Inhaltsverzeichnis

1 Einführung ... 1

1.1 Vor- und Nachteile der blasenbildenden und der zirkulierenden Wirbelschichten ... 1

1.2 Problematik der Herstellung eines Gemisches aus Schwelkoks und Eisenerzen für den Schmelzreduktionsprozess ... 2

1.3 Prinzip des Ringwirbelschichtreaktors ... 3

1.4 Auslegungskriterium ... 4

1.5 Weitere Anwendungen ... 5

1.6 Scale-up Problematik ... 5

2 Stand des Wissens ... 7

2.1 Vertikal-aufwärts gerichtete Gas-Feststoff-Strömungen ... 7

2.2 Einordnung der Strömungszustände im Diagramm nach Reh ... 11

2.3 Modell der entmischten Gas-Feststoff-Strömung nach Wirth ... 13

2.4 Scale-up konventioneller Wirbelschichten ... 17

3 Aufgabenstellung ... 21

4 Versuchsaufbau und Versuchsbedingungen ... 23

4.1 Versuchsanlagen ... 23

4.1.1 Anlagengeometrien ... 23
4.1.1.1 Vollkreislaboranlage ... 23
4.1.1.2 Halbkreislaboranlage ... 28
4.1.1.3 Pilotanlage ... 28
4.1.2 Instrumentierung der Anlagen ... 34
4.1.2.1 Datenerfassung ... 34
4.1.2.2 Bestimmung der Leerrohrgasgeschwindigkeiten ... 34
4.1.2.3 Bestimmung der externen Querschnittsbelastung ... 35
4.1.2.4 Messung axialer Druckprofile ... 36
4.1.2.5 Messung der Frequenz der Druckschwankungen ... 36

4.2 Versuchsgüter ... 37

4.3 Versuchsparameter ... 39

4.3.1 Betriebsparameter ... 39
4.3.2 Geometrische Parameter ... 40
4.3.3 Parameter bei der kapazitiven Sondenmessung ... 41

4.4 Vorversuche ... 41
4.4.1 Druckverlust in der Wirbelmischkammer ... 41
4.4.2 Düsendurchfall ... 45
4.4.2.1 Einfluss der Fluidisierung im Ring und des Druckverlustes in der Wirbelmischkammer ... 45
4.4.2.2 Einfluss der Länge der Zentraldüse ... 48
4.4.2.3 Einfluss des Versuchsmaterials ... 51
4.4.3 Stoßende Wirbelschicht ... 52
4.5 Betriebsbereiche ... 55

5 Kapazitive Sondenmesstechnik ... 59
5.1 Grundlagen ... 59
5.1.1 Theorie ... 59
5.1.2 Praxis ... 61
5.2 Funktionsweise der kapazitiven Sonde ... 62
5.3 Aufbau des eingesetzten Messsystems ... 63
5.3.1 Komponenten des Messsystems ... 63
5.3.2 Messverstärker ... 64
5.3.3 Aufbau der Sonde ... 64
5.3.4 Traversierbarkeit ... 65
5.4 Auswertung ... 66
5.4.1 Bestimmung der axialen Feststoffgeschwindigkeit ... 66
5.4.1.1 Prinzip der Berechnung ... 66
5.4.1.2 Mathematischer Algorithmus ... 67
5.4.1.3 Problematik: der Abschattungseffekt ... 69
5.4.1.4 Auswahlkriterien ... 70
5.4.2 Bestimmung der Feststoffkonzentration ... 73
5.4.2.1 Kalibrierung ... 73
5.4.2.2 Zeitgemittelte Feststoffkonzentration und Strähnenkonzentration ... 76
5.4.2.3 Einflussfaktoren für die Berechnung der Feststoffkonzentration ... 78
5.4.3 Berechnung der Querschnittsbelastung ... 84
5.4.3.1 Lokale anzahl- und zeitgemittelte Querschnittsbelastung ... 84
5.4.3.2 Integrale Querschnittsbelastung ... 85
5.5 Validierung der Messtechnik ... 86
5.5.1 Feststoffkonzentrationsmessung ... 87
5.5.1.1 Überprüfung der Sondenkalibrierung ... 87
5.5.1.2 Vergleich mit der Feststoffkonzentration aus dem Druckprofil ... 88
5.5.2 Querschnittsbelastungsberechnung ... 89
5.5.2.1 Zustand der blasenbildenden Wirbelschicht ... 89
5.5.2.2 Zustand der zirkulierenden Wirbelschicht ... 90
5.5.3 Symmetrie der Strömung ... 91
5.6 Schlussfolgerung zur kapazitiven Sondenmesstechnik ... 92

6 Strömungszustand des Ringwirbelschichtreaktors ... 93

6.1 Charakteristischer Strömungszustand ... 93

6.1.1 Globaler Strömungszustand ... 93
6.1.2 Lokaler Strömungszustand ... 95
6.1.2.1 Laboranlage ... 95
6.1.2.2 Pilotanlage ... 99

6.2 Druckverlust in der Wirbelmischkammer ... 101

6.2.1 Einfluss der Zentraldüsengeschwindigkeit und der Fluidisierung im Ring ... 101
6.2.2 Einfluss des Feststoffinventars in der Wirbelmischkammer ... 103

