

(19)



REPUBLIK  
ÖSTERREICH  
Patentamt

(11) Nummer:

**AT 406 271 B**

(12)

**PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 1382/97  
(22) Anmeldetag: 18.08.1997  
(42) Beginn der Patendauer: 15.08.1999  
(45) Ausgabetag: 27.03.2000

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: **C21B 13/14**

(30) Priorität:

(73) Patentinhaber:

VOEST-ALPINE INDUSTRIEANLAGENBAU  
GMBH  
A-4020 LINZ, OBERÖSTERREICH (AT).

(56) Entgegenhaltungen:

(72) Erfinder:

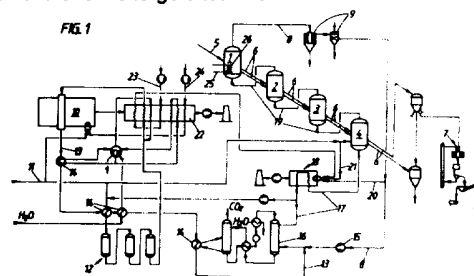
ZELLER SIEGFRIED DIPL.ING.  
LEONDING, OBERÖSTERREICH (AT).  
MILIONIS KONSTANTIN DIPL.ING.  
ST. GEORGEN A/D STIEFLING,  
STEIERMARK (AT).  
REIDETSCHLÄGER JOHANN DIPL.ING. DR.  
LINZ, OBERÖSTERREICH (AT).  
KEPLINGER LEOPOLD WERNER DIPL.  
ING. DR.  
LEONDING, OBERÖSTERREICH (AT).

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

(57) Bei einem Verfahren zur Direktreduktion von teilchenförmigem eisenoxidhaltigem Material im Wirbelschichtverfahren wird Synthesegas als Reduktionsgas in mehrere für das Reduktionsgas in Serie hintereinander geschaltete Wirbelschichtzonen eingeleitet und das Reduktionsgas im Gegenstrom zu dem teilchenförmigen eisenoxidhaltigen Material von Wirbelschichtzone zu Wirbelschichtzone geführt.

Zur Absenkung der Betriebskosten, insbesondere des Energiebedarfes, wird in der ersten Wirbelschichtzone eine Temperatur des eisenoxidhaltigen Materials entweder unter 400 C, vorzugsweise unter 350 C, oder über 580 C, vorzugsweise bei etwa 650 C, oder eine Temperatur im Bereich von 400 bis 580 C eingestellt, wobei bei einer Temperatureinstellung auf unter 400 C der Temperaturbereich zwischen 400 C und 580 C in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials der ersten Wirbelschichtzone nachgeordneten Wirbelschichtzone innerhalb einer Zeitspanne von 10 Minuten, vorzugsweise innerhalb von 5 Minuten, durchschritten wird und wobei bei einer Temperatureinstellung auf über

580 C der Temperaturbereich zwischen 400 C und 580 C innerhalb einer Zeitspanne von maximal 10 Minuten, vorzugsweise 5 Minuten, durchschritten wird, und wobei weiters bei einer Temperatureinstellung im Bereich von 400 C bis 580 C das eisenoxidhaltige Material in diesem Temperaturbereich maximal 10 Minuten, vorzugsweise 5 Minuten verweilt und unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur in die nächstfolgende Wirbelschichtzone weitergeleitet wird.

**AT 406 271 B**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Direktreduktion von teilchenförmigem eisenoxidhaltigem Material im Wirbelschichtverfahren, wobei Synthesegas, wie reformiertes Erdgas, als Reduktionsgas in mehrere für das Reduktionsgas in Serie hintereinander geschaltete Wirbelschichtzonen eingeleitet wird und im Gegenstrom zu dem teilchenförmigen eisenoxidhaltigen Material von Wirbelschichtzone zu Wirbelschichtzone geführt wird, und wobei in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtzone eine Erhitzung des eisenoxidhaltigen Materials und in der bzw. den weiteren Wirbelschichtzone(n) die Direktreduktion durchgeführt wird, sowie eine Anlage zur Durchführung des Verfahrens.

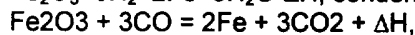
Ein Verfahren dieser Art ist aus der US-5,082,251 A, WO-92/02458 A1 und der EP-0 571 358 A1 bekannt. Gemäß der US-5,082,251 A wird eisenreiches Feinerz in einem System von in Serie angeordneten Wirbelschichtreaktoren mit Hilfe von Reduktionsgas unter erhöhtem Druck reduziert. Das so erzeugte Eisenpulver 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 in einem Wärmetauscher gekühlt und nachfolgend wird durch CO-Konvertierung mit Hilfe eines Eisenoxid-Katalysators der H<sub>2</sub>-Anteil im Reduktionsgas erhöht. Anschließend wird das dabei entstehende sowie das vom Reformier stammende CO<sub>2</sub> in einem CO<sub>2</sub>-Wäscher entfernt.

Dieses Gas wird mit dem nur teilweise verbrauchten Reduktionsgas (Topgas) vermischt, erhitzt und in drei Stufen (drei Wirbelschichtreaktoren) im Gegenstrom das Feinerz reduziert.

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

Aus der EP-0 571 358 A1 ist es bekannt, die Reduktion von Feinerz nicht ausschließlich über die stark endotherme Reaktion mit H<sub>2</sub> gemäß



die exotherm ist, durchzuführen. Hierdurch gelingt es, die Betriebskosten, insbesondere die Energiekosten, beträchtlich zu senken.

Gemäß dem Stand der Technik kommt es bei der Direktreduktion aufgrund der Kinetik der bekannten Verfahren zur Magnetitbildung, u.zw. in einer stetig von außen nach innen wachsenden Schicht, die sich auf jedem Partikel bzw. Korn des eisenoxidhaltigen Materials bildet. Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass die Magnetitbildung für die Direktreduktion mit Reduktionsgas hemmend ist. So gelingt es nur mehr mit erhöhtem Aufwand, d.h. Erhöhung des Reduktionsgasverbrauches, eine mehr oder weniger vollständige Reduktion des eingesetzten eisenoxidhaltigen Materials zu erzielen. Insbesondere ist es hierzu notwendig, auch in den erstangeordneten Wirbelschichtzonen Reduktionsgas mit hohem Reduktionspotential zur Verfügung zu stellen.

Die Erfindung bezweckt die Vermeidung dieser Nachteile und Schwierigkeiten und stellt sich die Aufgabe, ein Verfahren der eingangs beschriebenen Art dahingehend weiterzubilden, dass der Energiebedarf gesenkt wird, indem das chemische Potential des Reduktionsgases vollständig ausgenutzt wird. Insbesondere sollen die Betriebskosten beträchtlich gesenkt werden, indem das Reduktionsgas sowohl hinsichtlich seines Reduktionspotentials als auch hinsichtlich seiner fühlbaren Wärme optimal genutzt wird.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst,

- dass in der ersten Wirbelschichtzone eine Temperatur des eisenoxidhaltigen Materials entweder unter 400° C, vorzugsweise unter 350° C,
- oder über 580° C, vorzugsweise bei etwa 650° C,
- oder eine Temperatur im Bereich von 400 bis 580° C eingestellt wird,
- wobei bei einer Temperatureinstellung auf unter 400° C der Temperaturbereich zwischen 400° C und 580° C in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials der ersten Wirbelschichtzone nachgeordneten Wirbelschichtzone innerhalb einer Zeitspanne von 10 Minuten, vorzugsweise innerhalb von 5 Minuten, durchschritten wird, und
- wobei bei einer Temperatureinstellung auf über 580° C der Temperaturbereich zwischen 400° C und 580° C innerhalb einer Zeitspanne von maximal 10 Minuten, vorzugsweise 5 Minuten durchschritten wird, und
- wobei weiters bei einer Temperatureinstellung im Bereich von 400° C bis 580° C das eisenoxidhaltige Material in diesem Temperaturbereich maximal 10 Minuten, vorzugsweise 5

Minuten verweilt und unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur in die nächstfolgende Wirbelschichtzone weitergeleitet wird.

