

Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Can Yilmaz
aus Clausthal-Zellerfeld

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
02.03.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	7
2.1	Stand der Technik der Eisen- und Stahlherstellung	7
2.2	Der Hochofenprozess	10
2.2.1	Prozessbeschreibung und Stand der Technik	10
2.2.2	Schüttgutstruktur und Wärmeübertragung	14
2.2.3	Reduktion der Eisenoxide	18
2.2.4	Weitere Vorgänge im Hochofen	23
2.2.5	Eingesetzte Reduktionsmittel	27
2.2.6	Prozessmodelle des Hochofens	30
2.3	Direktreduktionsprozesse	37
2.3.1	Stand der Technik	37
2.3.2	Einsatz von direkt reduziertem Eisen bei der Eisen- und Stahlherstellung	40
2.4	Die Wasserelektrolyse	43
3	Methoden der Modellierung und Simulation	47
3.1	Prozessmodellierung	47
3.1.1	Verwendete Software	47
3.1.2	Berechnung chemischer Gleichgewichte	48
3.1.3	Modellbeschreibung	52
3.2	Parametrierung und Validierung	59
3.2.1	Validierung anhand von Betriebsdaten	62
3.2.2	Vergleich mit Literaturdaten: Adiabate Flammentemperatur	67
3.3	Simulation	68
3.3.1	Vorgehensweise und Annahmen	68
3.3.2	Sensitivitätsanalyse	72

3.3.3	Vergleich mit Betriebsdaten aus der Literatur	78
3.3.4	Betrachtete Arten von direkt reduziertem Eisen	81
3.3.5	Bewertung der Ergebnisse	86
4	Simulation und Analyse des Einsatzes von Wasserstoff als Er-	
	satzreduktionsmittel	91
4.1	Einsatz in der Formenebene des Hochofens	91
4.1.1	Betrieb mit Wasserstoff und Koks	91
4.1.2	Einfluss der adiabaten Flammentemperatur	99
4.1.3	Betrieb mit Wasserstoff, Koks und Blaskohle	102
4.2	Einsatz in der Formenebene unter angepassten Betriebsbedingungen	105
4.3	Einsatz im Schacht des Hochofens	111
4.4	Integrierte energetische Betrachtungen im Hüttenverbund	115
4.4.1	Wasserstoff in der Formenebene	115
4.4.2	Wasserstoff in der Formenebene unter angepassten Betriebsbedin-	
	gungen	117
5	Simulation und Analyse des Einsatzes von direkt reduziertem	
	Eisen im Hochofen	121
5.1	CO ₂ -Emissionen der Produktion von direkt reduziertem Eisen . . .	121
5.2	Vergleich von Simulationsergebnissen mit Literaturdaten	123
5.3	Einsatz im Hochofen mit variabler Blaskohlemenge	129
5.4	Integrierte energetische Betrachtungen im Hüttenverbund	136
6	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	141
A	Modellierung und Simulation	149
A.1	Modellbeschreibung	149
A.2	Parametrierung, Validierung und Simulation	150
	Abkürzungen und Symbole	I
	Abbildungsverzeichnis	X
	Tabellenverzeichnis	XII
	Literaturverzeichnis	XIII