

(12)

# PATENTCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1066/92

(51) Int.Cl.<sup>6</sup> : **C21B 13/00**  
C21B 13/14

(22) Anmeldetag: 22. 5.1992

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 2.1997

(45) Ausgabetag: 25. 9.1997

(56) Entgegenhaltungen:

DE 2526737A1 US 3684482A US 5082251A

(73) Patentinhaber:

VOEST-ALPINE INDUSTRIEANLAGENBAU GMBH  
A-4020 LINZ, OBERÖSTERREICH (AT).  
BRIFER INTERNATIONAL LTD.  
BRIDGETOWN (BB).

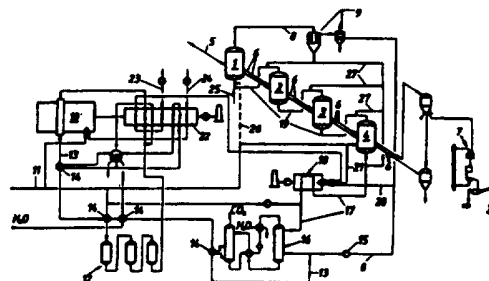
(72) Erfinder:

CZERMAK KARL DIPL.ING.  
ENNS, OBERÖSTERREICH (AT).  
MILTONIS KONSTANTIN DIPL.ING.  
ST. GEORGEN A/D STIEFLING, STEIERMARK (AT).  
SCHENK JOHANNES DIPL.ING. DR.  
LINZ, OBERÖSTERREICH (AT).  
ZELLER SIEGFRIED DIPL.ING.  
LEONING, OBERÖSTERREICH (AT).  
WHIPP ROY HUBERT  
WINDERMERE (US).

(54) VERFAHREN UND ANLAGE ZUR DIREKTREDUKTION VON TEILCHENFÖRMIGEM EISENOXIDHÄLTIGEM MATERIAL

(57) Bei einem Verfahren zur Direktreduktion von teilchenförmigem eisenoxidhaltigem Material im Wirbelschichtverfahren wird reformiertes Gas mit bei der Direktreduktion des eisenoxidhaltigen Materials entstehendem Topgas vermischt und als Reduktionsgas einer Wirbelschicht-Reduktionszone zugeführt.

Zur Senkung des Energiebedarfes und Ausschöpfung des Potentials des Reduktionsgases werden sowohl das Topgas als auch das reformierte Gas einer CO<sub>2</sub>-Wäsche unterzogen und wird das durch Mischen von Topgas und reformiertem Gas gebildete Reduktionsgas auf einen H<sub>2</sub>-Gehalt in einem Bereich zwischen 45 und 75 %, vorzugsweise zwischen 50 und 65 %, und einen CO-Gehalt in einem Bereich zwischen 8 und 35 %, vorzugsweise zwischen 10 und 20 %, eingestellt.



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Direktreduktion von teilchenförmigem eisenoxidhaltigem Material im Wirbelschichtverfahren, wobei reformiertes Gas mit bei der Direktreduktion des eisenoxidhaltigen Materials entstehendem Topgas vermischt und als Reduktionsgas einer Wirbelschicht-Reduktionszone zugeführt wird, sowie eine Anlage zur Durchführung des Verfahrens.

- 5 Ein Verfahren dieser Art ist aus der US-A - 5,082,251 bekannt. Hierbei wird eisenreiches Feinerz in einem System von in Serie angeordneten Wirbelschichtreaktoren mit Hilfe von Reduktionsgas unter erhöhtem Druck reduziert. Das so erzeugte Eisenpulver wird anschließend einer Heiß- oder Kaltbrikettierung unterworfen.

- Das Reduktionsgas wird durch katalytische Reformierung von entschwefeltem und vorgewärmtem Erdgas mit überhitztem Wasserdampf in einem konventionellen Reformierofen erzeugt. Das reformierte Gas wird anschließend auf ca. 425 °C in einem Wärmetauscher abgekühlt. Anschließend wird durch CO-Konvertierung mit Hilfe eines Eisenoxid-Katalysators der H<sub>2</sub>-Anteil im Reduktionsgas nach folgender Gleichung erhöht:

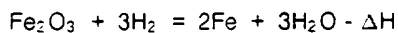


Anschließend wird das dabei entstehende sowie das vom Reformierofen stammende CO<sub>2</sub> in einem CO<sub>2</sub>-Wäscher entfernt, so daß sich das Reduktionsgas aus über 90 % H<sub>2</sub>, einem sehr geringen Anteil CO sowie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> zusammensetzt.

