximation der Fließspannung und Schädigungsphänomenologie des Gesteins vom intakten bis in den fein granularen Zustand unter anwendungstypischen Drücken.
Für weit größere allseitige Drücke zeigen die Triaxialversuche eine Mobilisation von intra-granularen Verformungsfreiheitsgraden an, die im Diskrete-Elemente-Modell nicht existieren. Durch Beschränkung der übertragbaren Scherspannungen zwischen den Partikeln entsprechend einer endlichen Kornscherfestigkeit wird erreicht, dass die Approximation durch das Modell dennoch brauchbar bleibt. Hiermit werden die Modellgrenzen abschließend auch bezüglich des allseitigen Druckes so verschoben, dass der für die Tiefbohrtechnik wesentliche Raum von Spannungszuständen und Verformungsgraden abgedeckt wird.

Im Anwendungsteil wird zunächst die Interaktion eines Schneidwerkzeuges mit dem Gestein unter hochfrequenten Schwingungen simulativ untersucht. Aus der Kraftantwort des Schneidkontaktes auf die Schwingung des Werkzeuges werden mittels harmonischer Linearisierung dynamische Ersatzsteifigkeiten bestimmt, die unter anderem eine schwache axiale Kraftantwort auf Torsionsschwingungen beinhalten. Anhand eines modal reduzierten Fallstudien-Bohrstranges wird demonstriert, dass infolge der Kontaktsteifigkeiten eine Instabilität des Betriebszustandes aufgrund von Lagekopplung in Betracht zu ziehen ist. Als methodische Alternative wird eine dynamische Kopplung von Bohrstrang- und Wechselwirkungsmodell ohne Linearisierung der Gesteinskräfte realisiert und bewertet.

Als zweite Anwendung werden dynamische Kontakte des Bohrstranges mit der Bohrlochwand beispielhaft untersucht. Für Zylinder-Zylinder-Kontaktgeometrien mit anwendungstypischen Durch-

messerverhältnissen wird die Nahfeldverformung der Bohrlochwand simuliert. Es werden systematische Abweichungen der Kontaktkräfte von den Ergebnissen der linearen Halbraumtheorien als Folge kleiner inelastischer Verformungen ermittelt. Bei wiederholter Belastung wird eine Zunahme der Kontaktsteifigkeit und eine Abnahme der Kontaktdämpfung festgestellt.

Insgesamt demonstrieren die Anwendungsergebnisse beispielhaft den Nutzen eines geeigneten Gesteinsmodells zur Verbesserung dynamischer Bohrstrangmodelle.

# Abstract

This dissertation covers the development of a special Discrete Element Method for rock under high confining pressures and example applications of its implementation. Based on applied material modeling in the main part, contact models are developed in the application part, which provide new insights into the rock's influence on drill string vibration.

The starting point for material modeling is a two-dimensional Discrete Element Method which is based on Bonded-Particle Models as proposed by Potyondy and Cundall. The models represent the cemented grain structure of a rock by a system of frictional, elastic particle disks. These disks are interconnected by elastic bonds of limited strength. Specific rock-like deformation characteristics are obtained by adjusting the fundamental particle interactions within the particle system.

Limitations of the base-type Discrete Element Model are demonstrated based on a comparison of real and simulated triaxial compression tests using Carthage limestone. The model cannot reproduce the high residual yield stress of granularized rock in the presence of high confining pressures. These conditions are common in deep drilling because downhole pressure confines deformed rock in a comparable manner. Insufficient parameter control of the model's yield stress is found to be caused by the free rolling motion of particle disks in the state of fine granularization. Two formulations of rolling resistance are developed to implicitly account for effects of grain shape as expected for irregular rock grains. Both formulations allow for a good approximation of rock yield stress and failure phenomena – from an intact state to a state of fine granularization under typical downhole pressures.

