

# **Kopplung von FEM- und DEM-Simulationen zur Analyse der Gut-Bauteil-Interaktion in der Fördertechnik**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Mathias Dratt

geb. am 10. April 1979 in Osterburg (Altmark)

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld  
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner

eingereicht am 11. Februar 2016

Promotionskolloquium am 06. Juli 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	<b>XXXI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XLIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Stand der Forschung und Entwicklung .....	3
1.3 Zielstellung .....	7
1.4 Vorgehensweise .....	8
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1 Grundlagen der Schüttgutmechanik .....	9
2.1.1 Eigenschaften und Kenngrößen .....	10
2.1.2 Böschungswinkel.....	10
2.1.3 Wandreibung .....	12
2.1.4 Spannungszustände und Fließkriterien.....	14
2.2 Grundidee der Finite Elemente Methode .....	24
2.2.1 Prinzip vom Minimum des Elastischen Potentials .....	26
2.2.2 Ritz'sches Verfahren .....	27
2.2.3 Statische Strukturanalyse .....	28
2.2.4 Dynamische Strukturanalyse .....	31
2.2.5 Nichtlineare Analysen .....	33
2.2.6 Äquivalente Knotenkräfte .....	35
2.3 Grundidee der Diskrete Elemente Methode .....	36
2.3.1 Berechnungszyklus .....	37
2.3.2 Kraft-Verformungs-Gesetz .....	38
2.3.3 Lösung der Bewegungsgleichungen.....	42
2.3.4 Kontaktmodelle .....	43
2.3.5 Kalibrierung der Partikelparameter .....	47
2.3.6 Aufprallkräfte von Schüttgutströmen.....	50

<b>3</b>	<b>Kopplung zwischen ANSYS und PFC<sup>3D</sup></b> .....	<b>57</b>
3.1	Anforderungen an die Kopplung.....	57
3.2	Kopplungsvarianten .....	58
3.3	Verwendete Elementtypen .....	59
3.4	Kopplungsstrategie .....	61
3.4.1	Ableitung und Export des Berechnungsgebiets.....	62
3.4.2	Import der Ableitung des Berechnungsgebiets.....	69
3.4.3	Ausgabe und Export der Lastdaten .....	69
3.4.4	Import und Zuordnung der Lastdaten.....	72
3.5	Verifizierung der Kopplung .....	105
3.5.1	Durchhang eines doppelseitig eingespannten Balkens .....	105
3.5.2	Einfluss von Elementkantenlänge und Partikeldurchmesser .....	110
3.6	Visualisierung der Ergebnisse.....	113
3.7	Erweiterung der Kopplung auf Volumenelemente .....	115
<b>4</b>	<b>Simulation von Gutübergabestellen</b> .....	<b>119</b>
4.1	Grundlagen .....	119
4.2	Simulationsmodell .....	122
4.3	Auswertung der Ergebnisse .....	127
<b>5</b>	<b>Simulation der Verformung von Fördergurten</b> .....	<b>133</b>
5.1	Grundlagen .....	133
5.1.1	Bewegungswiderstände .....	135
5.1.2	Bisherige Untersuchungen .....	139
5.1.3	Lastannahmen .....	140
5.2	Durchhang eines statisch beladenen Fördergurtes.....	142
5.2.1	Experimentelle Untersuchungen .....	142
5.2.2	Materialmodell des Fördergurtes .....	147
5.2.3	Simulationsmodell .....	154
5.2.4	Auswertung der Ergebnisse .....	159
5.3	Lagerkräfte an einem beladenen Gurtfördererabschnitt .....	162
5.3.1	Berechnungsansatz nach <i>Krause</i> und <i>Hettler</i> .....	162
5.3.2	Experimentelle Untersuchungen nach <i>Hettler</i> .....	172
5.3.3	Simulationsmodell .....	174
5.3.4	Oberflächengeschwindigkeit auf verformten Gurtoberflächen.....	183

5.3.5	Auswertung der Ergebnisse .....	189
5.4	Beitrag zum Schüttgutwalkwiderstand.....	206
5.4.1	Simulationsmodell .....	206
5.4.2	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	208
5.4.3	Schlussfolgerungen.....	215
5.5	Fazit.....	217
<b>6</b>	<b>Kopplung zwischen ANSYS und LIGGGHTS .....</b>	<b>221</b>
6.1	Anforderungen an die Kopplung.....	221
6.2	Kopplungsvarianten .....	221
6.3	Kopplungsstrategie .....	222
6.3.1	Ableitung und Export des Berechnungsgebiets.....	223
6.3.2	Import der Ableitung des Berechnungsgebiets.....	225
6.3.3	Ausgabe und Export der Lastdaten .....	226
6.3.4	Import und Zuordnung der Lastdaten.....	227
6.3.5	Zusammenfassung .....	227
6.4	Verifizierung der Kopplung .....	229
6.4.1	Durchhang eines doppelseitig eingespannten Balkens .....	229
6.4.2	Einfluss von Elementkantenlänge und Partikeldurchmesser .....	231
6.5	Validierung der Kopplung .....	234
6.5.1	Validierungsversuchsstand .....	234
6.5.2	Simulationsmodell .....	239
6.5.3	Auswertung der Versuchs- und Simulationsergebnisse.....	243
6.6	Fazit.....	248
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>251</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>255</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>263</b>
A.1	Beziehung zwischen Verzerrungen und Verschiebungen.....	263
A.2	Beziehung zwischen Spannungen und Verzerrungen.....	263
A.3	Ritz'sches Verfahren an einem doppelseitig eingespannten Balken.....	265
A.4	Wichtungsfaktoren im 8-Knoten Rechteckflächenelement .....	266
A.5	Wichtungsfaktoren im 8-Knoten Flächenelement - Parallelogramm.....	269
A.6	Wichtungsfaktoren im planaren, verzerrten 8-Knoten Viereckflächenelement .....	272

A.7	Nachweis - Zusammenhang der Einzelteilflächen .....	275
A.8	Nachweis - Wichtungsfaktoren über Einzelteilflächenverhältnisse.....	278
A.9	Wichtungsfaktoren im planaren, verzerrten 6-Knoten Dreieckflächenelement ....	279
A.10	Ergänzungen zu den Validierungsuntersuchungen.....	282