Durch diese Maßnahmen gelingt es, die Magnetitschichtenbildung wirkungsvoll zu vermeiden bzw. auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Die Ausbildung einer Magnetitschicht erfolgt nämlich sehr rasch, u.zw. umso schneller je näher die Temperatur des eisenoxidhaltigen Materials bei der Grenztemperatur von etwa 580°C liegt. Ein an der Oberfläche eines Partikels aus eisenoxidhaltigem Material bzw. eines Erzkornes ausgebildeter Magnetit ist dichter als das Erz selbst und erhöht somit den Diffusionswiderstand der Grenzfläche zwischen Reduktionsgas und Eisenerz. Dadurch wird die Reaktionsgeschwindigkeit verringert. Laut Baur- Glaessner- Diagramm geschieht diese Ausbildung einer dichten Magnetitschicht auf der Oberfläche eines Eisenerzkornes vorwiegend bis zu einer Temperatur des Eisenerzes von 580°C. Bei einer Temperatur des Eisenerzes unter 400°C ist wiederum die Magnetitusbildung verlangsamt und daher werden weniger rasch dichte Magnetitschichten ausgebildet.

Die Reaktionskinetik der Magnetitbildung wird durch die Zusammensetzung des Gases und des Feststoffes beeinflusst. Die Moleküle des Reduktionsgases müssen aus dem äußeren Gasstrom durch die adhärierende Gasgrenzschicht und durch die Makro- und Mikroporen zum Reaktionsort gelangen. Dort läuft der Sauerstoffabbau ab. Das oxidierte Gas gelangt auf dem gleichen Weg zurück. Das Erzkorn wird somit von außen nach innen reduziert. Dabei nimmt die Porosität zu, da der ausgebaute Sauerstoff Hohlräume hinterlässt und das ursprüngliche Volumen des Erzkornes kaum schrumpft. Die Reaktionsfront wandert von außen nach innen in das Erzkorn hinein. Die Konzentration des Reduktionsgases nimmt bei dichten Schichten von außen nach innen ab. Das Gas diffundiert zuerst von außen durch die bereits reduzierte Schale bis zur Reaktionsfront, wo es sich umsetzt und dann als Reaktionsprodukt zurückdiffundiert. Bei porösen Oberflächen läuft innerhalb der Reaktionsfront die Phasengrenzreaktion an den Wänden der Poren ab, während das Gas zugleich auch innerhalb diffundieren kann. Bei dichten Magnetitschichten an der Oberfläche des Erzkornes wird die Reaktionskinetik dadurch gehemmt, weil das Reduktionsgas an der Diffusion durch eben diese Schicht behindert wird und somit der Stoffaustausch des Reduktionsgases nicht wie bei porösen Erzkörnern erfolgen kann.

Die Grundidee der Erfindung ist darin zu sehen, den Übergang der Temperatur des eisenoxidhaltigen Materials beim Erhitzen von 400 auf 580°C in möglichst kurzer Zeit zu bewerkstelligen sowie ein Halten in diesem kritischen Temperaturbereich zu vermeiden. Bei raschem Durchschreiten dieses Temperaturbereiches ist die Magnetitschichtbildung äußerst gering. Allenfalls kommt es zur Bildung von Wüstit, der für die Reduktion keinen Nachteil aufweist. Hierdurch ergeben sich wesentlich verbesserte Reduktionsbedingungen für die in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials erste Wirbelschichtzone.

Vorteilhaft wird in jedem Fall unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur das eisenoxidhaltige Material der nachgeordneten Wirbelschichtzone überführt.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird der Temperaturbereich zwischen 400°C und 580°C unter Vermeidung einer Haltezeit durchschritten und beträgt der durchschnittliche Temperaturgradient innerhalb des Bereiches zwischen 400°C und 580°C mindestens 20°C/min, vorzugsweise 40°C/min.

Wird in dieser ersten Wirbelschichtzone lediglich eine Temperatur von unter 400°C eingestellt, wird der Temperaturbereich zwischen 400 und 580°C in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials zweiten Wirbelschichtzone durchlaufen, was dort mit wesentlich größerer Geschwindigkeit vor sich geht, als es unter Normalbedingungen in der ersten Wirbelschichtzone stattfinden könnte, da in der zweiten Wirbelschichtzone die Temperatur des Reduktionsgases noch wesentlich höher ist und weiters auch das Reduktionspotential höher ist. Letzteres behindert bzw. vermindert ebenfalls die Magnetitbildung. In diesem Fall erfolgt die rasche Durchschreitung des kritischen Temperaturbereiches in der zweiten Wirbelschichtzone ebenfalls in einer unterkritischen Zeitspanne.

Soll der kritische Temperaturbereich erst in der zweiten Wirbelschichtzone durchschritten werden, so stehen hierfür einige Varianten zur Verfügung:

So kann dies beispielsweise dadurch erreicht werden, dass das der ersten Wirbelschichtzone zugeführte Reduktionsgas vor Einleiten in die erste Wirbelschichtzone einer Abkühlung unterzogen wird.

Eine wirkungsvolle Temperatureinstellung auf unter 400°C in der ersten Wirbelschichtzone kann auch dadurch erzielt werden, dass das aus der ersten Wirbelschichtzone in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtzone austretende Reduktionsgas

nur zum Teil in die erste Wirbelschichtzone eingeleitet wird und das aus der ersten Wirbelschichtzone austretende Reduktionsgas zumindest teilweise in die erste Wirbelschichtzone rezirkuliert wird.

5 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform werden das eisenoxidhaltige Material und das Gas in der ersten Wirbelschichtzone indirekt gekühlt, vorzugsweise mittels Luft oder Wasser.

Es ist auch möglich, das eisenoxidhaltige Material und das Gas in der ersten Wirbelschichtzone direkt zu kühlen, vorzugsweise durch Eindüsen von Wasser und/oder Wasserdampf.

10 Nach einer besonders einfach durchzuführenden Variante wird ein Unterschreiten der kritischen Temperatur in der ersten Wirbelschichtzone dadurch sichergestellt, dass das eisenoxidhaltige Material in der ersten Wirbelschichtzone kürzer verweilt als in den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtzonen.

Um den kritischen Temperaturbereich in der ersten Wirbelschichtzone möglichst rasch zu durchschreiten, also beispielsweise innerhalb einer Zeitspanne von maximal 5 Minuten, stehen ebenfalls einige Varianten zur Verfügung:

Dies kann dadurch erzielt werden, dass das der ersten Wirbelschichtzone zugeführte Reduktionsgas vor Einleiten in die erste Wirbelschichtzone als Gesamt- oder Teilstrom erhitzt wird, vorzugsweise indirekt mittels eines Rauchgases.

