

WO 2010/003968 A2



Veröffentlicht:

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

beide mindestens einem weiteren Wirbelschichtreaktor (11) zugeführt werden, wobei Teere bei höherer Temperatur an dem weitgehend teerfreien Pyrolysekoks katalytisch gespalten werden, ohne dass der Ascheschmelzpunkt überschritten wird. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die Herstellung von weitgehend teerfreiem Synthesegas.

**Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von teerarmem
Synthesegas aus Biomasse**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur
thermochemischen Herstellung von Synthesegas aus
kohlenstoffhaltigen Energieträgern, insbesondere aus
Biomasse. Das erhaltene, weitgehend teerfreie Synthesegas
eignet sich besonders für chemische Synthesen, insbesondere
für die Herstellung von Wasserstoff.

Unter Biomasse sind hier alle Stoffe biologischen Ursprungs
zu verstehen. Synthesegas besteht überwiegend aus Wasserstoff
(H₂), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄).

Hintergrund der Erfindung

Vor dem Hintergrund der knapper werdenden fossilen
Energieträger bietet die Umwandlung von Biomasse in ein
einfach zu verteilendes Gas eine kostengünstige Alternative.

Wenn das primär entstehende Synthesegas dann noch in
Wasserstoff umgewandelt, und an die Endkunden verteilt wird,
ist sogar eine dezentrale Stromerzeugung mittels
Brennstoffzellen möglich. Die Herstellung und Verwendung von
Wasserstoff erfordert ein sehr reines stickstoffarmes
Synthesegas. Diese Anforderungen gelten auch für andere
chemische Synthesen.

Für die thermochemische Herstellung von Synthesegas aus
Biomasse sind im Wesentlichen drei Verfahren bekannt.

Für den kleinen Leistungsbereich findet man überwiegend Festbettvergaser in verschiedenen Varianten. Festbettvergaser sind auf eine gleichbleibende hohe Qualität der Biomasse angewiesen und eignen sich nicht zur Herstellung von
5 Synthesegas hoher Qualität, das für die Weiterverarbeitung zu Wasserstoff geeignet ist.

Der Flugstromvergaser eignet sich besonders für hohe Leistungen ab 1 GW, weil die Reaktorgröße des
10 Flugstromvergaser relativ klein ist. Für kleine Anlagen ist der Flugstromvergaser wegen des hohen apparativen Aufwandes unwirtschaftlich. Der Flugstromvergaser erfordert weitgehend trockene Biomasse bzw. Vorprodukte, weil der Flugstromvergaser bei hohen Temperaturen mit reinem
15 Sauerstoff arbeitet. Die Asche schmilzt glasartig auf und ist als Mineraldünger nicht verwendbar. Das ist angesichts teurer und knapper werdender Düngemittel problematisch.

Der Wirbelschichtreaktor hat seine Stärken im mittleren
20 industriellen Leistungsbereich von 1 MW bis 1 GW. Die Asche aus Wirbelschichtreaktoren ist als Mineraldünger für die Landwirtschaft verwendbar. Bei Verfahren mit Wirbelschichtreaktoren unterscheidet man die autotherme Vergasung und die allotherme Vergasung.

25 Bei der autothermen Vergasung wird ein Teil der Biomasse im Wirbelschichtreaktor zur Abdeckung der ablaufenden endothermen Reaktionen verbrannt. Die autotherme Vergasung wird mit Luft betrieben. Reiner Sauerstoff würde zu örtlichen
30 Überhitzungen im Wirbelbett führen. Verfahren, die Luft als Wirbelgas nutzen, lassen sich also nicht einfach auf Sauerstoff umstellen. Die Verwendung von Luft führt zur

Verdünnung des Synthesegases mit Stickstoff und CO₂, was die Nutzung zur Stromerzeugung und Weiterverarbeitung zu Produkten von Wasserstoff, Methan, Methanol oder flüssigen Treibstoffen erschwert.