- 20 Dieses Gas wird mit dem nur teilweise verbrauchten Reduktionsgas (Topgas) vermischt, auf 850 °C erhitzt und reduziert in drei Stufen (drei Reaktoren) im Gegenstrom das Feinerz.

Der Fluß des Erzes beginnt mit einer Trocknung und einer anschließenden Siebung. Sodann gelangt das Erz in einen Vorwärmereaktor, in dem Erdgas verbrannt wird. In drei folgenden Reaktoren wird das Feinerz unter erhöhtem Druck reduziert.

- 25 Bei diesem Verfahren weist das Reduktionsgas einen sehr hohen Anteil an H<sub>2</sub> auf, so daß die Reduktion der Feinerze hier ausschließlich über die Reaktion:



- 30 erfolgt, die stark endotherm ist.

Diese stark endotherme Reaktion würde eine wesentliche Temperaturabsenkung in den Reaktoren zur Folge haben. Um dies zu verhindern, ist man bei dem bekannten Verfahren gezwungen, die spezifische Reduktionsgasmenge pro t Eisenschwamm beträchtlich über die thermodynamisch erforderliche Mindestgasmenge zu erhöhen, so daß die Reaktionstemperaturen in den Reaktoren über 700 °C liegen.

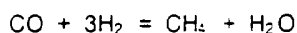
- 35 Die Erfindung bezweckt die Vermeidung dieser Nachteile und Schwierigkeiten und stellt sich die Aufgabe, das chemische Potential des Reduktionsgases zur Senkung des Energiebedarfes heranzuziehen. Insbesondere ist die Aufgabe gestellt, die Betriebskosten, insbesondere die Energiekosten, beträchtlich zu reduzieren, beispielsweise um mehr als 30 %.

- Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß sowohl das Topgas als auch das reformierte Gas einer CO<sub>2</sub>-Wäsche unterzogen werden und das durch Mischen von Topgas und reformiertem Gas gebildete Reduktionsgas auf einen H<sub>2</sub>-Gehalt in einem Bereich zwischen 45 und 75 %, vorzugsweise zwischen 50 und 65 %, und einen CO-Gehalt in einem Bereich zwischen 8 und 20 % eingestellt wird.

Erfindungsgemäß erfolgt die Reduktion des Feinerzes nicht ausschließlich über die oben zum Stand der Technik beschriebene stark endotherme Reaktion mit H<sub>2</sub>, sondern zusätzlich über die Reaktion

- 45 
$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2 + \Delta H,$$

die stark exotherm ist. Das sich hierbei bildende CO<sub>2</sub> führt zu keinem Nachteil, da es in einem CO<sub>2</sub>-Wäscher, durch den das Topgas durchgeleitet wird, ausgewaschen wird. Die Reaktion von CO mit H<sub>2</sub> nach der Gleichung



- ist beim erfindungsgemäßen Verfahren nicht nachteilig, da das Methan nur in einer sehr geringen Konzentration gebildet wird, die keine Nachteile mit sich bringt.

Die US-A - 3,684,482 betrifft ein Verfahren zur Reduktion von Eisenerz in einem Wirbelschichtreaktor mit mehreren Betten. In der ersten Reduktionsstufe - dort „topstage“ genannt - wird eine Temperatur von etwa 430 °C bis 650 °C zur Begünstigung der Wassergasreaktion  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$  zum

zusätzlichen Vorsehen von  $H_2$  und zur Verringerung des CO-Anteiles verwendet; dementsprechend kann die erfindungsgemäß verwendete exotherme Reduktion von Eisenoxid unter Verwendung von CO nach der Gleichung  $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2 + \Delta H$  nicht erfolgen. Gemäß der US-A - 3,684,482 wird die (endotherme) Reduktionsreaktion gemäß  $Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O$  forciert und damit ein zusätzlicher  
 5 Energieaufwand in Kauf genommen. Bei Verwendung eines Gases mit hohem CO-Gehalt gemäß der US-A - 3,684,482 kommt es aufgrund des Phänomens des sogenannten „metal dustings“ zur Zerstörung des Metalls der Leitungsrohre.