20 Nach einer bevorzugten Variante wird die Erfindung dadurch verwirklicht, dass in die erste Wirbelschichtzone die Gesamtmenge oder nur eine Teilmenge des aus der ersten Wirbelschichtzone in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtzone austretenden Reduktionsgases und zumindest eine Teilmenge eines frischen, vorzugsweise unverbrauchten Reduktionsgases zugeführt wird.

25 Eine weitere bevorzugte Ausführungsform ist dadurch gekennzeichnet, dass dem der ersten und/oder nachfolgenden Wirbelschichtzone zugeführten Reduktionsgas vor Eintritt desselben in die erste Wirbelschichtzone Sauerstoff oder ein sauerstoffhaltiges Gas unter Bewirken einer Teilverbrennung des Reduktionsgases zugeführt wird.

30 Eine weitere Variante ist dadurch gekennzeichnet, dass in die erste und/oder nachfolgende Wirbelschichtzone Sauerstoff oder ein sauerstoffhaltiges Gas unter Bewirken einer Teilverbrennung des Reduktionsgases eingeleitet wird.

Der kritische Temperaturbereich kann auch dadurch schnell durchschritten werden, dass das in die erste Wirbelschichtzone eingesetzte eisenoxidhaltige Material im vorgewärmten Zustand, vorzugsweise im hochvorgewärmten Zustand, eingesetzt wird, insbesondere mit einer Temperatur im Bereich über 250°C.

35 Eine weitere bevorzugte Ausführungsform ist dadurch gekennzeichnet, dass das eisenoxidhaltige Material und das Gas in der ersten Wirbelschichtzone indirekt erhitzt wird, vorzugsweise mittels eines Heißgases oder mittels eines Rauchgases oder durch Verbrennen eines Brenngases.

40 Selbstverständlich kann das erfindungsgemäße Ziel auch dadurch erreicht werden, dass zwei oder mehrere der oben angegebenen Varianten miteinander kombiniert zur Anwendung gelangen.

45 Eine erfindungsgemäße Anlage zur Durchführung der erfindungsgemäßen Verfahren mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, 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, ist dadurch gekennzeichnet, dass im in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor ein Rekuperator vorgesehen ist.

50 Anlagen zur Durchführung der erfindungsgemäßen Verfahren sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet. Solche Anlagen sind zum Teil an sich bekannt, beispielsweise aus der EP-0 571 358 A1 (Einstellung einer erhöhten Temperatur im ersten Reduktionsreaktor). Weiters ist aus der US-3,205,066 A eine Teilverbrennung mit Sauerstoff oder sauerstoffhaltigem Gas in einem Wirbelbett, aus der US-3,982,901 A und der US-3,983,927 A der Einbau von Wärmetauschern in Wirbelbettreaktoren und aus der EP-0 345 467 A1 das Vorsehen von Mantelstrahl-Heizrohren in Wirbelschichtreaktoren an sich bekannt.

55 Die Erfindung ist nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert, wobei Fig. 1 ein Verfahrensschema nach einer bevorzugten Ausführungsform zeigt, gemäß der in der ersten Wirbelschichtzone eine Temperatur des eisenoxidhaltigen Materials unter 400°C eingehalten wird. Die Fig. 2 bis 4 zeigen ein Detail des in der Fig. 1 dargestellten Verfahrensschemas in jeweils

abgeänderter Ausführungsform, wobei auch gemäß diesen Ausführungsformen eine Maximaltemperatur von 400°C in der ersten Wirbelschichtzone eingestellt wird. Die in den Fig. 5 bis 8 dargestellten Varianten zeigen analog zu den Fig. 2 bis 4 verschiedene Ausführungsformen des Verfahrensschemas nach Fig. 1 im Detail, wobei jedoch in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtzone eine Temperatur von über 580°C eingestellt wird. In Fig. 9 ist das Baur- Glaessner- Diagramm veranschaulicht, wobei der Reduktionsverlauf ohne und mit Beeinflussung des Temperaturniveaus in der ersten Wirbelschichtzone eingezeichnet ist. Fig. 10 veranschaulicht verschiedene erfindungsgemäße Verfahrensweisen für die Aufheizung in der ersten Wirbelschichtzone.

Die erfindungsgemäße Anlage gemäß Fig. 1 weist vier in Serie hintereinander geschaltete Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4 auf, wobei eisenoxidhaltiges Material, wie Feinerz, über eine Erzzuleitung 5 dem ersten Wirbelschichtreaktor 1 zugeleitet wird, in dem eine Aufheizung auf eine vorbestimmte Temperatur (bzw. gegebenenfalls eine Vorreduktion) stattfindet, wie später noch genauer ausgerührt wird. Anschließend wird das Feinerz von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor über Förderleitungen 6 geleitet, wobei sich innerhalb der Wirbelschichtreaktoren 1 bis 4 jeweils Wirbelschichtzonen ausbilden. Das fertig reduzierte Material (Eisenschwamm) wird in einer Brikettieranlage 7 heißbrikettiert. Erforderlichenfalls wird das reduzierte Eisen während der Brikettierung vor einer Reoxidation durch ein nicht dargestelltes Inertgas- System geschützt.

Vor Einleitung des Feinerzes in den ersten Wirbelschichtreaktor 1 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 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, den Reformer 10 verlassende Gas besteht im wesentlichen aus  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$  und  $CO_2$ . Dieses reformierte Erdgas wird über die Reformgasleitung 13 einem oder mehreren Wärmetauschern 14 zugeleitet, in denen es auf 80 bis 150°C abgekühlt wird, wodurch Wasser aus dem Gas auskondensiert wird.

Die Reformgasleitung 13 mündet in die Topgas-Ableitung 8, nachdem das Topgas mittels eines Kompressors 15 verdichtet wurde. Das sich so bildende Mischgas wird durch einen  $CO_2$ -Wäscher 16 hindurchgeschickt und von  $CO_2$  sowie von  $H_2S$  befreit. Es steht nunmehr als Reduktionsgas zur Verfügung. Dieses Reduktionsgas wird über eine Reduktionsgaszuleitung 17 in einem dem  $CO_2$ -Wäscher 16 nachgeordneten Gaserhitzer 18 auf eine Reduktionsgastemperatur von etwa 800°C erhitzt und dem in Gasdurchflussrichtung ersten Wirbelschichtreaktor 4 zugeführt, wo es mit den Feinerzen zur Erzeugung von direktreduziertem Eisen reagiert. Die Wirbelschichtreaktoren 4 bis 1 sind in Serie geschaltet; das Reduktionsgas gelangt über die Verbindungsleitungen 19 von Wirbelschichtreaktor zu Wirbelschichtreaktor. Die Anzahl der Wirbelschichtreaktoren richtet sich nach dem Gegebenheiten, wie den Eigenschaften des Reduktionsgases, dem gewünschten Reduktionsgradienten etc.

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 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 Erdgases sowie der Reformerrrauchgase 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 Gaserhitzer 18 über die Leitung 23 zugeführte Verbrennungsluft sowie gegebenenfalls auch das Reduktionsgas vorzuwärmen. Die dem Reformer 10 über die Leitung 24 zugeführte Verbrennungsluft wird ebenfalls vorgewärmt.

