

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung.....	V
Abstract	VII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis.....	XXI
1. Einleitung und Motivation.....	1
2. Grundlagen und Stand der Technik.....	3
2.1 Die trockene Fein- und Feinstzerkleinerung.....	3
2.1.1 Grundlagen der Trockenzerkleinerung.....	3
2.1.2 Beanspruchungsarten	4
2.1.3 Herausforderungen der trockenen Feinzerkleinerung	6
2.1.4 Mühlentypen für die trockene Fein- und Feinstzerkleinerung.....	7
2.1.5 Potentiale und Entwicklungsstand der trocken Rührwerkskugelmühle.....	9
2.2 Einsatz von Mahlhilfsmitteln bei der trockenen Feinstzerkleinerung	11
2.2.1 Grundlegende Wirkungsweise von Mahlhilfsmitteln	12
2.2.2 Zerkleinerung mit Mahlhilfsmitteln in Labormühlen	15
2.2.3 Überlagernde Aspekte der Mahlhilfsmittelwirkung	17
2.2.3.1 Zusammenhang zwischen Pulvereigenschaften und Beanspruchung	17
2.2.3.2 Überlagerung des Transportverhaltens in kontinuierlich betriebenen Mühlen	19
2.2.4.3 Weitere Additiveinflüsse in geschlossenen Mahl-Sicht-Kreisläufen	21
2.3 Mathematische Beschreibung von Mahlkörpermühlen.....	23
2.3.1 Modellierung von Zerkleinerungsprozessen in Mahlkörpermühlen.....	23
2.3.2 DEM-Simulation der Mahlkörperbewegung	26
2.3.3 Berücksichtigung des Partikelverhaltens bei der trockenen Feinzerkleinerung	28
3. Materialien und Methoden	31

3.1 Versuchsmaterialien.....	31
3.1.1 Untersuchte Mahlhilfsmittel.....	31
3.1.2 Mahlgüter	32
3.1.2.1 Zerkleinerung in absatzweise betriebenen Labormühlen.....	32
3.1.2.2 Modellstoffe zur Charakterisierung des Partikel-Einfangverhaltens	33
3.1.2.3 Mahlgut zur kontinuierlichen Feinstzerkleinerung	35
3.1.2.4 Kalksteinfraktionen für die separate Sichterstudie.....	35
3.2. Analysemethoden	35
3.2.1 Bestimmung der Produktfeinheit.....	35
3.2.1.1 Partikelgrößenverteilung	36
3.2.1.2 Spezifische BET-Oberfläche	36
3.2.1.3 Spezifische Oberfläche nach Blaine.....	37
3.2.2 Untersuchung wesentlicher Produkt- und Pulvereigenschaften	37
3.2.2.1 Agglomeratgrößen	37
3.2.2.2 Pulverfließfähigkeit.....	38
3.2.2.3 Oberflächenenergie.....	39
3.2.2.4 Gutmann Säure-Base-Eigenschaften	40
3.3 Zerkleinerungsverfahren	40
3.3.1 Batchweise Zerkleinerung mittels Laborschwingmühle.....	40
3.3.2 Zerkleinerung in absatzweise betriebener Rührwerkskugelmühle.....	41
3.3.3 Kontinuierliche Zerkleinerung mittels horizontaler Rührwerkskugelmühle	43
3.3.3.1 Passagenfahrweise.....	44
3.3.3.2 Mahl-Sicht-Betrieb.....	44
3.3.3.3 Charakterisierung des Sichters im Mahl-Sicht-Kreislauf	46
3.3.3.3 Bestimmung des Verweilzeitverhaltens	48
3.3.3.4 Untersuchung der Additive in einem alleinstehenden Sichter	50
3.3.4 Weitere Mahl-Sicht-Prozesse zur Untersuchung der Mahlhilfsmittelwirkung.....	51
3.3.4.1 Feinstzerkleinerung mittels vertikaler Rührwerkskugelmühle Pulvis	51
3.3.4.2 Fließbettgegenstrahlmühle.....	52
3.3.4.3 Dampfstrahlmühle	54
3.4 Weiterführende Methoden.....	54
3.4.1 Evaluation des Partikel-Einfangverhaltens.....	54
3.4.2 Untersuchung der Mahlkörperbewegung in Rührwerkskugelmühlen	56
3.4.2.1 Bestimmung der DEM-Kalibrierparameter.....	57
3.4.2.2 DEM-Simulation der Mahlkörperbewegung	59
4. Untersuchung der Wirkmechanismen.....	61