5

Bei der allothermen Vergasung erfolgt die Einkopplung der notwendigen Wärme durch Wärmeübertragung. Das kann beispielsweise durch Heizstäbe im Wirbelbett geschehen, wie in der DE 199 26 202 C1 beschrieben. Auch umlaufende

10

Wärmeträger zwischen einen Brenner und einem Synthesegasreaktor sind bekannt. Als Wärmeträger wird meistens Sand verwendet, der in einem zweiten Reaktor durch Verbrennung eines Teils der Biomasse aufgeheizt wird. Ein solcher Vergaser mit einer thermischen Leistung von 8 MW befindet sich in Güssing, Österreich. Diese Anlage wurde vorgestellt auf der 1st International Ukrainian Conference on BIOMASS FOR ENERGY; September 23-27, 2002 Kyiv, Ukraine von M. Bolhar-Nordenkampf et. all. unter dem Titel: „Scale-up of a 100 KW_{th} pilot FICFB to 8 MW_{th} FICFB-gasifier demonstration plant in Güssing (Austria)“. Als Wirbelgas für den Synthesegasreaktor dient Wasserdampf. Die Bereitstellung von Wasserdampf erfordert einen zusätzlichen Aufwand von Energie, reduziert in vielen Fällen die Effizienz und erhöht die Investitionskosten.

25

In der Regel wird die Biomasse direkt in den Synthesegasreaktor eingespeist, was einen sehr hohen Teergehalt zur Folge hat, weil grobe Teile der Biomasse nach wenigen Sekunden in den oberen Teil der Wirbelschicht gelangen können und die gebildeten teerhaltigen Ausgasungen unmittelbar in das Synthesegas gelangen. Das macht in jedem Fall ein aufwändiges Verfahren zur Teerentfernung

30

erforderlich. Die Rückgewinnung von fühlbarer Wärme ist nur sehr eingeschränkt möglich, weil sich unterhalb von 350°C Teere an Apparatewänden ablagern. Die Teerproblematik ist derzeit das größte Hindernis bei der Vergasung von Biomasse.

5

Aus der DE 601 20 957 T2 ist ein Verfahren bekannt, bei welchem Biomasse zunächst in einem Pyrolysereaktor in Pyrolysekoks und Pyrolysegas zerlegt wird um danach beides einem Reaktor zur Erzeugung von Synthesegas zuzuführen. Das
10 Verfahren ist auf die Verwendung von Luft abgestellt und weist daher einen hohen Stickstoffanteil im Synthesegas auf. Bedingt durch die Bauart und den Betrieb der Pyrolysereaktoren gelangt recht grober Koks in den Synthesegasreaktor. Dieser grobe Koks ist noch nicht
15 vollständig entgast und verursacht einen erhöhten Teeranteil im Synthesegas. Der Teer- und Stickstoffgehalt genügt jedoch nach einer einfachen Wäsche den Anforderungen für Verbrennungsmotoren, nicht jedoch den Anforderungen zur Herstellung und Verwendung von Wasserstoff und die
20 Durchführung von anderen chemischen Synthesen.

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, die geschilderten Nachteile weitgehend zu vermeiden und durch primäre Maßnahmen ein teearmes Synthesegas mit hoher Ausbeute bereitzustellen.

25

Zusammenfassung der Erfindung

Erfindungsgemäß wird ein Verfahren zur Herstellung von teearmem Synthesegas aus Biomasse zur Verfügung gestellt,
30 worin

- a) die Biomasse in mindestens einem ersten Wirbelschichtreaktor in mindestens die Komponenten Pyrolysegas und Pyrolysekoks zerlegt wird,
- b) das im ersten Wirbelschichtreaktor erzeugte Gas als Wirbelgas mindestens einem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor zugeführt wird,
- c) der Pyrolysekoks in feinen Partikeln mit dem Gas ausgetragen und dem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor zugeführt wird

Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den Ansprüchen 2 bis 12 beschrieben. Die Erfindung umfasst ferner eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit den Merkmalen der Ansprüche 13 bis 18.