Zur Vermeidung bzw. Minimierung einer Magnetitbildung wird gemäß den in den Fig. 1 bis 4 dargestellten Ausführungsformen im Wirbelschichtreaktor 1 eine Temperatur von über 400°C vermieden. Dies geschieht gemäß Fig. 1 durch einen im Wirbelschichtreaktor 1 eingebauten Wärmetauscher 25, der im Inneren des Wirbelschichtreaktors 1 angeordnete Kühlschlangen 26

od.dgl. aufweist. Diese werden von Wasser durchströmt, das zu Dampf umgewandelt wird. Als Kühlmedium kann auch Wasserdampf verwendet werden, der an anderer Stelle des Prozesses verwertet werden kann. Anstelle der Kühlschlangen könnten auch Tauchheizflächen in den Wirbelschichtreaktor 1 eingesetzt werden.

5 Durch diese Maßnahme gelingt es, dass das aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretende und bereits teilverbrauchte Reduktionsgas so weit gekühlt wird, dass das im Wirbelschichtreaktor 1 enthaltene Erz nicht auf über 400°C aufgewärmt wird. Die Aufwärmung über 400°C bis auf die gewünschte Reduktionstemperatur erfolgt im Wirbelschichtreaktor 2, in dem das aus dem Wirbelschichtreaktor 3 stammende Reduktionsgas das Erz in sehr kurzer Zeit auf über 580°C  
10 erhitzt. Die Aufheizung erfolgt so rasch, dass eine Magnetitbildung möglichst verhindert wird.

Eine Temperaturerniedrigung im Wirbelschichtreaktor 1 kann auch durch direkte Kühlung mit Wasser und/oder Wasserdampf erzielt werden. Dies ist in Fig. 2 veranschaulicht. Wasser bzw. Wasserdampf wird über die Leitung 27 entweder direkt in den Wirbelschichtreaktor 1 und/oder über  
15 die Leitung 28 in die Verbindungsleitung 19, die zu diesem Wirbelschichtreaktor 1 führt, eingespeist. Das Einbringen dieser Medien bringt vom Energieverbrauch her gesehen keine Nachteile, da das Topgas, das aus dem Wirbelschichtreaktor 1 über die Topgas-Ableitung 8 austritt, ohnehin durch einen Wäscher 9 geleitet wird und in diesem die Restkühlung, die im Wirbelschichtreaktor 1 nicht stattfindet, vorgenommen werden muss.

Gemäß Fig. 3 erfolgt das Kühlen der Wirbelschichtzone im Wirbelschichtreaktor 1 dadurch,  
20 dass in der Verbindungsleitung 19 vom Wirbelschichtreaktor 2 zum Wirbelschichtreaktor 1 ein rekuperativer Wärmetauscher 29 vorgesehen ist, der mit Wasser, Luft od.dgl. zur Abkühlung des in den Wirbelschichtreaktor 1 eingebrachten Reduktionsgases dient. Eine Kühlung könnte auch durch Direkteindüsen von Wasser und/oder Wasserdampf erfolgen.

Gemäß Fig. 4 erfolgt das Einstellen der Maximaltemperatur von 400°C im Wirbelschichtreaktor  
25 1 dadurch, dass ein Teil des aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases direkt zum Topgas über eine Zweigleitung 30 geführt wird und nur der restliche Teil vermischt mit einem rezirkulierten, aus dem Wirbelschichtreaktor 1 austretenden Topgas in den Wirbelschichtreaktor 1 eingeleitet wird. Zu diesem Zweck zweigt von der aus dem Wirbelschichtreaktor 1 ausgehenden Topgas-Ableitung 8 eine Zweigleitung 31 ab, die in die Verbindungsleitung 19 mündet.

30 Man kann auch durch eine geringere Verweilzeit des Erzes im Wirbelschichtreaktor 1 eine geringere Aufheizung des Erzes erreichen, wodurch ebenfalls die Kinetik der Reduktion positiv beeinflusst wird. In der Praxis lässt sich dies durch eine Verkleinerung des ersten Wirbelschichtreaktors 1 erzielen.

Durch all diese Maßnahmen dient der Wirbelschichtreaktor 1 nicht mehr direkt als  
35 Reduktionszone, sondern in erster Linie als Aufheizzone.

Gemäß den in den Fig. 5, 6, 7 und 8 dargestellten Varianten wird im ersten Wirbelschichtreaktor eine Temperatur von über 580°C eingestellt, wobei der Temperaturbereich - und dies ist wesentlich für die Erfindung - zwischen 400 und 580°C in einer Zeitspanne von weniger als 5 Minuten durchschritten wird. Hierbei handelt es sich nicht um eine Gastemperatur,  
40 sondern um die Temperatur des eingesetzten eisenoxidhaltigen Materials, d.h. des Feinerzes.

Gemäß der in Fig. 5 dargestellten Ausführungsform wird dies dadurch erzielt, dass zumindest ein Teil des bereits teilweise verbrauchten und aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases über einen rekuperativen Wärmetauscher 32 dem Wirbelschichtreaktor 1  
45 zugeführt wird. Der Wärmetauscher wird vorzugsweise mit Rauchgas oder einem anderen Heißgas betrieben.

Gemäß der in Fig. 6 dargestellten Ausführungsform wird das in den Wirbelschichtreaktor 1 eingeleitete und aus dem Wirbelschichtreaktor 2 stammende Reduktionsgas mit einem frischen Reduktionsgas vermischt, so dass es eine wesentlich größere Temperatur aufweist. Das zugemischte frische Reduktionsgas wird über eine Zweigleitung 33, die von der Reduktionsgas-  
50 Zuleitung 17 abzweigt, dem Wirbelschichtreaktor 1 zugeführt. Da nun ein Teil des aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases durch das frische Reduktionsgas ersetzt wird, kann ein Teil des aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases über eine Zweigleitung 30 in die Topgas-Ableitung 8 eingeleitet werden. Es muss nicht unbedingt ein völlig frisches Reduktionsgas zugemischt werden, es genügt, wenn ein Reduktionsgas dem aus dem  
55 Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgas beigemischt wird, das noch ein höheres Reduktionspotential aufweist.

Gemäß Fig. 7 ist im Wirbelschichtreaktor 1 ein rekuperativer Wärmetauscher 35 eingebaut, der von einem Heißgas, wie Rauchgas, durchströmt ist. In den Wärmetauscher kann auch ein

Brenngas mit Luft oder einem anderen sauerstoffhaltigem Gas oder Sauerstoff eingebracht werden, wodurch es zu einer Verbrennung des Brenngases und damit zu einer starken Anhebung der Temperatur des im Wirbelschichtreaktor 1 eingesetzten Erzes innerhalb von kurzer Zeit in erfindungsgemäßer Art und Weise kommt. Der Rekuperator 35 dient dann als Brennkammer für einen in ihm eingesetzten Brenner. Das hierbei entstehende Rauchgas kann zur Erztrocknung oder zur Vorwärmung des Reduktionsgases verwendet werden. Ein Teilstrom des aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases wird über die Zweigleitung 30 in die Topgas-Ableitung 8 eingeleitet.