For significantly higher confining pressures, real triaxial tests indicate intra-granular deformation without corresponding degrees of freedom in the Discrete Element Model. The model remains applicable by limiting the inter-particle shear stresses according to a limited grain shear strength. With this final modification the model limits are shifted to include the space of stresses and strains commonly encountered in downhole rock deformation processes.

For the first example in the application part, the interaction of a cutting tool with the rock is considered under high-frequency vibration of the drill string. From the simulated force response of the cutting contact to the tool vibration, dynamic contact stiffnesses are obtained using harmonic linearization. These stiffnesses include a weak axial force response to torsional tool motion. Using a case-study drill string, it is demonstrated that this kind of contact stiffness destabilizes common operating states and can ultimately result in self-excited high-frequency vibration. As an alternative method, dynamic coupling of a drill string model and the interaction model is implemented and evaluated without linearization.

Dynamic contacts of drill strings with the borehole wall are considered in the second application. The near-field deformation of the wall is investigated using the example of cylinder-cylinder contacts with typical diameter ratios. A comparison with elastic half-space theory reveals systematic effects of material inelasticity even for small plastic deformations. For repetitively loaded contacts, increasing contact stiffness and decreasing contact damping are determined over several loading cycles.

The application examples demonstrate how dynamic rock models can be used to improve and complement conventional models for vibration analysis of drill strings.

# Inhaltsverzeichnis


Notation und Symbole ..... XIII

1 Einleitung ..... 1

2 Grundlagen der Gesteinsmodellierung für die Bohrstrangdynamik ..... 5

2.1 Gesteinsverformungsprozesse beim Tiefbohren ..... 5
2.2 Charakterisierung von kompaktem homogenen Gestein ..... 10
2.2.1 Durchführung von Triaxialversuchen ..... 11
2.2.2 Elementare Verformungscharakteristika eines Ersatzkontinuums ..... 13
2.2.3 Konstitutive Verformungsmechanismen des Diskontinuums Kalkgestein ..... 15
2.3 Diskrete-Elemente-Methoden zur Gesteinsmodellierung ..... 18
2.3.1 Modellierung des Untertage-Gesteinsschnittprozesses ..... 20
2.3.2 Rollwiderstandsformulierungen für Diskrete-Elemente-Modelle ..... 22
2.4 Zielsetzung ..... 24

3 Ausgangsverfahren vom Typ einer Bonded-Particle-Methode ..... 27

3.1 Bewegungsgleichungen des gebundenen Partikelsystems ..... 28
3.1.1 Elastische innere Kräfte ..... 31
3.1.2 Viskose innere Kräfte ..... 35
3.1.3 Äußere Kräfte: Oberflächenkräfte und Volumenkräfte ..... 37
3.1.4 Integration und zulässige Zeitschrittweite ..... 41
3.2 Erzeugung von Gesteinsproben ..... 45
3.3 Modellierung des Triaxialversuches als Kalibrierversuch ..... 47
3.4 Äußere Skalierung des Partikelmaterials ..... 48

4 Erweiterte Kraftgesetze zur Abbildung von Gestein unter Tiefbohrbedingungen ..... 53

4.1 Überschreitung von Modellgrenzen in Tiefbohrprozessen ..... 53
4.1.1 Eigenschaften des Beispielgesteins Carthage Kalkstein ..... 53
4.1.2 Grenzen des Ausgangsverfahrens bei Granularisierung ..... 56
4.2 Implizite Berücksichtigung der Kornform des Gesteins ..... 60
4.2.1 Besondere Anforderungen an eine Rollwiderstandsformulierung für Gestein ..... 61
4.2.2 Elasto-plastische Rollwiderstandsformulierung ..... 63
4.2.3 Abhängigkeit der Verformungscharakteristika von Mikro-Rolleigenschaften ..... 65
4.2.4 Ideal-plastische Rollwiderstandsformulierung ohne Gedächtnis ..... 69
4.2.5 Diskussion neuer Modellqualität und Modellgrenzen ..... 73
4.3 Implizite Berücksichtigung von Scherfließen im Korninneren ..... 76
4.3.1 Modifikation der Partikel-Partikel-Wechselwirkung ..... 78
4.3.2 Abhängigkeit der Verformungscharakteristika von der Kornscherfestigkeit ..... 78
4.3.3 Diskussion neuer Modellqualität und Modellgrenzen ..... 80

