



Armin Kück

Zur Generierung von Minimalmodellen für die Dynamik von Tiefbohrsträngen

Zur Generierung von Minimalmodellen für die Dynamik von Tiefbohrsträngen

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

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Armin Kück
aus Bremerhaven

eingereicht am: 04. Juni 2018

mündliche Prüfung am: 29. März 2019

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer

Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Armin Kück

**Zur Generierung von Minimalmodellen für
die Dynamik von Tiefbohrsträngen**

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 978-3-8440-6864-1

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig gefördert von der Baker Hughes Inteq GmbH in Celle.

Zu Beginn bedanke ich mich sehr herzlich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer, für seine intensive Betreuung, seinen persönlichen Einsatz und anregende fachliche Diskussionen, welche diese Promotion erst ermöglicht haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade für die Übernahme der Aufgabe als Gutachter und Herrn Prof. Dr.-Ing. Tutsch für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein besonderer Dank gebührt allen Kollegen des Instituts für Dynamik und Schwingungen, insbesondere Dr.-Ing. Frank Schiefer, Priv.Doz. Dr.-Ing. Michael Müller und Matthias Tergeist, für fachliche wie auch private Diskussionen sowie die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre. Unserer Sekretärin Frau Annette Struckmann danke ich für ihre Hilfsbereitschaft, z.B. bei der Korrektur dieser Arbeit.

Seitens Baker Hughes danke ich besonders Dr.-Ing. Michael Neubert und Dr.-Ing. Hanno Reckmann für die stetige Förderung dieser Promotion. Zudem bedanke ich mich bei allen Kollegen, welche mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen, stellvertretend erwähnt seien Dr.-Ing. Andreas Hohl und Christian Herbig.

Weiterhin gilt mein Dank allen Studenten, die mir im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten oder als Hilfswissenschaftler behilflich waren. Besonders hervorheben möchte ich dabei Aaron Völpel, Bastian Recke und Mats Wiese.

Von Herzen danke ich meinen Eltern, Anita und Karl-Heinz, für die Begleitung meines bisherigen Werdegangs und für ihren seelischen Beistand. Meinen Geschwistern Andrea und Fabian danke ich für ihren Rückhalt und die entspannenden Momente.

Braunschweig, März 2019

Armin Kück

Zusammenfassung

In der Öl- und Gasindustrie werden Tiefbohrstränge eingesetzt, um Zugänge zu untertägigen Lagerstätten zu erzeugen. Die Simulation des mechanischen Verhaltens dieser Tiefbohrstränge ist jedoch sehr zeitaufwendig. Dies kann zu hohen Kosten, z.B. durch zeitraubende Fehleranalysen, führen. In dieser Arbeit werden daher Methoden zur Erzeugung von Minimalmodellen untersucht, die vergleichbare Ergebnisse in kürzerer Zeit liefern.

Dazu wird ein nicht-lineares Finite-Balkenelement-Modell nach Ostermeyer neu aufgesetzt und erweitert. Es bildet das statische und dynamische Verhalten des Bohrstranges ab und dient als Testmodell für Verfahren zur Reduzierung der Modellgröße.

Als erstes werden projektionsbasierte Reduktionsverfahren in Form der Proper-Orthogonal-Decomposition, des Improved-Reduced-System-Verfahrens und der dynamischen Kondensation untersucht. Die Analysen zeigen, dass eine Reduktion des Bohrstrangmodells prinzipiell schlecht durchführbar ist. Dies liegt insbesondere an lokal wechselnden Kontakten zwischen Bohrstrang und Bohrloch, die zu häufigen und aperiodisch auftretenden Stößen führen. Diese verhindern stationäre Zustände und verteilen Energie auf viele Moden des Systems. Mit den getesteten Verfahren konnte entweder keine Beschleunigung erzielt werden oder das Bohrstrangmodell müsste stark vereinfacht werden um eine sinnvolle Anwendung der Reduktionsverfahren zu ermöglichen.