Gemäß der in Fig. 8 dargestellten Ausführungsvariante wird Luft oder ein anderes sauerstoffhaltiges Gas oder Sauerstoff dem System zugeführt, wodurch ebenfalls die Temperatur im Wirbelschichtreaktor 1 so weit angehoben werden kann, dass das Erz sich innerhalb von 5 Minuten von 400°C auf 580°C erhitzt. Die Zuführung des Sauerstoffes oder sauerstoffhaltigen Gases kann in die Verbindungsleitung 19 (Stelle B), die den Wirbelschichtreaktor 1 verbindet, erfolgen. Es ist aber auch denkbar, diese Medien direkt in den Wirbelschichtreaktor 2 und/oder Wirbelschichtreaktor 1 (Stellen A und/oder D) oder auch in die den Wirbelschichtreaktor 3 mit dem Wirbelschichtreaktor 2 verbindende Verbindungsleitung 19 (Stelle C) einströmen zu lassen. Es kommt hierdurch zu einer Teilverbrennung von Reduktionsgas und damit zu einer starken Erhöhung der Temperatur im Wirbelschichtreaktor 1 bzw. Wirbelschichtreaktor 2 oder in der Verbindungsleitung 19. Auch durch diese Maßnahmen gelingt es in relativ einfacher Art und Weise, den für die Magnetitbildung kritischen Temperaturbereich zwischen 400°C und 580°C, vorzugsweise den Bereich zwischen 350°C und 650°C, innerhalb der als kritisch erkannten Zeitspanne von 5 Minuten zu durchschreiten. Ein Teilstrom des aus dem Wirbelschichtreaktor 2 austretenden Reduktionsgases wird über die Zweigleitung 30 in die Topgas-Ableitung 8 eingeleitet.

Eine derartig schnelle Aufheizung des Eisenerzes im kritischen Temperaturbereich kann auch dadurch erzielt werden, dass in den ersten Wirbelschichtreaktor I ein bereits vorgewärmtes Feinerz - beispielsweise vorgewärmt auf eine Temperatur zwischen 250 und 400°C - durchgeführt wird.

Aus Fig. 9, dem Baur- Glaessner- Diagramm, ist zu erkennen, dass es bei einem Reduktionsprozess ohne Beeinflussung des Temperaturniveaus im ersten Wirbelschichtreaktor zu einer Magnetitbildung kommt. Dieser Prozess ist mit runden Punkten veranschaulicht. (Das Baur- Glaessner- Diagramm ist als thermodynamisches Diagramm zu verstehen und daher unabhängig von der Reaktionskinetik und somit auch von der Vorgeschichte der Reduktion.) Bei einer Temperaturerhöhung im Wirbelschichtreaktor 1 auf über 580°C - welcher Prozess in Fig. 9 durch Quadrate veranschaulicht ist - wird eine Magnetitbildung nahezu zur Gänze vermieden. Eine Temperaturniedrigung im Wirbelschichtreaktor 1 ist in Fig. 9 durch Dreiecke veranschaulicht. Da der kritische Temperaturbereich in nachfolgender Wirbelschichtzone, also im Wirbelschichtreaktor 2, sehr schnell durchschritten wird, hält sich die Magnetitbildung in Grenzen, und es kommt zu keiner Beeinträchtigung des Reduktionsprozesses in den Reduktionsstufen.

Aus Fig. 10, einem Diagramm, das auf der Ordinate die Temperatur und auf der Abszisse die Zeit aufgetragen hat, ist in schematischer Darstellung der Temperaturverlauf für drei Varianten der Betriebsweise des Wirbelschichtreaktors I veranschaulicht. Gemäß Variante 1, die durch die mit voller Linie ausgezogene Kurve veranschaulicht ist, wird im Wirbelschichtreaktor 1 eine Temperatur von knapp unter 400°C eingestellt. Es ist zu ersehen, dass der kritische Temperaturbereich zwischen 400 und 580°C, der durch ein Feld mit Schraffen in Fig. 10 angemerkt ist, nicht tangiert wird.

Bei einer Temperatur von knapp unter 400°C geht die Magnetitbildung nur so langsam vor sich, dass eine allfällige Magnetitschicht an den Erzkörnern keine die weitere Reduktion behindernde Schicht darstellt. Die weitere Reduktion ist durch den an den Kurvenzug 1 anschließenden Kurvenzug, der mit IV bezeichnet ist und die Aufheizung des eisenoxidhaltigen Materials bzw. der Erzkörner im Wirbelschichtreaktor 2 veranschaulicht, dargestellt. Es ist zu ersehen, dass der kritische Temperaturbereich zwischen 400 und 580°C im Wirbelschichtreaktor 2 sehr schnell durchschritten wird, da in diesem Wirbelschichtreaktor 2 das Reduktionsgas sehr heiß und sehr reaktionsfreudig ist. Die Zeitdauer, in der sich Magnetit bilden kann, ist, obwohl die Magnetitbildung in diesem Temperaturbereich sehr schnell vor sich geht, zu kurz, um eine die Reduktion behindernde Schicht entstehen zu lassen.

Der Kurvenzug Variante II - mit strichlierter Linie veranschaulicht - gibt die Temperaturverhältnisse wieder, wenn im ersten Wirbelschichtreaktor 1 eine Temperatur von über 580°C eingestellt wird. Auch hier wird der kritische Temperaturbereich zwischen 400 und 580°C

sehr schnell durchschritten und die Zeitspanne zur Bildung einer Magnetitschicht an den Erzkörnern ist zu gering, als dass hierdurch eine störende Behinderung der Reduktion bewirkt werden könnte.

Der Kurvenzug Variante III - mit strichpunktierter Linie veranschaulicht - gibt jene Aufheizung wieder, wenn im Wirbelschichtreaktor 1 eine Temperatur innerhalb des kritischen Bereiches, also zwischen 400 und 580°C, eingestellt wird. In diesem Fall ist es wichtig, dass die Aufheizung besonders schnell vor sich geht, um die Zeitdauer, die das eisenoxidhaltige Material bzw. die Erzkörner in diesem Temperaturbereich verbringen, möglichst kurz zu halten. Wesentlich ist hierbei noch, dass unmittelbar nach Erreichen der für den Wirbelschichtreaktor 1 gewünschten Temperatur das Material aus dem Wirbelschichtreaktor 1 ausgebracht und in den Wirbelschichtreaktor 2 überführt wird. Ein Halten im kritischen Temperaturbereich soll auf jeden Fall vermieden werden, da, wie bereits erwähnt, in diesem kritischen Temperaturbereich die Magnetitbildung sehr schnell vor sich geht und sich an den Erzkörnern eine dementsprechend dicke Magnetitschicht ausbilden könnte.

Die Magnetitbildung ist in dem Diagramm Fig. 10 ebenfalls veranschaulicht, u.zw. durch das in diesem Diagramm mit vertikalen Schraffen versehene Feld, wobei in Ordinate-Richtung der steigende Magnetitanteil in Abhängigkeit von der Zeitdauer zu ersehen ist.

