
Inhaltsverzeichnis

Vorwort i

Abstract iii

Kurzfassung..... v

Inhaltsverzeichnis..... vii

Formelzeichen xi

1. Motivation und Zielsetzung 1

2. Fließ- und Kompressionsverhalten von Schüttgütern 5

 2.1 Einzelpartikelbetrachtung..... 5

 2.2 Kontinuumsbetrachtung..... 7

 2.2.1 Phänomenologisches Fließkriterium 8

 2.2.2 Kompressionsverhalten 10

 2.2.3 Erfassung von Fließeigenschaften mit Schergeräten 12

 2.2.4 Spannungen in Silos 16

 2.2.5 Fließprofile und Silodimensionierung..... 22

 2.2.6 Definitionen und Messungen der Fließfähigkeit 26

 2.3 Modellierung des Massenstroms 29

3. Numerische Simulationsmethoden..... 35

 3.1 Diskrete-Elemente-Methode..... 35

 3.1.1 Kontaktkraftmodellierung 37

 3.1.2 Kontaktdetektion 43

 3.1.3 Zeitschrittdefinition und Zeitintegration 45

 3.1.4 Nicht-sphärische Partikelsysteme 47

 3.2 Computational Fluid Dynamics und CFD-DEM-Kopplung 49

4. Deep Learning 53

4.1	Grundlagen	53
4.2	Trainingsalgorithmus	55
4.3	Convolutional Neural Networks	57
5.	Numerische Analyse des Fließ- und Entleerungsverhaltens von Pulvern	59
5.1	Eingesetzte Materialien	61
5.1.1	Elastizitätsmodul	64
5.1.2	Restitutionskoeffizient	65
5.1.3	Gleit- und Rollreibungskoeffizienten	67
5.1.4	Kohäsion	69
5.1.5	Partikeldichte	75
5.2	Rheologische Analyse	76
5.2.1	Scherzellenmessungen	77
5.2.2	Pulverrheometer	84
5.3	Analyse des Entleerungsverhaltens	88
5.3.1	Experimentelle und numerische Silokonfiguration	88
5.3.2	Massenstromanalyse	93
5.3.3	Druckverhältnisse im Silo	96
5.3.4	Fließprofilanalyse	100
5.3.5	Validierung abgeleiteter Erkenntnisse	104
5.4	Modifiziertes Massenstrommodell	105
6.	Modellierung des elastisch-plastischen Kompressionsverhaltens von Pulvern	113
6.1	Entwicklung eines elastisch-plastischen Kontaktmodells	115
6.1.1	Plastische Deformation und Entlastungsverhalten	115
6.1.2	Zyklisches Deformationsverhalten	118
6.1.3	Kontaktflächenbestimmung	119
6.1.4	Kohäsionsmodellierung	120
6.2	Modellvalidierung	121
6.2.1	Druckversuche mit FlowLac-90	121
6.2.2	Druckversuche mit trockenen und feuchten MCC-Pellets	123
6.3	Scherzellensimulationen mit plastischer Deformation	125
6.4	Kompressionsversuche	126

7. Vorhersage des Verhaltens nicht-sphärischer Partikel mittels Deep Learning	137
7.1 Multi-Sphere Modellierung	139
7.2 Eingesetzte Materialien	141
7.3 Modellvalidierung	142
7.3.1 Scherboxversuche.....	142
7.3.2 Hohlzylinder-Zugversuche.....	146
7.4 Generierung des Trainingsdatensatzes	149
7.4.1 Betrachtete Formen	149
7.4.2 Silodimensionierung.....	152
7.4.3 Packungscharakteristiken	155
7.4.4 Massenströme und Entleerbarkeit	157
7.5 Datenfluss und Architektur des CNN	160
7.6 Training und Validierung	164
7.7 Analyse von weiteren Testdaten.....	169
7.7.1 Zylinder	169
7.7.2 Ellipsoide.....	170
7.7.3 Tetraeder.....	171
7.7.4 Kegelstümpfe	173
7.8 Vorhersagen für industrielle Partikelsysteme	174
7.8.1 Pharmazeutische Formen	175
7.8.2 Lebensmittel	176
7.8.3 Eisenwaren	178
8. Zusammenfassung und Ausblick	181
Literaturverzeichnis.....	187
Veröffentlichungen.....	211
Betreute wissenschaftliche Arbeiten	215
Lebenslauf.....	217