

"Experimentelle und mathematische Evaluation der Mahlkörperbewegungen sowie der Krafteinwirkungen bei der Zerkleinerung von Graphitpartikeln und der Beschichtung von 3D-Druckpulvern mit Kohlenstoffnanoröhrchen in einer Scheibenschwingmühle."

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

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

von M. Sc. Michael Trüe

geb. am 13.02.1990 in Magdeburg

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau	(Vorsitz)
	Prof. Dr. Ir. Berend van Wachem	(Gutachter)
	Dr.-Ing. habil. Peter Müller	(Gutachter)
	Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Stefan Heinrich	(Gutachter)

eingereicht am: 31.01.2020

Promotionskolloquium am: 01.07.2020

**Inhaltsverzeichnis**

Symbolverzeichnis .....	XIII
Abkürzungsverzeichnis .....	XVII
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Wissenschaft .....	3
2.1 Partikelhaftkräfte .....	3
2.1.1 Intermolekulare Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen.....	3
2.1.2 Interpartikuläre Bindungsmechanismen zwischen Feststoffpartikeln.....	5
2.1.3 Berechnungsmethoden von van-der-Waals-Wechselwirkungen.....	7
2.2 Zerkleinerungsarten .....	10
2.3 Reibungs- und Scherkräfte .....	12
2.3.1 Festkörperreibung.....	13
2.3.1.1 Haftreibung.....	13
2.3.1.2 Gleitreibung.....	14
2.3.1.3 Rollreibung.....	15
2.3.2 Spannungszustände in Schüttgütern.....	16
2.3.2.1 Berechnungen von Schüttgutkennwerten.....	19
2.3.3 Reibungsgesetz für Fluide.....	24
2.3.4 Bewegung zäher Flüssigkeiten .....	27
2.3.5 Spaltströmungsmodelle .....	29
2.3.5.1 Radiale Spaltströmung .....	29
2.3.5.2 Axiale Spaltströmung .....	34
2.4 Kohlenstoffbasierte Nanomaterialien.....	37
2.4.1 Mehrschichtiges Graphen (MSG).....	39
2.4.2 Kohlenstoffnanoröhrchen (CNTs).....	39
3 Mechanismen der Bearbeitung von Kohlenstoffallotropen .....	42
3.1 Mikromechanisches Ablättern von Graphenschichten .....	42

---

3.2	Beschichtung von Polymer- und Metallgranulaten mit CNTs .....	44
4	Materialien .....	48
4.1	Graphitpartikel.....	48
4.2	CNT .....	48
4.3	Gummi arabicum.....	48
4.4	Zucker.....	48
4.5	Wasser-Glyzeringemisch.....	49
4.6	Polymerpulver .....	49
4.7	Metallpulver .....	49
5	Versuchsaufbau und Messmethoden.....	50
5.1	Mahlkörperbewegungen in der Scheibenschwingmühle.....	50
5.1.1	Scheibenschwingmühle.....	50
5.1.2	Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera .....	51
5.1.2.1	Allgemeine Berechnungsansätze der Mahlkörpergeschwindigkeiten.....	51
5.1.2.2	Interpolation der Mahlkörperbewegungen.....	60
5.1.3	Abstandsmessung zwischen Mahlscheibe und Mahlboden.....	63
5.1.4	Mathematische Modellierung.....	65
5.1.5	Delamination von Graphen in hochviskosen Flüssigkeiten .....	66
5.1.6	Beschichtung von Polymer- und Aluminiumpartikeln in der Scheibenschwingmühle.....	67
5.1.7	Oberflächenbeschaffenheit der Mahlkörper und des Mahlraums .....	68
5.2	Raman-Spektroskopie.....	70
5.3	Messsysteme zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung .....	73
5.3.1	Zetasizer Nano-ZS.....	73
5.3.2	Mastersizer 2000 .....	74
5.3.3	Mathematische Beschreibung der Partikelgrößenverteilung.....	75
5.4	Untersuchung der Pulverfließfähigkeit.....	77
5.5	Sonstige Messgeräte.....	81

---

6	Ergebnisse und Diskussion .....	82
6.1	Validierung der mathematischen Modellierung der Mahlkörperbewegungen .....	82
6.1.1	Horizontale Mahlkörperbewegungen .....	82
6.1.1.1	Einfluss der Viskosität auf die Mahlkörperbewegungen .....	83
6.1.1.2	Einfluss der Füllmenge auf die Mahlkörperbewegungen.....	86
6.1.2	Vertikale Mahlkörperbewegungen .....	89
6.1.3	Berechnung der Scherspannungen .....	92
6.2	Delaminierung von MSG in hochviskosen Medien .....	96
6.2.1	Graphitpulver unbearbeitet.....	96
6.2.2	GWG – Graphitpulver, Glycerin-Wassergemisch.....	97
6.2.3	GAG – Graphitpulver, Gummi arabicum und Glycerin-Wassergemisch .....	101
6.2.4	GZG-50 – Graphitpulver, Zucker, Glycerin-Wassergemisch (50 ml) .....	106
6.2.5	GZG-100 – Graphitpulver, Zucker, Glycerin-Wassergemisch (100 ml) .....	111
6.3	Viskositätstabelle für die Fluide der MSG Experimente.....	114
6.3.1	Glycerin.....	114
6.3.2	GWG – Graphitpulver, Glycerin-Wassergemisch.....	116
6.3.3	GAG – Graphitpulver, Gummi arabicum und Glycerin-Wassergemisch .....	118
6.3.4	GZG-50 – Graphitpulver, Zucker, Glycerin-Wassergemisch (50 ml) .....	119
6.3.5	GZG-100 – Graphitpulver, Zucker, Glycerin-Wassergemisch (100 ml) .....	121
6.4	CNT-Beschichtung von SLS/SLM Pulvern in der Scheibenschwingmühle .....	122
6.4.1	Polymerpulver .....	122
6.4.1.1	Beschichtung .....	122
6.4.1.2	Einschätzung der Qualität der Beschichtung.....	123
6.4.1.3	Ramanspektroskopie des CNT-PP-Pulvers .....	128
6.4.1.4	Pulverfließfähigkeit.....	132
6.4.2	Metallpulver .....	135
6.4.2.1	Beschichtung .....	135
6.4.2.2	Einschätzung der Qualität der Beschichtung.....	136

6.4.2.3 Pulverfließfähigkeit.....	139
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	141
8 Literaturverzeichnis.....	145
Anhang A – Mahlkörperbewegungen .....	159
Anhang B – Partikelgrößenverteilungen .....	163
Anhang C – Pulverfließigenschaften – Mohrsche Spannungskreise.....	167
Anhang D – Viskositätentabelle.....	168
Publikationsliste .....	171