20

### Patentansprüche:

1. Verfahren zur Direktreduktion von teilchenförmigem eisenoxidhaltigem Material im Wirbelschichtverfahren, wobei Synthesegas, wie reformiertes Erdgas, als Reduktionsgas in mehrere für das Reduktionsgas in Serie hintereinander geschaltete Wirbelschichtzonen eingeleitet wird und im Gegenstrom zu dem teilchenförmigen eisenoxidhaltigen Material von Wirbelschichtzone zu Wirbelschichtzone geführt wird, und wobei in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtzone eine Erhitzung des eisenoxidhaltigen Materials und in der bzw. den weiteren Wirbelschichtzone(n) die Direktreduktion durchgeführt wird, dadurch gekennzeichnet,
  - dass in der ersten Wirbelschichtzone eine Temperatur des eisenoxidhaltigen Materials entweder unter 400°C, vorzugsweise unter 350°C,
  - oder über 580°C, vorzugsweise bei etwa 650°C,
  - oder eine Temperatur im Bereich von 400 bis 580°C eingestellt wird,
  - wobei bei einer Temperatureinstellung auf unter 400°C der Temperaturbereich zwischen 400°C und 580°C in der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials der ersten Wirbelschichtzone nachgeordneten Wirbelschichtzone innerhalb einer Zeitspanne von 10 Minuten, vorzugsweise innerhalb von 5 Minuten, durchschritten wird, und
  - wobei bei einer Temperatureinstellung auf über 580°C der Temperaturbereich zwischen 400°C und 580°C innerhalb einer Zeitspanne von maximal 10 Minuten, vorzugsweise 5 Minuten, durchschritten wird, und
  - wobei weiters bei einer Temperatureinstellung im Bereich von 400°C bis 580°C das eisenoxidhaltige Material in diesem Temperaturbereich maximal 10 Minuten, vorzugsweise 5 Minuten verweilt und unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur in die nächstfolgende Wirbelschichtzone weitergeleitet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass in jedem Fall unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur das eisenoxidhaltige Material der nachgeordneten Wirbelschichtzone zugeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Temperaturbereich zwischen 400°C und 580°C unter Vermeidung einer Haltezeit durchschritten wird und der durchschnittliche Temperaturgradient innerhalb des Bereiches zwischen 400°C und 580°C mindestens 20°C/min, vorzugsweise 40°C/min, beträgt.
4. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das der ersten Wirbelschichtzone zugeführte Reduktionsgas vor Einleiten in die erste Wirbelschichtzone einer Abkühlung unterzogen wird (Fig. 3).



5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das aus der ersten Wirbelschichtzone in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtzone austretende Reduktionsgas nur zum Teil in die erste Wirbelschichtzone eingeleitet wird und das aus der ersten Wirbelschichtzone austretende Reduktionsgas zumindest teilweise in die erste Wirbelschichtzone rezirkuliert wird (Fig. 4).
6. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das eisenoxidhaltige Material und das Gas in der ersten Wirbelschichtzone indirekt gekühlt wird, vorzugsweise mittels Luft oder Wasser (Fig. 1).
7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das eisenoxidhaltige Material und das Gas in der ersten Wirbelschichtzone direkt gekühlt wird, vorzugsweise durch Eindüsen von Wasser und/oder Wasserdampf (Fig. 2).
8. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das der ersten Wirbelschichtzone zugeführte Reduktionsgas vor Einleiten in die erste Wirbelschichtzone als Gesamt- oder Teilstrom erhitzt wird, vorzugsweise indirekt mittels eines Rauchgases (Fig. 5).
9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3 und 8, dadurch gekennzeichnet, dass in die erste Wirbelschichtzone die Gesamtmenge oder nur eine Teilmenge des aus der ersten Wirbelschichtzone in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtzone austretenden Reduktionsgases und zumindest eine Teilmenge eines frischen, vorzugsweise unverbrauchten, Reduktionsgases zugeführt wird (Fig. 6).
10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3 und 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, dass dem der ersten und/oder nachfolgenden Wirbelschichtzone zugeführten Reduktionsgas vor Eintritt desselben in die erste Wirbelschichtzone Sauerstoff oder ein sauerstoffhaltiges Gas unter Bewirken einer Teilverbrennung des Reduktionsgases zugeführt wird (Fig. 8).
11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3 und 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass in die erste und/oder nachfolgende Wirbelschichtzone Sauerstoff oder ein sauerstoffhaltiges Gas unter Bewirken einer Teilverbrennung des Reduktionsgases eingeleitet wird (Fig. 8).
12. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3 und 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass das in die erste Wirbelschichtzone eingesetzte eisenoxidhaltige Material im vorgewärmten Zustand, vorzugsweise im hochvorgewärmten Zustand, eingesetzt wird, insbesondere mit einer Temperatur über 250°C.
13. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3 und 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das eisenoxidhaltige Material und das Gas in der ersten Wirbelschichtzone indirekt erhitzt wird, vorzugsweise mittels eines Heißgases oder mittels eines Rauchgases oder durch Verbrennen eines Brenngases (Fig. 7).
14. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das eisenoxidhaltige Material in der ersten Wirbelschichtzone kürzer verweilt als in den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtzonen.
15. Anlage zur Durchführung eines Verfahrens nach Anspruch 6 oder 13, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass im in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) ein Rekuperator (25, 35) vorgesehen ist (Fig. 1, 7).
16. Anlage nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Rekuperator (25) an eine Wasser- oder Wasserdampfleitung angeschlossen ist (Fig. 1).
17. Anlage nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Rekuperator an eine Heißgasleitung (35) angeschlossen ist (Fig. 7).

18. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Rekuperator an eine Rauchgasleitung angeschlossen ist (Fig. 7).
19. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 14, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass in dem in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) ein gegenüber der Wirbelschichtzone in diesem Wirbelschichtreaktor abgekapselter Brenner eingebaut ist (Fig. 7).
20. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 4, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass in der Verbindungsleitung (19) zwischen dem in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) und zweiten Wirbelschichtreaktor (2) eine Kühleinrichtung (29) vorgesehen ist, vorzugsweise ein Rekuperator, der an ein Kühlmedium angeschlossen ist, vorzugsweise Luft oder Wasser (Fig. 3).
21. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 5, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass von einer aus dem in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) Topgas abführenden Leitung (8) eine Zweigleitung (31) abzweigt, die mit diesem Wirbelschichtreaktor (1) leitungsmäßig verbunden ist, vorzugsweise in die in diesen Wirbelschichtreaktor mündende Verbindungsleitung (19) mündet (Fig. 4).
22. Anlage nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass von der den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) mit dem diesem nachgeordneten Wirbelschichtreaktor (2) verbindenden Verbindungsleitung (19) eine Zweigleitung (30) in die Topgas-Ableitung (8) mündet (Fig. 4).
23. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 7, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass eine ein Kühlmittel zurührende Leitung (27, 28) entweder direkt in den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) mündet oder in die den ersten Wirbelschichtreaktor mit dem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor verbindende Verbindungsleitung (19) mündet (Fig. 2).
24. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 8, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass in der Verbindungsleitung (19) zwischen dem in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) und zweiten

Wirbelschichtreaktor (2) eine Heizeinrichtung (32), vorzugsweise ein an Rauchgas oder an Heizgas angeschlossener Rekuperator vorgesehen ist (Fig. 5).