**5 Anwendung auf die Schneidwechselwirkung während hochfrequenter Torsionsschwingungen .....83**

5.1 Bestehende Modelle für den Bohrmeißel-Bohrloch-Kontakt ..... 85
5.1.1 Algebraische Schnittkraftmodelle ..... 87
5.1.2 Dynamische Erweiterungen algebraischer Schnittkraftmodelle ..... 88
5.2 Modellierung des Untertage-Schnittprozesses in der PDC-Schneiden-Mittelebene ..... 89
5.2.1 Bohrstrangmodell für axiale und torsionale Schwingungen ..... 90
5.2.2 Abwicklung der Schneidentrajektorie ..... 93
5.2.3 Randbedingungen der Partikelsimulation und Prozessführung ..... 98
5.3 Analyse der Schnittkraftdynamik während hochfrequenter Torsionsschwingungen ..... 100
5.3.1 Effekt der Spanausbildung und Auswirkungen auf die Schnittkräfte ..... 102
5.3.2 Schnittkraftantwort auf hochfrequente Schwingungen ..... 105
5.3.3 Stabilitätsprognose für torsional-axiale Schwingungen ..... 110
5.4 Dynamische Kopplung von Schnittprozess- und Bohrstrangmodell ..... 113
5.4.1 Konfiguration der gekoppelten Modelle ..... 114
5.4.2 Auswertung der gekoppelten Dynamik ..... 116

**6 Anwendung auf die Kontaktwechselwirkung zwischen Bohrstrang und Bohrlochwand .....119**

6.1 Bestehende Modelle für den Kontakt von Bohrstrang und Bohrlochwand ..... 119
6.2 Modellierung eines Zylinder-Zylinder-Kontaktes ..... 120
6.3 Simulationen zum Plastifizierungseinfluss auf die Kontaktsteifigkeit ..... 122

**7 Zusammenfassung und Ausblick.....127**

**Literaturverzeichnis.....131**

**Anhang.....137**

# Notation und Symbole

| Zeichenformat | Bedeutung |
|---|---|
| $a, A$ | Skalar |
| $\underline{a}$ | Tupel |
| $\underline{\underline{A}}$ | Matrix |
| $\boldsymbol{a}$ | Vektor |
| $\boldsymbol{A}$ | Tensor zweiter Stufe |
| $\bar{a}$ | Mittelwert oder zum Betriebszustand gehörender Wert |
| $\tilde{a}$ | Störung |

| Formelzeichen | Bedeutung |
|---|---|
| $\underline{\boldsymbol{e}} = \{\boldsymbol{e}_\mathrm{x}, \boldsymbol{e}_\mathrm{y}, \boldsymbol{e}_3\}^\mathrm{T}$ | kartesisches Inertialsystem des Gesteins (S. 29) |
| $\underline{\boldsymbol{e}}_\mathrm{B} = \{\boldsymbol{e}_{\mathrm{r}\varphi}, \boldsymbol{e}_\mathrm{z}, \boldsymbol{e}_\mathrm{r}\}^\mathrm{T}$ | kartesisches Inertialsystem des Bohrmeißels (S. 95) |
| $\underline{\boldsymbol{e}}_\mathrm{K} = \{\boldsymbol{e}_\mathrm{n}, \boldsymbol{e}_\mathrm{t}, \boldsymbol{e}_3\}^\mathrm{T}$ | kartesisches Kontaktkoordinatensystem (S. 29) |
| $\Delta t$ | Integrations-Zeitschrittweite |