Die DE-A - 25 26 737 betrifft ein Verfahren zur Reduktion von Eisenerz, wobei zusätzlich zu einem vom erfindungsgemäßen Verfahren unterschiedlichen Reaktionsablauf noch hinzukommt, daß einerseits ein  
 10 Gemisch aus teilverbranntem Methan (anstelle von Reformgas) und andererseits von  $CO_2$  befreites Topgas als Reduktionsgas verwendet wird. Gemäß der DE-A - 25 26 737 wird ein Gemisch aus teilverbranntem Methan und Topgas in die oberen Betten eingeleitet, wo sich das Erz in einem niedrig reduzierten Zustand befindet und die vorhandenen Mengen an  $CO_2$  und  $H_2O$  den Fortschritt des Reduktionsverfahrens nicht behindern. Hier wird die endotherme Reduktionsreaktion unter Verwendung von  $H_2$  forciert und damit ein  
 15 zusätzlicher Energieaufwand in Kauf genommen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform erfolgt erfindungsgemäß das Einstellen des  $H_2$ - und des CO-Gehaltes im Reduktionsgas durch die Betriebsweise eines Reformers, wobei gegenüber herkömmlichen Reformer-Betriebsweisen ein reduziertes Dampf/Erdgas-Verhältnis, das vorzugsweise zwischen 2,5 und 3,5 liegt, eingehalten wird. Hierdurch gelingt es, die Temperatur in der Reduktionszone im wesentlichen  
 20 konstant zu halten.

Vorzugsweise wird das Reduktionsgas auf einen  $CH_4$ -Gehalt, der zwischen 8 und 35 % liegt, eingestellt.

Zur Minimierung des Energiebedarfes wird gemäß einer bevorzugten Ausführungsform die Direktreduktion in mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschicht-Reduktionszonen durchgeführt, wobei das Reduktionsgas im Gegenstrom zu dem teilchenförmigen eisenoxidhaltigen Material von Reduktionszone  
 25 zu Reduktionszone geführt wird und zumindest in der für das Reduktionsgas letzten Wirbelschicht-Reduktionszone einer Teilverbrennung durch Sauerstoffzufuhr unterzogen wird.

Um in allen Wirbelschicht-Reduktionszonen eine etwa gleich hohe konstante Temperatur einzustellen, wird vorteilhaft frisch gebildetes Reduktionsgas zum Teil den der in Reduktionsgas-Strömungsrichtung ersten Wirbelschicht-Reduktionszone folgenden einzelnen Wirbelschicht-Reduktionszonen zusätzlich jeweils  
 30 direkt zugeführt, vorzugsweise in einer Menge von 5 bis 15 %.

Eine Anlage zur Durchführung des Verfahrens mit mindestens einem Wirbelschichtreaktor zur Aufnahme des eisenoxidhaltigen Materials, einer Reduktionsgas-Zuleitung zu diesem Wirbelschichtreaktor und einer das sich bei der Reduktion bildende Topgas vom Wirbelschichtreaktor abführenden Topgas-Ableitung, mit einem Reformer, einer vom Reformer ausgehenden Reformgasleitung, die mit der Topgaslei-  
 35 tung zusammenmündet, wobei das aus reformiertem Gas und Topgas gebildete Reduktionsgas über die Reduktionsgas-Zuleitung in den Wirbelschichtreaktor gelangt, und mit einem  $CO_2$ -Wäscher, ist dadurch gekennzeichnet, daß sowohl die Reformgasleitung als auch die Topgas-Ableitung in den  $CO_2$ -Wäscher münden und die Reduktionsgas-Zuleitung vom  $CO_2$ -Wäscher zum Wirbelschichtreaktor führt.

Eine weitere Minimierung des Energiebedarfes läßt sich nach einer bevorzugten Ausführungsform dadurch erzielen, daß eine Mehrzahl von Wirbelschichtreaktoren hintereinander in Serie geschaltet sind, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor über Förderleitungen in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor über Verbindungsleitungen in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, und wobei zumindest in den in Reduktionsgas-Strömungsrichtung letztgeordneten Wirbelschichtreaktor zusätzlich zu der das aus dem vorgeordneten  
 45 Wirbelschichtreaktor austretende Reduktionsgas zuführenden Leitung eine Sauerstoff-Zuführungsleitung und gegebenenfalls eine Erdgas-Zuführungsleitung münden.

Eine Konstanzhaltung der Temperaturen in sämtlichen Wirbelschichtreaktoren in gleicher Höhe wird nach einer weiteren Ausführungsform dadurch erzielt, daß eine Mehrzahl von Wirbelschichtreaktoren hintereinander in Serie geschaltet sind, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor zu  
 50 Wirbelschichtreaktor über Förderleitungen in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor über Verbindungsleitungen in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, und wobei die Wirbelschichtreaktoren hinsichtlich der Reduktionsgasführung neben der Serienschaltung in bezug auf eine zusätzliche Reduktionsgaszuleitung in Parallelschaltung angeordnet sind.