25. Anlage nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass von der den ersten Wirbelschichtreaktor (1) mit dem nachgeordneten Wirbelschichtreaktor (2) verbindenden Verbindungsleitung (19) eine Zweigleitung (30) abzweigt, die in eine Abgas aus dem ersten Wirbelschichtreaktor (1) ableitende Topgas-Ableitung (8) mündet (Fig. 5).
26. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 9, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass in den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) zusätzlich zur Verbindungsleitung (19) eine frisches Reduktionsgas zuführende Leitung direkt oder indirekt über die Verbindungsleitung (19) mündet (Fig. 6).
27. Anlage nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass von der den ersten Wirbelschichtreaktor (1) mit dem nachgeordneten Wirbelschichtreaktor (2) verbindenden Verbindungsleitung (19) eine Zweigleitung (30) abzweigt, die in eine Abgas aus dem ersten Wirbelschichtreaktor ableitende Topgas-Ableitung (8) mündet (Fig. 6).
28. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 10, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass in eine der Verbindungsleitungen (19) und/oder in den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials zweiten Wirbelschichtreaktor (2) eine ein sauerstoffhaltiges Gas oder Sauerstoffzuführende Leitung mündet (bei B, C, D) (Fig. 8).
29. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 11, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass in den in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) eine ein sauerstoffhaltiges Gas oder Sauerstoffzuführende Leitung mündet (bei A) (Fig. 8).
30. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 12, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass dem in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials ersten Wirbelschichtreaktor (1) eine Vorwärmanrichtung zur Vorwärmung des eisenoxidhaltigen Material vorgeordnet ist.
31. Anlage zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 12, mit mehreren in Serie hintereinander geschalteten Wirbelschichtreaktoren (1 bis 4) zur Aufnahme eisenoxidhaltigen Materials, wobei das eisenoxidhaltige Material von Wirbelschichtreaktor (1) zu Wirbelschichtreaktor (2 bis 4) über Förderleitungen (6) in einer Richtung und das Reduktionsgas von Wirbelschichtreaktor (4) zu Wirbelschichtreaktor (3 bis 1) über Verbindungsleitungen (19) in die entgegengesetzte Richtung geführt ist, dadurch gekennzeichnet, dass der in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials erste Wirbelschichtreaktor (1) ein kleineres Innenvolumen aufweist als die in Fließrichtung des eisenoxidhaltigen Materials nachgeordneten Wirbelschichtreaktoren (2 bis 4).

32. Anlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 28 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass von der den ersten Wirbelschichtreaktor (1) mit dem nachgeordneten Wirbelschichtreaktor (2) verbindenden Verbindungsleitung (19) eine Zweigleitung (30) abzweigt, die in eine Abgas aus dem ersten Wirbelschichtreaktor ableitende Topgas-Ableitung (8) mündet (Fig. 4 bis 8).