6.3 Einfluss der Betriebsparameter ... 104

6.3.1 Einfluss des Druckverlustes bzw. des Feststoffinventars in der Wirbelmischkammer ... 104
6.3.2 Einfluss der Zentraldüsengeschwindigkeit ... 107
6.3.2.1 Bei konstantem Druckverlust in der Wirbelmischkammer (Pilotanlage) ... 107
6.3.2.2 Bei konstantem Feststoffinventar in der Wirbelmischkammer (Laboranlage) ... 110
6.3.3 Einfluss der Fluidisierung im Ring ... 113
6.3.3.1 Laboranlage ... 114
6.3.3.2 Pilotanlage ... 116
6.3.3.3 Allgemeine Schlussfolgerung zum Einfluss der Fluidisierung im Ring ... 118
6.3.4 Schlussfolgerung für die Feststoffeinmischung oberhalb der Zentraldüse in der Laboranlage ... 118
6.3.4.1 Geringe Gasgeschwindigkeit im Ring ... 120
6.3.4.2 Hohe Gasgeschwindigkeit im Ring ... 123
6.3.5 Einfluss des Versuchsmaterials ... 124
6.3.5.1 Lokale Strömungsprofile ... 124
6.3.5.2 Direkter Vergleich mit Quarzsand ... 127

6.4 Einfluss der geometrischen Parameter ... 129

6.4.1 Einfluss des Durchmessers der Zentraldüse ... 129
6.4.1.1 Laboranlage ... 129
6.4.1.2 Pilotanlage ... 133
6.4.1.3 Schlussfolgerungen zum Einfluss des Durchmessers der Zentraldüse ... 136
6.4.2 Einfluss der Länge der Zentraldüse ... 136
6.4.2.1 Strömungsprofil an der Mündung der Zentraldüse ... 137
6.4.3 Einfluss der Höhe der Ringwirbelschicht ... 139
6.4.3.1 Einfluss der Fluidisierung im Ring ... 141
6.4.3.2 Einfluss des Feststoffinventars in der Wirbelmischkammer ... 142
6.4.3.3 Einfluss der Gasgeschwindigkeit in der Zentraldüse ... 142
6.4.4 Einfluss der Höhe der Wirbelmischkammer ... 143
6.4.5 Einfluss der Einbauten ... 145
6.4.6 Schlussfolgerung zum Einfluss der geometrischen Parameter ... 146

6.5 Vergleich zwischen Labor- und Pilotanlage ... 146

7 Modellierung ... 151

7.1 Konvektiver Feststoffeintrag durch die Gasblasen ... 151

7.1.1 Grundidee des Modells ... 151
7.1.2 Herleitung ... 152
7.1.2.1 Gleichverteilung ... 152
7.1.2.2 Aktiver Blasenanteil aus dem „Kreisring“ ... 153
7.1.2.3 Feststoffanteil pro Blase ... 153
7.1.2.4 Normierter Feststoffmassenstrom ... 155
7.1.3 Validierung ... 156
7.1.4 Konsequenzen ... 158
7.1.5 Einfluss der Höhe der Ringwirbelschicht ... 159
7.1.6 Limitierungen ... 161

7.2 Partikelbahnberechnung ... 161

7.2.1 Grundidee des Modells ... 161
7.2.2 Herleitung ... 163
7.2.2.1 Bewegungsgleichungen ... 163
7.2.2.2 Methode zur Lösung der Bewegungsgleichungen ... 164
7.2.2.3 Modell für die Gasgeschwindigkeit ... 167
7.2.3 Einfluss der Anpassungsparameter des Modells ... 175
7.2.3.1 Feststoffeindringwinkel θ_s ... 175
7.2.3.2 Halber Öffnungswinkel des Kegels α_{Kegel} ... 177
7.2.3.3 Anpassung an die experimentellen Ergebnisse ... 178
7.2.3.4 Validierung des Modells ... 180
7.2.4 Einfluss ausgesuchter Versuchsparameter ... 181
7.2.4.1 Einfluss der Zentraldüsengeschwindigkeit ... 181
7.2.4.2 Einfluss der Fluidisierung im Ring ... 182
7.2.4.3 Einfluss des Durchmessers der Zentraldüse ... 183
7.2.4.4 Einfluss des Durchmessers der Anlage ... 184
7.2.5 Konsequenzen ... 185
7.2.5.1 Clusterbildung ... 185
7.2.5.2 Regelung der Einmischung ... 187
7.2.6 Limitierungen ... 188

7.3 Schlussfolgerung aus den beiden Modellen ... 188

8 Scale-up von Ringwirbelschichtreaktoren ... 189

8.1 Auslegung eines industriell einsetzbaren Ringwirbelschichtreaktors ... 189

8.1.1 Prozessbedingungen und Vorgehensweise bei der Auslegung ... 189
8.1.2 Konsequenzen aus der Modellierung ... 191
8.1.2.1 Ausgangsgeometrie für die Dimensionierung ... 191
8.1.2.2 Abschätzung des konvektiven Feststoffmassenstroms ... 193
8.1.2.3 Partikelbahn des Feststoffs ... 195
8.1.3 Zusätzliche Herausforderung bei breiter Korngrößenverteilung ... 197
8.1.4 Scale-up Kriterien ... 198

8.2 Betriebserfahrung einer industriellen HIsmelt-Anlage ... 198

8.2.1 Prinzip der Anlage ... 198
8.2.2 Beschreibung der Anlage ... 200

8.2.3 Betriebsdaten und Vorteile des Ringwirbelschichtreaktors 201

8.3 Vorteile gegenüber klassischen Reaktorkonzepten 202

8.3.1 Vergleich mit der blasenbildenden Wirbelschicht 202
8.3.2 Vergleich mit der zirkulierenden Wirbelschicht 203

8.4 Ausblick 204

9 Zusammenfassung 207

10 Symbolverzeichnis 211

11 Literaturverzeichnis 219

12 Summary 225