

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Grundlagen und Stand des Wissens	5
1.1.1 Einzelmechanismen des Prozesses	5
1.1.2 Einfluss von Stoffeigenschaften auf die Granulation	14
1.1.3 Modellierung der Wirbelschicht-Sprühgranulation	16
1.1.4 Fazit und offene Fragestellungen	21
1.2 Ziel dieser Arbeit	21
1.3 Lösungsweg und zugrunde liegende Arbeitshypothesen	21
<b>2 Experimentelle Vorgehensweise</b>	<b>27</b>
2.1 Versuchsanlage	28
2.2 Standardbetriebsparameter	30
2.3 Untersuchungen zur Fluidodynamik im Düsenstrahl	31
2.4 Untersuchungen zum Staubhaltevermögen der Wirbelschicht	33
2.5 Untersuchungen zu Staubeinbindung und Granulatwachstum	33
2.5.1 Untersuchung der Mechanismen mit tracermarkiertem Staub	34
2.5.2 Untersuchung des Einflusses der lokalen Staubkonzentration	38
2.6 Untersuchungen zu Keim- und Kernbildung	40
2.6.1 Laboruntersuchungen zur Keimbildung	40
2.6.2 Voruntersuchungen durch Semi-batch-Versuche	41
2.6.3 Effektive Kernbildungsraten und Granulatwachstumsgeschwindigkeiten	42
2.7 Granulationsexperimente zur Modellvalidierung	45
2.8 Untersuchung der Produkteigenschaften	47
2.8.1 Redispergierbarkeit	47
2.8.2 Porosität und Dichte	48
<b>3 Modellierung der Einzelmechanismen und des Gesamtprozesses</b>	<b>49</b>
3.1 Aufbau des Prozessmodells	49
3.1.1 Beschreibung der Bilanzräume (Kompartimentansatz)	52
3.1.2 Kopplung der Teilmodelle (Mehrskalenansatz)	54
3.2 Modellierung des Düsenstrahls	55
3.2.1 Modellierung der Zweiphasenströmung	56
3.2.2 Bilanzierung der Gasphase	57
3.2.3 Bilanzierung der Granulatphase	60

---

3.2.4	Bilanzierung der Tropfenphase	63
3.2.5	Bilanzierung der Staubphase	64
3.2.6	Modellierung von Keimbildung und –wachstum	65
3.2.7	Modellierung der Tropfenabscheidung und Staubeinbindung auf Granulaten und Keimen	67
3.3	Modellierung von Wirbelschicht, Freeboard und der Partikelpopulationen	74
3.3.1	Modellierung der Staub- und Granulatpopulationen	75
3.3.2	Bilanzierung der Wirbelschicht	77
3.3.3	Bilanzierung von Freeboard 1	80
3.3.4	Bilanzierung von Freeboard 2	81
3.4	Modellierung der Peripherie	83
3.5	Populationsbilanzen	83
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>85</b>
4.1	Charakterisierung des Granulationsverhaltens	85
4.2	Untersuchung und Modellierung der Einzelmechanismen	87
4.2.1	Fluidodynamik und Geschwindigkeiten im Düsenstrahl	87
4.2.2	Austragsverhalten des Staubes aus der Wirbelschicht	92
4.2.3	Staubeinbindung und Granulatwachstum	95
4.2.4	Keim- und Kernbildung	117
4.2.5	Einfluss verschiedener Parameter auf Keimbildung, Staubeinbindung und Granulatwachstum	133
4.3	Granulationsexperimente – Vergleich Simulation und Experiment	136
4.3.1	Semi-batch-Granulation ohne Staubrückführung	137
4.3.2	Semi-batch-Granulation mit Staubrückführung	137
4.3.3	Vergleich der Semi-batch-Versuche mit und ohne Staubrückführung	138
4.3.4	Kontinuierliche Granulation ohne Staubrückführung	139
4.3.5	Kontinuierliche Granulation mit Staubrückführung	140
4.3.6	Zusammenfassende Beurteilung der Experimente und Simulationen	141
4.4	Einfluss verschiedener Parameter auf die Produkteigenschaften	141
4.4.1	Voruntersuchungen durch Semi-batch-Versuche	142
4.4.2	Kontinuierliche Granulationsexperimente	143
4.4.3	Fazit der beobachteten Einflüsse auf die Granulateigenschaften	146
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Materialien und Methoden</b>	<b>169</b>

---

A.1	Stoffsystem und Granulationsverhalten	169
A.1.1	Verwendete Stoffe und ihre physikalischen Eigenschaften	169
A.1.2	Charakterisierung des Granulationsverhaltens	175
A.2	Analysengeräte	178
A.2.1	Überblick über die wichtigsten verwendeten Analysengeräte	178
A.2.2	Messen von Partikelgrößenverteilungen	179
A.2.3	Quantitative Traceranalyse mittels Atomemissionsspektrometrie	184
A.2.4	Methoden zur Untersuchung der Granulateigenschaften	186
A.3	Minimalfluidisation und Anlagentrennkurve	190
A.3.1	Minimalfluidisation	190
A.3.2	Trennkurve der Anlage	191
<b>B</b>	<b>Ergänzungen zur Modellierung</b>	<b>192</b>
B.1	Programmablaufplan und Implementierung in MatLab <sup>®</sup>	193
B.2	Strahlrechnung	198
B.2.1	Berechnung des Wärme- und Stoffübergangs im Düsenstrahl	198
B.2.2	Korrektur der Kinetiken zwischen den Strahlrechnungen	201
B.2.3	Diskretisierungsfehler beim expliziten Differenzenverfahren	202
B.2.4	Berücksichtigung des Einsaugortes der Granulate in den Strahl	203
B.2.5	Modellierung von Granulatabrieb im Düsenstrahl	206
B.3	Modellierung der klassierenden Produktausfuhr und des Filters	207
B.3.1	Klassierende Produktausfuhr	207
B.3.2	Externe Staubabscheidung und Staubrückführung	208
B.4	Wärme- und Stoffübergang in Wirbelschicht, Freeboard 1 und 2	209
B.5	Berechnung des Überlaufstroms aus der Wirbelschicht	210
B.6	Wärmeverlust des Apparates	211
B.7	Diskretisierung der Populationsbilanzen	211
B.8	Standardparameter für die Simulationsrechnungen	214
B.9	Einfluss verschiedener Parameter auf Keimbildung, Staubeinbindung und Granulatwachstum	215
B.9.1	Einfluss des Staubhaltevermögens auf das Granulatwachstum	215
B.9.2	Einfluss von Stoffeigenschaften auf das Granulatwachstum	216
<b>C</b>	<b>Experimentelle Bestimmung der Filmhöhe bei der Tropfenabscheidung</b>	<b>217</b>
<b>D</b>	<b>Ergänzungen zur Untersuchung der Fluidodynamik im Düsenstrahl</b>	<b>218</b>
D.1	Partikelgeschwindigkeiten im Düsenstrahl	218
D.1.1	Beschreibung der Messsysteme PIV und LDA	218
D.1.2	Partikelvorlage für die Fluidodynamik-Messungen	220