Als Alternative wird die phänomenologische Reduktion entwickelt, die das Bohrstrangmodell auf eine Reihe von Phänomenmodellen reduziert. Das Verfahren wird an den dynamischen Phänomenen Stick-Slip und Whirl demonstriert. Frequenzen, Amplituden und kinetische Energien werden auf wenige Prozent genau wiedergegeben, Simulationen beispielhaft um mindestens eine Größenordnung beschleunigt. Als Anwendungen werden eine modellbasierte Regelung und eine Optimierung von Prozessparametern diskutiert. Die Simulationszeit der betrachteten Optimierung sinkt von einer Woche auf wenige Minuten.

In der Industrie ermöglicht die phänomenologische Reduktion schnellere und umfangreichere Optimierungen und damit eine effizientere Steuerung des Bohrprozesses. Angewendet in Echtzeitsimulationen können schädliche Zustände verhindert, Verschleiß und Schäden von Bohrwerkzeugen minimiert sowie Gewinn und Reputation maximiert werden.

Abstract

In the oil and gas industry, drill strings generate an access to downhole reservoirs. However, simulating the mechanical behavior of drill strings is time-consuming. This can increase costs due to time-demanding failure-root-cause analyses. Therefore, this theses investigates methods that generate minimal models providing faster results with a comparable quality.

In a first step, a non-linear finite-beam-element-model by Ostermeyer is re-implemented and expanded. It enables simulation of the static and dynamic behavior of a drill string and serves as a testing model to evaluate methods reducing the size of the model.

Next, projection-based reduction methods are studied. The tested methods are the Proper-Orthogonal-Decomposition, the Improved-Reduced-System-Method and the Dynamic Condensation. The analyses show that a reduction of the drill string model provides poor results because of the changing contacts between the drill string and the borehole. Frequent, a-periodically occurring shocks prevent a stationary state and distribute energy between multiple modes of the system. By using the tested methods, either an acceleration of the simulation could not be achieved, or the drill string model must be heavily simplified to enable a reasonable application of reduction methods.

As an alternative, the Phenomenological Reduction method is developed. It reduces the drill string model to a range of phenomenological models. The method is demonstrated for the dynamic phenomena of stick-slip and whirl. It reproduces frequencies, amplitudes and kinetic energies with a low-percentage error. The method accelerates simulations by at least one order of magnitude in a given example. With respect to industrial applications, a model-based control system and an optimization of process parameters are discussed. The simulation time of the discussed optimization decreases from one week to few minutes.

In the industry, the phenomenological reduction facilitates faster optimizations, enabling a more efficient control of the drilling process. Applied to real-time simulations, harmful drilling states can be prevented, wear and damage of drilling tools can be minimized, and profit and reputation can be maximized.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Aufbau und Funktion einer Bohranlage	5
2.2	Dynamisches Verhalten des Bohrstranges	13
2.3	Existierende Bohrstrangmodelle.....	18
2.4	Existierende Ordnungs-Reduktionstechniken	25
3	Aufbau und Simulation des nichtlinearen Bohrstrangmodells.....	33
3.1	Herleitung der Bewegungsgleichungen.....	33
3.2	Diskretisierung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	43
3.3	Numerische Lösung der Bewegungsgleichungen	51
3.4	Implementierung in Simulationssoftware	59
3.5	Simulation eines Stick-Slip-Szenarios	61
3.6	Simulation eines Whirl-Szenarios	65
4	Reduktion mit projektionsbasierten Verfahren.....	71
4.1	Vorgehen	71
4.2	Methodischer Überblick projektionsbasierter Reduktionstechniken	72
4.3	Reduktion des Bohrstrangmodells.....	87
4.4	Diskussion	102
5	Phänomenologische Reduktion	105
5.1	Methodik	105
5.2	Parameterübertragung	106
5.3	Reduktion auf ein Stick-Slip-Modell.....	107
5.4	Reduktion auf ein Whirl-Modell.....	112
5.5	Anwendungsbeispiele.....	119
5.6	Diskussion	125

6	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
7	Literaturverzeichnis	129
8	Anhang.....	141
8.1	Herleitung des nichtlinearen Bohrstrangmodells	141
8.2	Verwendete Integrationsverfahren.....	156
8.3	Periode einer Feder mit quadratischer Federkennlinie	162
8.4	Bewegungsgleichungen des Whirl-Modells	166
8.5	Componend Mode Synthesis nach Craig-Bampton.....	168
8.6	Beschreibung der Energieäquivalenzmethode nach Jansen.....	168
9	Bildnachweise	171