

Inhaltverzeichnis

1. Einführung in den Themenkreis	
1.1. Reduktion	11
1.1.1. Thermodynamische Grundlagen der Eisenreduktion	12
1.1.2. Kinetische Grundlagen der Eisenreduktion	16
1.1.3. Morphologie der Reduktion	20
1.1.4. Reduktion von Agglomeraten	22
1.2. Schachtöfen	24
1.2.1. Hochofenprozess	25
1.2.2. Corex [®] - und Finex [®] -Prozesse	29
1.2.3. Kupolofenprozess	32
1.2.4. OxiCup [®] -Schachtöfen	37
1.2.5. Verhältnisse in der Blasformebene	41
1.2.5.1. Wirbelzone im Hochofen	41
1.2.5.2. Zone vor der Blasform des Kupolofens	47
1.2.5.3. Corex [®] -Einblaszone	49
1.2.6. Einblasen in Schachtöfen	50
1.2.7. Impulsverfahren für Schachtöfen	53
2. Forschungsausrüstung und –methoden	
2.1. Experimentelle Anlagen	62
2.1.1. Laboreinblasanlagen	62
2.1.1.1. Batch-Anlage	62
2.1.1.2. MIRI-Anlage	68
2.1.2. Pilotanlage KOBESI	72
2.1.2.1. Aufbau des Koksbettssimulator KOBESI	72
2.1.2.2. Versuchsvorbereitung und –durchführung	81
2.1.3. Laboröfen	83
2.1.3.1. Tammannöfen	83
2.1.3.2. Muffelöfen	86
2.1.4. Thermogravimetrische und analytische Untersuchungen	89
2.2. Messtechnik und mathematische Modelle	91
2.2.1. Berührungslose Messungen im Hochtemperaturbereich	91
2.2.2. Modelle	94

2.2.2.1. Hochofen-Modelle	94
2.2.2.2. OxiCup®-Ofen-Modell	96

3. Einblasen in den Hochofen

3.1. Ziele, Grundlagen und Stand der Technik	102
3.1.1. Einblasen von Kohle	102
3.1.2. Einblasen von Kunststoffen	111
3.1.3. Einblasen von Reduktionsgasen	113
3.1.4. Einblasen von Biomasse	119
3.1.5. Einblasen von eisenhaltigen Stoffen	121
3.2. Laborversuche zum Einblasen von Kohlen unterschiedlicher Inkohlungsstufen	123
3.2.1. Einsatzmaterialien und Referenzkampagne	124
3.2.2. Einblasen von Steinkohle	127
3.2.3. Einblasen von Braunkohle	130
3.2.4. Diskussion der Kohleeinblasversuche	131
3.3. Untersuchungen zum Einblasen von Reduktionsgas und Kohlenstaub	135
3.3.1. Mathematische Modellierung der Hochofen- Parameter beim Reduktionsgas-Einblasen	135
3.3.1.1. Einfluss der Reduktionsgasparameter	136
3.3.1.2. Ko-Injektion von Reduktionsgas und Kohlenstaub	141
3.3.2. Laborversuche zur Ko-Injektion von Reduktionsgas, Kohlenstaub und Sauerstoff; Blasformdesign- Entwicklung	144
3.4. Untersuchungen zum Einblasen von pyrolysierten Biomassen	146
3.4.1. Mathematische Modellierung der Hochofen- Parameter beim Holzkohle-Einblasen	147
3.4.2. Untersuchung der Holzkohleneigenschaften und -reaktivität	150
3.4.3. Labor-und Pilotversuche zum Einblasen von Holzkohle	155
3.4.4. Untersuchung des Holzkohleverhaltens außerhalb der Wirbelzone	159
3.4.5. Einsatz torrefizierter Biomassen	162