4.1	Additivwirkung bei der Kalksteinzerkleinerung	61
4.1.1	Einflüsse der Mahlhilfsmittel auf das Zerkleinerungsergebnis	61
4.1.2	Beeinflussung der Partikel- und Pulvereigenschaften	65
4.1.2.1	Agglomerationsverhalten der Partikeln	65
4.1.2.2	Pulverfließfähigkeit	69
4.1.2.3	Oberflächenenergie	70
4.1.3	Korrelation von Oberflächenenergie und Produkteigenschaften	72
4.1.4	Zusammenhang zwischen Pulvereigenschaften und Zerkleinerungsergebnis	74
4.2	Untersuchung feststoffspezifischer Additiveffekte	75
4.2.1	Vergleich der verschiedenen Mahlgüter	76
4.2.1.1	Zementklinker	78
4.2.1.2	Hüttensand	79
4.2.1.3	Quarzsand	81
4.2.1.4	Flugasche	81
4.2.2	Betrachtung der Oberflächenenergien und Oberflächeneigenschaften	84
5.	Untersuchung des Partikel-Einfangverhaltens	87
5.1	Einflussfaktoren auf das Partikel-Einfangverhalten zwischen Mahlkörpern	87
5.2	Beeinflussung des Zerkleinerungsverhaltens	93
5.3	Erweiterung des Schönert-Modells zur Beschreibung des Einfangverhaltens	99
6.	Mahlhilfsmittel bei der Batchzerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen	105
6.1.	Vergleich ausgewählter Mahlhilfsmittel	105
6.2.	Zusammenhang zwischen Produktformulierung und Prozessparametern	107
6.3.	Überlagernde Auswirkungen des Produktfüllgrades	113
6.4.	Einflüsse der Mahlhilfsmittelzugabestrategie	116
7.	Untersuchung der Mahlkörperbewegung in Rührwerkskugelmühlen	119
7.1	Einfluss der Mahlhilfsmittel auf die DEM-Kalibrierparameter	119
7.2	DEM-Simulation der Mahlkörperbewegung	121
7.2.1	Simulation der vertikalen Labormühlen	122
7.2.1.1	Abhängigkeit der Mahlkörperbewegung von der Produktformulierung	122
7.2.1.2	Einfluss der wesentlichen Betriebsparameter	124
7.2.2	Simulation der horizontalen Rührwerkskugelmühle	131
7.3	Identifizierung der optimalen Beanspruchungsbedingungen	133

8. Kontinuierliche Zerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen	137
8.1 Passagenmahlung mittels horizontaler Rührwerkskugelmühle	137
8.1.1 Einflüsse der Mahlhilfsmittel	137
8.1.2 Einfluss der Betriebsparameter.....	143
8.1.2.1 Mahlkörpergröße und -material	143
8.1.2.2 Mahlkörperfüllgrad	146
8.1.2.3 Rührerumfangsgeschwindigkeit	147
8.1.3 Verweilzeitverhalten und Produkttransport in Abhängigkeit des Mahlhilfsmittels.....	150
8.2 Kreislaufmahlung mittels horizontaler Rührwerkskugelmühle	154
8.2.1 Untersuchung verschiedener Mahlhilfsmittel.....	154
8.2.1.1 Einfluss der Mahlhilfsmittel auf die Zerkleinerung	154
8.2.1.2 Verweilzeitverhalten in Abhängigkeit der Additive	157
8.2.1.3 Auswirkungen der Additive auf den Feinsichtprozess.....	160
8.2.2 Verringerung der Mahlhilfsmittelmenge	164
8.2.3 Variation der Prozessparameter für ausgewählte Mahlhilfsmittel.....	166
8.3 Mahlhilfsmittel in der vertikalen Rührwerkskugelmühle Pulvis	170
9. Beispiele zu Mahlhilfsmittelleffekte in Strahlmühlen	173
9.1 Fließbettgegenstrahlmühle.....	173
9.1.1 Variation der Mahlhilfsmittelmenge.....	173
9.1.2 Mahlhilfsmittelleffekte in Abhängigkeit der Produktfeinheit	176
9.2 Dampfstrahlmühle	178
10. Zusammenfassung und Ausblick	181
11. Literaturverzeichnis.....	185
Anhang	195