Vorzugsweise sind vier Wirbelschicht-Reaktoren hintereinander in Serie geschaltet vorgesehen.

55 Die Erfindung ist nachfolgend anhand der Zeichnung, die ein Verfahrensschema nach einer bevorzugten Ausführungsform zeigt, näher erläutert.

Die erfindungsgemäße Anlage weist vier in Serie hintereinander geschaltete Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4 auf, wobei eisenoxidhaltiges Material, wie Feinerz, über eine Erzzuleitung 5 dem ersten Wirbelschicht-

treaktor 1 und von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor über Förderleitungen 6 geleitet und das fertig reduzierte Material (Eisenschwamm) in einer Brikettieranlage 7 heiß- oder kaltbrikettiert wird. Erforderlichenfalls wird das reduzierte Eisen vor Reoxidation während der Brikettierung durch ein nicht dargestelltes Inertgas-System geschützt.

5 Vor Einleitung des Feinerzes in den ersten Wirbelschichtreaktor wird es einer Erzvorbereitung, wie einer Trocknung und einem Sieben, unterzogen, die nicht näher dargestellt ist.

Reduktionsgas wird im Gegenstrom zum Erzdurchfluß von Wirbelschichtreaktor 4 zu Wirbelschichtreaktor 3 bis 1 geführt und als Topgas über eine Topgas-Ableitung 8 aus dem in Gasströmungsrichtung letzten Wirbelschichtreaktor 1 abgeleitet und in einem Naßwäscher 9 gekühlt und gewaschen. Die Herstellung des  
10 Reduktionsgases erfolgt durch Reformieren von über die Leitung 11 zugeführtem und in einer Entschwefelungsanlage 12 entschwefeltem Erdgas in einem Reformer 10. Das aus Erdgas und Dampf gebildete reformierte Gas besteht im wesentlichen aus  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$  und  $CO_2$ . Dieses reformierte Gas wird über die Reformgasleitung 13 mehreren Wärmetauschern 14 zugeleitet, in denen es auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird, wodurch Wasser aus dem Gas auskondensiert wird.

15 Die Reformgasleitung 13 mündet in die Topgas-Ableitung 8, nachdem das Topgas mittels eines Kompressors 15 verdichtet wurde. Das so sich bildende Mischgas wird durch einen  $CO_2$ -Wäscher 16 hindurchgeschickt und von  $CO_2$  befreit, und es steht nunmehr als Reduktionsgas zur Verfügung. Dieses Reduktionsgas wird über die Reduktionsgas-Zuleitung 17 in einem dem  $CO_2$ -Wäscher 16 nachgeordneten Gaserhitzer 18 auf eine Reduktionsgas-Temperatur von etwa  $800^\circ C$  erhitzt und dem in Gas-Durchflußrichtung  
20 ersten Wirbelschichtreaktor 4 zugeführt, wo es mit den Feinerzen zur Erzeugung von direkt reduziertem Eisen reagiert. Die Wirbelschichtreaktoren 4 bis 1 sind in Serie geschaltet; das Reduktionsgas gelangt über die Verbindungsleitungen 19 von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor.

Ein Teil des Topgases wird aus dem Gas-Kreislauf 8, 17, 19 ausgeschleust, um eine Anreicherung von Inertgasen, wie  $N_2$ , zu vermeiden. Das ausgeschleuste Topgas wird über eine Zweigleitung 20 dem  
25 Gaserhitzer 18 zur Erwärmung des Reduktionsgases zugeführt und dort verbrannt. Eventuell fehlende Energie wird durch Erdgas, welches über die Zuleitung 21 zugeführt wird, ergänzt.

Die fühlbare Wärme des aus dem Reformer 10 austretenden reformierten Gases sowie der Reformer-rauchgase wird in einem Rekuperator 22 genutzt, um das Erdgas nach Durchlauf durch die Entschwefelungsanlage 12 vorzuwärmen, den für die Reformierung benötigten Dampf zu erzeugen sowie die dem  
30 Gaserhitzer über die Leitung zugeführte Verbrennungsluft sowie gegebenenfalls auch das Reduktionsgas vorzuwärmen. Die dem Reformer über die Leitung 24 zugeführte Verbrennungsluft wird ebenfalls vorgewärmt.