Beschreibungsgrößen eines Partikels $i$

| | |
|---|---|
| $R_i$ | Radius der Grundfigur |
| $R_{i,\mathrm{U}}$ | Radius des umschreibenden Kreises |
| $\boldsymbol{r}_i$ | Ortsvektor des Mittelpunktes |
| $\boldsymbol{\omega}_i$ | Vektor der Drehwinkelgeschwindigkeiten |

Beschreibungsgrößen eines Paares von Partikeln $i$ und $j$

| | |
|---|---|
| $\boldsymbol{r}_{ji}$ | Mittelpunkt-Abstandsvektor |
| $\boldsymbol{\omega}_{ji}$ | Relative Drehwinkelgeschwindigkeit |

| | |
|---|---|
| $\delta_\mathrm{n}$ | Normalüberdeckung der Partikelgrundkörper |
| $\delta_\mathrm{t}^\mathrm{P}$ | elastische Tangentialverschiebung der Partikel |
| $\delta_\mathrm{t}^\mathrm{B}$ | elastische Scherverschiebung der Bindung |
| $\phi^\mathrm{B}$ | elastischer Biegewinkel der Bindung |
| $\phi^\mathrm{P}$ | Relativverdrehung der Partikel |
| $F_\mathrm{n}^\mathrm{P/B/d}$ | Normalkraftbeiträge der Partikel, Bindungen und Dämpfung |
| $F_\mathrm{t}^\mathrm{P/B/d}$ | Tangentialkraftbeiträge der Partikel, Bindungen und Dämpfung |
| $M^\mathrm{P/B/d}$ | Rollmomentbeträge der Partikel, Bindungen und Dämpfung |

Größen des FEM-Bohrstrangmodells im Bohrstrang-Koordinatensystem $\underline{\boldsymbol{e}}_\mathrm{B}$

| | |
|---|---|
| $\underline{u}$ | physikalisches Zustandstupel (*Zustandsvektor*) |
| $\varphi_i$ | Drehwinkel des Knotens $i$ |
| $z_i$ | Bohrfortschritt des Knotens $i$ |
| $\underline{q}$ | reduziertes modales Zustandstupel (S. 93) |
| $\underline{u}_\mathrm{B} = \underline{\underline{\Phi}}_\mathrm{B}\underline{q} = \begin{pmatrix}\varphi\\ z\end{pmatrix}$ | Zustandstupel des Bohrmeißelknotens (S. 93) |
| $\underline{\mathrm{f}}_\mathrm{B} = \begin{pmatrix}M_\mathrm{z}\\ F_\mathrm{z}\end{pmatrix}$ | Gesteinskräfte am Bohrmeißel-Knoten (S. 93) |

Schneidengrößen im abgewickelten Bohrstrang-Koordinatensystem $\underline{\boldsymbol{e}}_\mathrm{B}$

| | |
|---|---|
| $\begin{pmatrix}v_\mathrm{r\varphi}\\ v_\mathrm{z}\end{pmatrix}$ | Geschwindigkeitskomponenten |
| $\begin{pmatrix}F_\mathrm{r\varphi}\\ F_\mathrm{z}\end{pmatrix}$ | Gesamtkraftkomponenten |

Schneidengrößen im Gesteinskoordinatensystem $\underline{\boldsymbol{e}}$

| | |
|---|---|
| $\begin{pmatrix}v_\mathrm{x}\\ v_\mathrm{y}\end{pmatrix} = \kappa\underline{\underline{\Gamma}}\dot{\underline{q}}$ | Geschwindigkeitskomponenten (S. 96) |
| $\begin{pmatrix}\mathrm{f}_\mathrm{x}\\ \mathrm{f}_\mathrm{y}\end{pmatrix}$ | Linienlastenkomponenten in der Schneiden-Mittelebene (S. 97) |
| $\begin{pmatrix}F_\mathrm{x}\\ F_\mathrm{y}\end{pmatrix}$ | Gesamtkraftkomponenten (S. 97) |