

Einfluss der Oberflächenmodifizierung auf die Fließeigenschaften von kohäsiven Schüttgütern

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieurin

(Dr.-Ing.)

von M. Sc. Zinaida Ivanova Todorova
geb. am 11.04.1988 in Kardzhali, Bulgarien

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

Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau	(Vorsitz)
	Prof. Dr. rer. nat. Franziska Scheffler	(Gutachter)
	Prof. Dr.-Ing. Manja Krüger	(Gutachter)
	Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schulze	(Gutachter)

eingereicht am: 19.06.2017
Promotionskolloquium am: 16.10.2017

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
1. Einleitung und Zielstellung	1
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1. Haftkräfte zwischen feinen Partikeln	4
2.1.1 Oberflächen- und Feldkräfte im Partikelkontakt	4
2.1.1.1 Van-der-Waals-Kräfte	4
2.1.1.2 Elektrostatische und magnetische Kräfte	5
2.1.2 Materialbrücken zwischen kontaktierenden Partikeln	6
2.1.2.1 Flüssigkeits- und Feststoffbrücken	6
2.1.2.2 Bindungen durch organische Makromoleküle	6
2.1.3 Formschlüssige Bindungen durch mechanische Verhakung	7
2.1.4 Einflussfaktoren auf die Haftkraft	7
2.1.4.1 Abstandsabhängigkeit	7
2.1.4.2 Oberflächenrauigkeit	8
2.1.4.3 Adsorptionsschichten	9
2.2 Mechanik der kohäsiven Schüttgüter	9
2.2.1 Spannungszustand in Schüttgütern	10
2.2.2 Fließverhalten von Schüttgütern	11
2.2.3 Zweiaxiale Spannungszustände in der fließenden Partikelpackung	13
2.2.4 Kompressionsverhalten kohäsiver Pulver	16
2.2.5 Mikro-Makro-Übergang und physikalisch begründete Auswertemethodik direkter Scherversuche	17
2.3 Ansätze zur Verbesserung des Fließverhaltens	22
2.3.1 Externer Energieeintrag	23
2.3.2 Veränderung der Oberflächenkräfte	23
2.3.2.1 Energetischer Zustand an der Grenzfläche und Modifizierung der Grenzflächenenergie	23
2.3.2.2 Nanopartikel als Fließhilfsmittel	31
3. Charakterisierungs- und Messmethoden	42
3.1 Einzelpartikel-Untersuchung	42
3.1.1 Rasterelektronenmikroskop	42
3.1.2 Kontaktwinkel und Oberflächenenergie	42
3.2 Untersuchung der Partikelkollektive	44
3.2.1 Dynamische Wasserdampfadsorption	44

3.2.2	Thermogravimetrie	45
3.2.3	Partikelgrößenverteilung	46
3.2.3.1	Statische Lichtstreuung - Laserbeugung	46
3.2.3.2	Dynamische Lichtstreuung – Photonenkorrelationsspektroskopie	47
3.2.4	Zeta-Potential und Strömungspotential	48
3.2.5	Spezifische Oberfläche	50
3.2.6	Scherversuche	51
4.	Partikelsysteme und Chemikalien	54
4.1	Glas-Trägerpartikel	54
4.2	Nanopartikelsysteme – Gastpartikelsysteme	55
4.2.1	Silizium(IV)-oxid	56
4.2.1.1	Der Sol-Gel-Prozess	56
4.2.2	Titandioxid	59
4.2.3	Polystyrol	61
4.3	Verwendete Chemikalien	63
4.3.1	Polyelektrolyte	63
4.3.2	Organische Silane	64
5.	Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung	66
5.1	Vorbehandlung der Oberfläche	66
5.2	Silanisierung	66
5.3	Modifizierung der Oberflächenmorphologie durch Heterokoagulation	68
5.4	Messung der Pulverfließigenschaften	70
6.	Ergebnisse und Diskussion	71
6.1	Charakterisierung der beschichteten Partikel	71
6.1.1	Glaspartikel mit modifizierter Oberflächenchemie	72
6.1.2	Glaspartikel mit modifizierter Oberflächenmorphologie	84
6.1.2.1	Glaspartikel mit metalloxidischen Gastpartikeln	84
6.1.2.2	Glaspartikel mit polymeren Gastpartikeln	92
6.2	Fließverhalten der oberflächenmodifizierten Partikel	95
6.2.1	Fließkennwerte der Glaspartikel mit modifizierter Oberflächenchemie	95
6.2.2	Fließkennwerte der Glaspartikel mit modifizierter Oberflächenmorphologie	102
6.2.2.1	Beschichtung mit metalloxidischen Nanopartikeln	103
6.2.2.2	Beschichtung mit polymeren Nanopartikeln	110
6.2.3	Vergleich zwischen den Fließkennwerten	111
6.3	Modellgestützte Rückrechnung der mikromechanischen Eigenschaften	114
6.3.1	Charakteristische Haftkraft	114

6.3.2	Elastisch-plastischer Kontaktverfestigungskoeffizient.....	115
6.3.3	Lineare Haftkraftfunktion.....	118
7.	Zusammenfassung.....	122
8.	Literaturverzeichnis.....	127
9.	Anhang.....	133
9.1	Spezifische Oberfläche der silanisierten Partikel.....	133
9.2	Zeta-Potential als Funktion des pH-Wertes.....	133
9.2	Partikelgrößenverteilungen der Core-Shell-Partikel.....	134
9.3	REM-Aufnahme von Glas-PS-Core-Shell-Partikeln.....	135
9.4	Kompressionsfunktion der silanisierten Glaspartikel.....	135