Um eine Temperaturabsenkung im in Erzdurchlaufrichtung ersten Wirbelschichtreaktor 1 zu vermeiden, kann es vorteilhaft sein, einen Teil des aus dem zweiten Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases im ersten Wirbelschichtreaktor zu verbrennen, zu welchem Zweck in den ersten Wirbelschichtreaktor  
35 eine Sauerstoff-Zuführungsleitung 25 und gegebenenfalls eine Erdgas-Zuführungsleitung 26 münden.

Um in sämtlichen Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4 die Reaktionstemperatur auf gleicher Höhe konstant zu halten und hierdurch eine weitere Senkung des Energiebedarfes zu erzielen, wird heißes und frisches Reduktionsgas den Wirbelschichtreaktoren 1 bis 3, die dem in Reduktionsgas-Strömungsrichtung ersten  
40 Wirbelschichtreaktor 4 nachgeordnet sind, über Zweigleitungen 27 direkt zugeführt, u.zw. in einer Menge von etwa 10 % je Wirbelschichtreaktor 1, 2 und 3. Die Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4 sind somit hinsichtlich der Reduktionsgasführung nicht nur in Serie, sondern, was die Zuführung eines geringen Teiles des Reduktionsgases betrifft, auch Parallel geschaltet, wogegen die Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4, was die Ab- bzw. Weiterleitung des Reduktionsgases betrifft, beim dargestellten Ausführungsbeispiel ausschließlich in  
45 Serie geschaltet sind.

Durch Verwendung von vier Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4 zur Durchführung der Direktreduktion (unter Vermeidung eines Vorwärmreaktors) kommt es gegenüber dem Stand der Technik zu einer weiteren Senkung des Energiebedarfes und zu einer Minimierung von Staubverlusten.

50 Beispiel:

In einer der Zeichnung entsprechenden Anlage mit einer stündlichen Leistung von 70 t/h heißbrikettiertem Eisen wurden 100 t/h Feinerz, 12.200  $Nm^3/h$  Erdgas mit 43.300  $Nm^3/h$  Dampf zu 76.600  $Nm^3/h$  reformiertem Gas umgesetzt. Die Reformierungstemperatur betrug  $830^\circ C$ , der Druck 18,5 bar. Die für die  
55 Unterfeuerung des Reformers benötigte Erdgasmenge betrug 6.200  $Nm^3/h$ .

Die Analyse der betreffenden Gase und des Feinerzes lautete:

# AT 402 937 B

	Erdgas [%]	Reformiertes Gas [%]	Feinerz [%]
CH <sub>4</sub>	83,4	2,30	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 93,94
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	8,6	--	Gangart 1,84
CO <sub>2</sub>	8,0	10,70	Rest: Glühverluste
CO	--	12,90	
H <sub>2</sub>	--	68,90	
O <sub>2</sub>	--	--	
N <sub>2</sub>	--	2,00	
H <sub>2</sub> S	20 ppm	--	
H <sub>2</sub> O	--	3,20	

Das kalte reformierte Gas, 50.000 Nm<sup>3</sup>/h, wurde mit 145.000 Nm<sup>3</sup>/h rückgeführtem Topgas gemischt und in die CO<sub>2</sub>-Wäsche geführt, wo es vom CO<sub>2</sub> befreit wurde. Das Gas, 182.000 Nm<sup>3</sup>/h, hatte folgende Analyse:

	[%]	bevorzugte Bereiche [%]	
		min.	max.
CH <sub>4</sub>	16,29	8,00	- 35,00
CO <sub>2</sub>	0,10	0,10	- 3,50
CO	9,23	8,00	- 35,00
H <sub>2</sub>	57,92	45,00	- 75,00
H <sub>2</sub> O	1,52	1,50	- 5,00
N <sub>2</sub>	14,94	5,00	- 35,00

Dieses Gas wurde in einem Gaserhitzer auf 800 °C vorgewärmt. Dafür wurden ca. 5.500 Nm<sup>3</sup>/h Topgas und 4.600 Nm<sup>3</sup>/h Erdgas verbraucht.

Die Analyse des Topgases lautete:

	[%]
CH <sub>4</sub>	17,00
CO <sub>2</sub>	4,40
CO	4,90
H <sub>2</sub>	39,90
H <sub>2</sub> O	18,90
N <sub>2</sub>	14,90

Das heißbrikettierte Eisen wies einen Metallisierungsgrad ( $Fe_{met}/Fe_{ges}$ ) von 92 % auf.