3.5. Laborversuche zum Einblasen von Reststoffen	169
3.5.1. Wirkung katalytischer Stoffe auf die Umsetzung von Kohle	169
3.5.2. Einblasen von Aktivkohle	171
3.5.3. Einblasen von Petrolkoks	173
3.5.4. Einblasen von Shredderleichtfraktion (SLF) und deren Mischungen mit Kohle	174
3.5.5. Einblasen von Gichtschlammstaub	178
3.5.6. Einblasen von Kohle mit Walzenzunder	178
3.5.7. Verhalten von Char beim Einblasen	179
3.5.8. Diskussion der Versuche zum Einblasen von Reststoffen	180
3.6. Experimentelle Untersuchungen zum Einblasen von DRI/LRI	188
3.6.1. Einsatzstoffe	188
3.6.2. Einblasversuche	190
3.7. Untersuchungen zum Einblasen von Kunststoffen	192
3.7.1. Charakterisierung der Kunststoffe	192
3.7.2. Thermogravimetrische Untersuchungen	193
3.7.3. Einblasversuche	196

4. Einblasen in den Kopolofen und OxiCup®-Schachtofen

4.1. Bisherige Erfahrungen zum Einblasen von Feststoffen in den Kupolofen	206
4.1.1. Einblasen von Kohlenstoffträgern	207
4.1.2. Einblasen von Legierungsmitteln	208
4.1.3. Einblasen von Reststoffen	208
4.1.4. Einfluss der Staubinjektion	209
4.2. Pilotversuche zum Feststoffeinblasen in den Kupolofen	212
4.2.1. Einsatzmaterialien	213
4.2.2. Ergebnisse und Diskussion	215
4.2.2.1. Siliziumcarbidabrieb	217
4.2.2.2. Altsandfeinfraktion	219
4.2.2.3. Strahlgut	220
4.2.2.4. Eisenstaub aus der Bremsscheibenbearbeitung	221
4.2.2.5. Eisenspäne aus der Bremsscheibenbearbeitung	222

4.2.2.6. Staubmischungen	223
4.2.3. Modellvorstellungen zum Staubeinblasen in den Kupolofen	225
4.3. Pilotversuche zum Einblasen von eisenhaltigen Stäuben in den OxiCup®-Schachtofen	228
4.3.1. Einsatzstoffe	229
4.3.2. Ergebnisse	232
4.3.3. Diskussion	239
4.3.3.1. Metallisierungs- und Reduktionsverhalten	239
4.3.3.2. Verhalten des Kohlenstoffes der eingeblasenen Stäube	242
4.4. Betriebsversuche am OxiCup®-Schachtofen	246
4.4.1. Einblassystem und untersuchte Stäube	246
4.4.2. Versuchsdurchführung und Ergebnisse	250

5. Vorgänge vor den Blasformen der Schachtöfen

5.1. Messungen von Gastemperatur und –zusammensetzung vor den Blasformen	256
5.1.1. Einsatz der CARS-Spektroskopie zur Messungen von Gasen im Hochtemperaturbereich	256
5.1.2. CARS-Messungen am KOBESI	257
5.1.2.1. Aufbau des Messsystems und der Versuchsablauf	257
5.1.2.2. Versuchsergebnisse und -interpretation	262
5.2. Berechnungen der Gascharakteristiken in der Raceway	269
5.2.1. Berechnung der Wirbelzonenparameter	269
5.2.1.1. Raceway Modelle	269
5.2.1.2. Berechnungsergebnisse für Kohle	273
5.2.1.3. Berechnungsergebnisse für DRI/LRI	276
5.2.2. Umsetzung von Kohlepartikeln in der Wirbelzone	277
5.2.3. Einfluss der Flammtemperatur auf Wärmeaustausch-phenomene in der Blasformebene und Prozesseffizienz	278
5.3. Sauerstoffimpulsverfahren für Schachtöfen	279
5.3.1. Ziele und Optionen	279
5.3.2. SIP-Verfahren zur Sauerstoffinjektion	280
5.3.2.1. Pilotversuche	281
5.3.2.2. Betriebsuntersuchungen	286