5

**Hiezu 5 Blatt Zeichnungen**

10

15

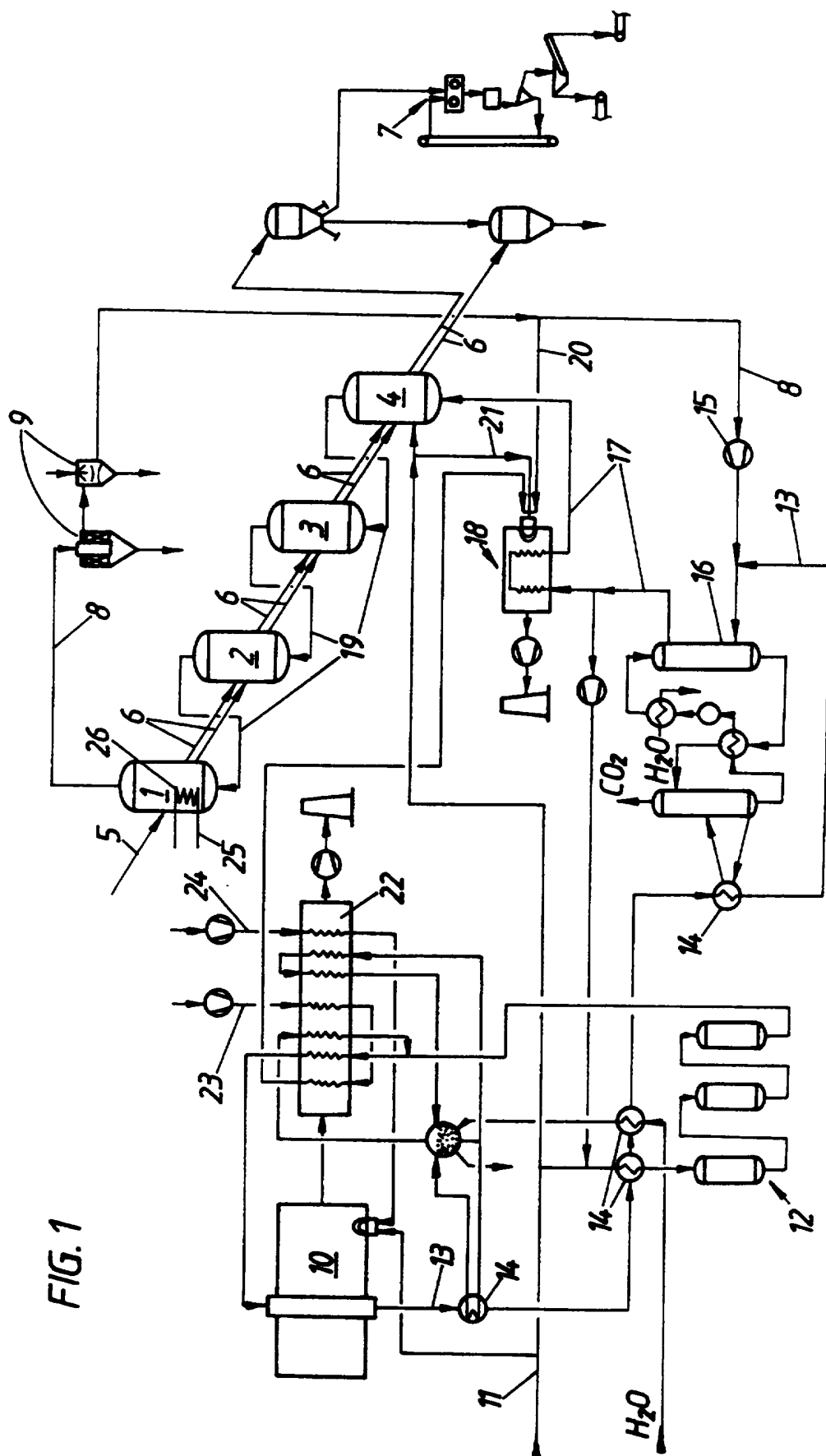
20

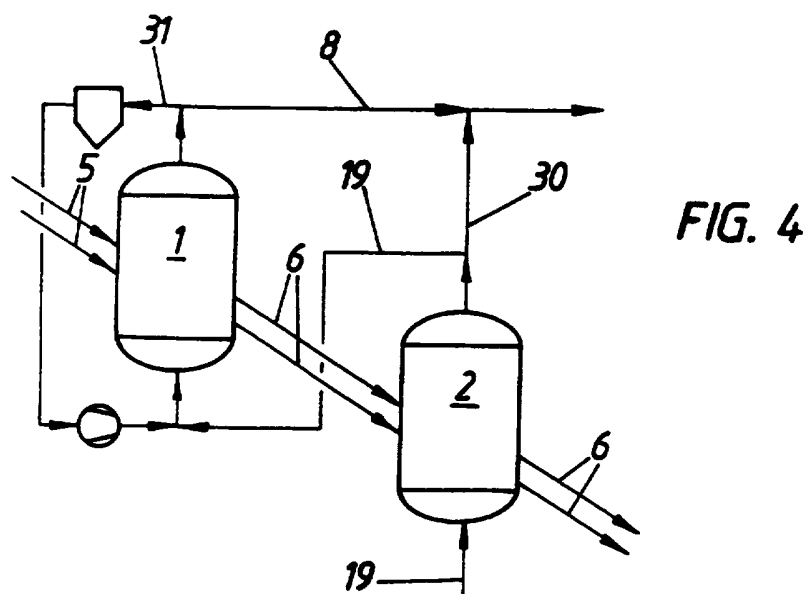
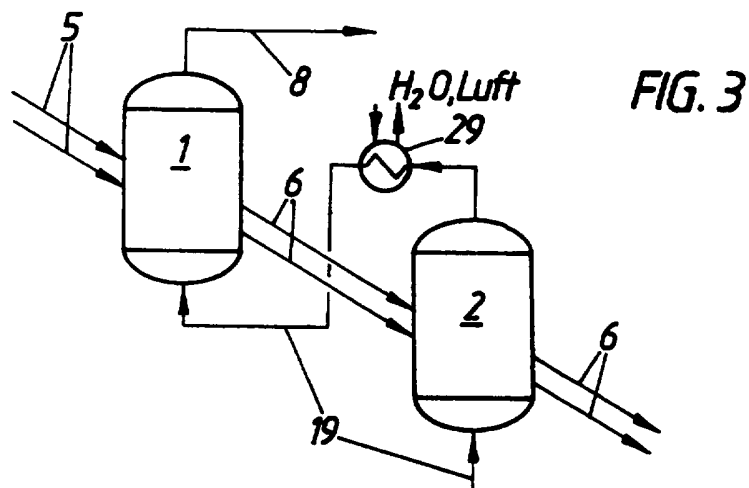
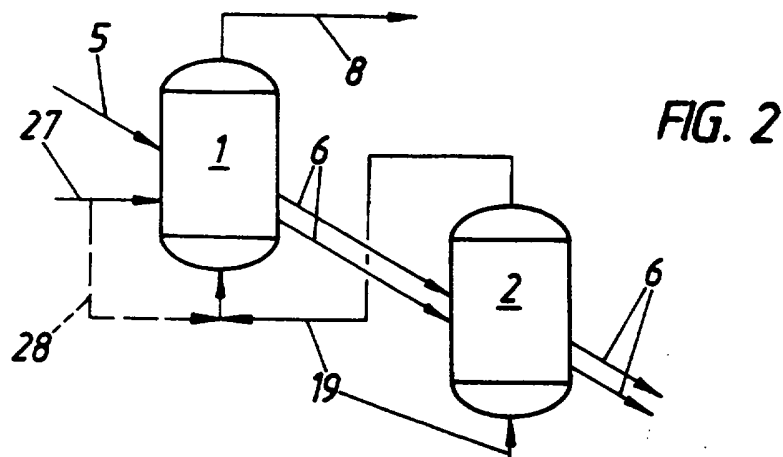
25

30

35

40





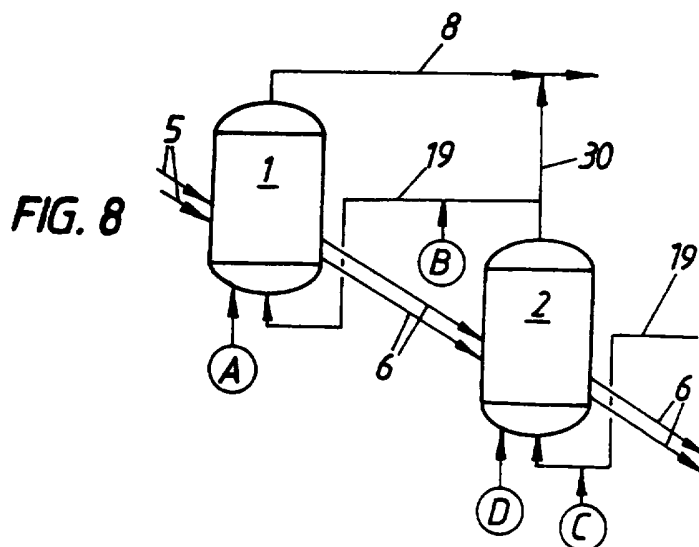
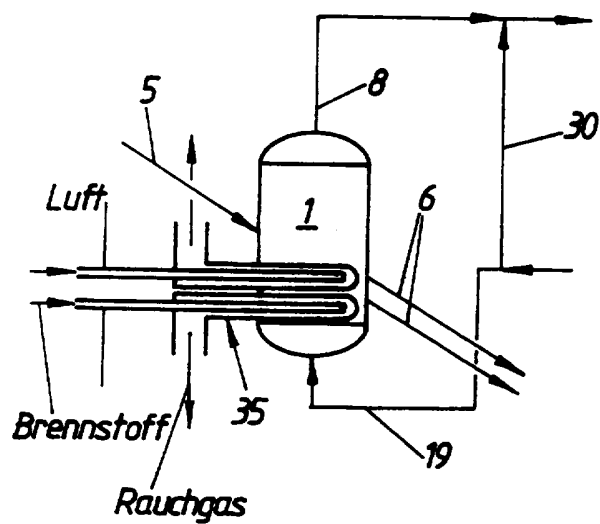
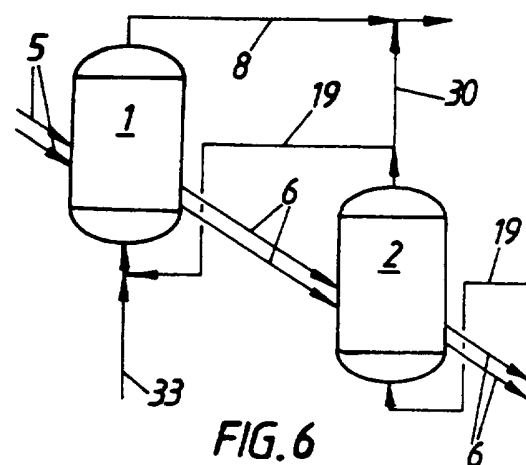
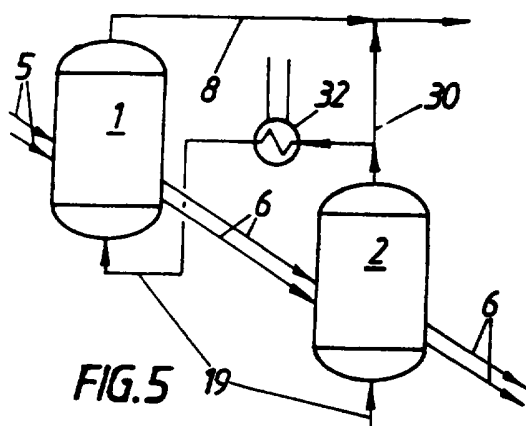


FIG. 9