## Patentansprüche

- Verfahren zur Direktreduktion von teilchenförmigem eisenoxidhaltigem Material im Wirbelschichtverfahren, wobei reformiertes Gas mit bei der Direktreduktion des eisenoxidhaltigen Materials entstehendem Topgas vermischt und als Reduktionsgas einer Wirbelschicht-Reduktionszone zugeführt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß sowohl das Topgas als auch das reformierte Gas einer CO<sub>2</sub>-Wäsche unterzogen werden und das durch Mischen von Topgas und reformiertem Gas gebildete Reduktionsgas auf einen H<sub>2</sub>-Gehalt in einem Bereich zwischen 45 und 75 %, vorzugsweise zwischen 50 und 65 %, und einen CO-Gehalt in einem Bereich zwischen 8 und 20 % eingestellt wird.
- Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Einstellen des H<sub>2</sub>- und des CO-Gehaltes im Reduktionsgas durch die Betriebsweise eines Reformers (10) erfolgt, wobei gegenüber herkömmlichen Reformer-Betriebsweisen ein reduziertes Dampf:Erdgas-Verhältnis, das vorzugsweise zwischen 2,5 und 3,5 liegt, eingehalten wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Reduktionsgas auf einen  $\text{CH}_4$ -Gehalt, der zwischen 8 und 35 % liegt, eingestellt wird.
- 5 4. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Direktreduktion in mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschicht-Reduktionszonen durchgeführt wird, wobei das Reduktionsgas im Gegenstrom zu dem teilchenförmigen eisenoxidhaltigen Material von Reduktionszone zu Reduktionszone geführt wird und zumindest in der für das Reduktionsgas letzten Wirbelschicht-Reduktionszone einer Teilverbrennung durch Sauerstoffzufuhr unterzogen wird.
- 10 5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß frisch gebildetes Reduktionsgas zum Teil den der in Reduktionsgas-Strömungsrichtung ersten Wirbelschicht-Reduktionszone folgenden einzelnen Wirbelschicht-Reduktionszonen zusätzlich jeweils direkt zugeführt wird, vorzugsweise in einer Menge von 5 bis 15 %.
- 15 6. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, mit mindestens einem Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) zur Aufnahme des eisenoxidhaltigen Materials, einer Reduktionsgas-Zuleitung (17) zu diesem Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) und einer das sich bei der Reduktion bildende Topgas vom Wirbelschichtreaktor (1) abführenden Topgas-Ableitung (8), mit einem Reformer (10), einer vom Reformer (10) ausgehenden Reformgasleitung (13), die mit der Topgasleitung (8) zusammenmündet, wobei das aus reformiertem Gas und Topgas gebildete Reduktionsgas über die Reduktionsgas-Zuleitung (17) in den Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) gelangt, und mit einem  $\text{CO}_2$ -Wäscher (16), **dadurch gekennzeichnet**, daß sowohl die Reformgasleitung (13) als auch die Topgas-Ableitung (8) in den  $\text{CO}_2$ -Wäscher (16) münden und die Reduktionsgas-Zuleitung (17) vom  $\text{CO}_2$ -Wäscher (16) zum Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) führt.
- 20 7. Anlage nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Mehrzahl von Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) hintereinander in Serie geschaltet sind, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) zu Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) zu Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, und wobei zumindest in den in Reduktionsgas-Strömungsrichtung letztgeordneten Wirbelschichtreaktor (1) zusätzlich zu der das aus dem vorgeordneten Wirbelschichtreaktor austretende Reduktionsgas zuführenden Leitung (19) eine Sauerstoff-Zuführungsleitung (25) und gegebenenfalls eine Erdgas-Zuführungsleitung (26) münden.
- 25 8. Anlage nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Mehrzahl von Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) hintereinander in Serie geschaltet sind, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) zu Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) zu Wirbelschichtreaktor (1 bis 4) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, und wobei die Wirbelschichtreaktoren (1 bis 3) hinsichtlich der Reduktionsgasführung neben der Serienschaltung in bezug auf eine zusätzliche Reduktionsgaszuleitung in Parallelschaltung angeordnet sind.
- 30 9. Anlage nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß vier Wirbelschicht-Reaktoren hintereinander in Serie geschaltet vorgesehen sind.
- 35 40 45

Hiezu 1 Blatt Zeichnungen

50

55