6. Koks, Brechkoks, Formkoks und Halbkoks

6.1. Anforderungen, Eigenschaften und Verhalten des Hochofenkokes, Brechkokes, Formkokes und Corex®-Kokes und -Kohle	292
6.1.1. Koksqualität für einen modernen Hochofen	292
6.1.2. Einsatz von Brechkoks im Hochofen	297
6.1.3. Formkoks	298
6.1.4. Kohle und Koks für Corex® und Finex®	300
6.2. Verhalten des Kokes unter Hochofensimulationsbedingungen	303
6.2.1. Koksreaktivität	303
6.2.1.1. Test-Szenarien	303
6.2.1.2. Ergebnisse und Diskussion	305
6.2.2. Einfluss von Rückständen der Einblasstoffe auf die Koksreaktivität	311
6.2.2.1. Laborversuche und Ergebnisse	312
6.2.2.2. Diskussion	320
6.3. Einfluss von Brechkoks auf den Hochofenprozess	321
6.3.1. Durchgasung im Schacht	321
6.3.1.1. Theoretische Analyse	321
6.3.1.2. Experimente	324
6.3.2. Reduktionsverhalten von Sinter und Pellets	329
6.3.2.1. Versuchsanlagen und –materialien	329
6.3.2.2. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Sinter	333
6.3.2.2.1. Isotherme Reduktion	333
6.3.2.2.2. Nicht-isotherme Reduktion	340
6.3.2.3. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Pellets	345
6.3.2.3.1. Isotherme Reduktion	345
6.3.2.3.2. Nicht-isotherme Reduktion	353
6.3.2.4. Vergleich von Sinter und Pellets	356
6.4. Kohle und Halbkoks im Corex®/Finex®-Prozess	359
6.4.1. Einsatzstoffe	360
6.4.2. Thermogravimetrische Untersuchungen	360
6.4.3. Pilotuntersuchungen zum Verhalten von Halbkoks	363

7. Selbstreduzierende Agglomerate und Komposite

7.1. Selbstreduzierende Pellets (SRP) für die Direktreduktion	368
7.1.1. Versuchsmaterialien	368
7.1.2. Versuchsdurchführung	370
7.1.3. Diskussion der Ergebnisse	370
7.1.3.1. Vergleich des Verhaltens von hämatitischen Pellets mit verschiedenen Reduktionsmitteln	371
7.1.3.2. Vergleich des Verhaltens von magnetitischen Pellets mit verschiedenen Reduktionsmitteln	377
7.1.4. Gesamtanalyse	381
7.1.4.1. Volumenänderung	381
7.1.4.2. Reduktionsgrad	383
7.2. Selbstreduzierende Briketts für die Herstellung von Hochmanganstählen	386
7.2.1. Briketttypen und deren Herstellung	387
7.2.2. Brikettreduktion	389
7.3. Selbstreduzierende Pellets und Komposite für Hochöfen	395
7.3.1. SRP für den Mini-Hochofen	397
7.3.2. Aufkohlungsverhalten von Eisenoxid-Kohlenstoff- Kompositen	401
7.4. Schlussfolgerung zum Einsatz von selbstreduzierenden Agglomerate und Komposite	405

8. Sticking und Plating während der Direktreduktion von Eisenerzen

8.1. Sticking-und Plating-Phänomene bei der Reduktion von Eisenerzen	408
8.1.1. Sticking	408
8.1.2. Ansätze und Plating	410
8.2. Experimentelle Untersuchungen zur Bildung von Sticking und Plating	412
8.2.1. Reduktion von Ilmenit mit H ₂ und CO im Muffelofen	412
8.2.1.1. Materialien, Apparatur und Versuchsdurchführung	412
8.2.1.2. Ergebnisse und Diskussion	413

8.2.2. Reduktion von Eisenerz mit CO im dynamischen Reduktionsofen	417
8.2.2.1. Apparatur, Versuchsdurchführung und Materialien	418
8.2.2.2. Eisenausscheidung bei der Reduktion mit CO	422
8.2.2.3. Plating von Stählen bei der Eisenerzreduktion mit CO	426
9. Ausblick -Eisenmetallurgie	431