Das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren liefert Synthesegas, dessen Teergehalt erheblich geringer ist als der von nach konventionellen Wirbelschichtverfahren hergestelltem Synthesegas. Unter „teearmem“ Synthesegas im Sinne der Erfindung wird insbesondere Synthesegas mit einem Teergehalt von weniger als 1000 mg/m^3 verstanden. Vorzugsweise weist das nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellte Synthesegas jedoch einen weit geringeren Teergehalt auf. Insbesondere ist der Teergehalt des nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Synthesegases vorzugsweise geringer als 500 mg/m^3 , noch bevorzugter geringer als 200 mg/m^3 . Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich ferner zur Herstellung von Synthesegas mit einem Teergehalt von weniger als 100 mg/m^3 , insbesondere weniger als 50 mg/m^3 . Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Synthesegas hergestellt, dass

einen Teergehalt von weniger als 10 mg/m^3 , insbesondere weniger als 2 mg/m^3 , noch bevorzugter weniger als 1 mg/m^3 verstanden. Synthesegas mit einem Teergehalt $< 1 \text{ mg/m}^3$ eignet sich unmittelbar zur Verwendung in chemischen Synthesen, insbesondere zur Herstellung von Wasserstoff. Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich daher zur Herstellung von im Wesentlichen teerfreiem Synthesegas.

Das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren sieht unter anderem vor, dass der Pyrolysekoks in feinen Partikeln mit dem Gas aus dem ersten Wirbelschichtreaktor ausgetragen und dem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor zugeführt wird. Unter „feinen Partikeln“ im Sinne der Erfindung werden Partikel verstanden, die aufgrund ihrer Größe bzw. ihrer Masse unter den im Reaktor vorherrschenden Bedingungen in der Lage sind, mit dem Gas aus dem ersten Wirbelschichtreaktor ausgetragen zu werden. Geeignete Pyrolysekoks-Partikel weisen vorzugsweise eine mittlere Partikelgröße kleiner 5 mm, insbesondere kleiner 2 mm, noch bevorzugter kleiner 1 mm auf.

Die mit der Erfindung erzielbaren Vorteile sind insbesondere darin begründet, dass mit dem erfindungsgemäßen Verfahren der Teergehalt im Synthesegas gegenüber dem Stand der Technik durch primäre Maßnahmen sehr stark reduziert werden kann. Das mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellte Synthesegas zeichnet sich darüber hinaus durch einen geringen Stickstoffgehalt aus. Das Synthesegas ist also für nachgeordnete Synthesen besonders geeignet. Die weitgehende Teerfreiheit erspart eine aufwändige Reinigung des Synthesegases und eine aufwändige Reinigung teerbelasteter Abwässer. Die fühlbare Wärme des Synthesegases kann gut zur Aufheizung der eingehenden Stoffströme genutzt werden, weil

in den Wärmetauschern keine Teere kondensieren können. Die Nutzung der fühlbaren Wärme kann durch die Kaskadierung von Wirbelschichtreaktoren und/oder durch die Integration einer Biomasse-Trocknung erleichtert werden. Bedingt durch die
5 überwiegend elektrische Beheizung des Prozesses, gibt es weder Abgase noch Abgasverluste. Das Verfahren weist daher einen sehr hohen Wirkungsgrad auf. Anders als bei Festbettvergasern oder Flugstromvergasern, ist die Asche der Biomasse als Mineraldünger verwertbar. Das ist insbesondere
10 für den knapp werdenden Phosphor von großer Bedeutung. Wegen der wachsenden Bedeutung der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien, wird die Erfindung vor dem Hintergrund einer auf Biomasse basierenden solaren Wasserstoffwirtschaft beschrieben.

Ausführliche Beschreibung der Erfindung

In einer künftigen solaren Wasserstoffwirtschaft wird der
20 Wasserstoff überwiegend per Rohrleitung zum Endkunden geliefert. Durch die hohe Effizienz bei der dezentralen Verstromung des Wasserstoffs mit Brennstoffzellen ergibt sich bei fast allen Endverbrauchern ein Überschuss an Strom. Strom und Wärme haben in dieser wärmegeführten Energiewirtschaft
25 also den gleichen Wert. Weil eine wärmegeführte Energiewirtschaft prinzipiell verlustfrei ist, wird der Bedarf an Primärenergie, hier Biomasse, drastisch sinken. Vor diesem Hintergrund ist auch der Einsatz von elektrischer Energie zur Bereitstellung der Reaktionsenthalpie für die
30 Herstellung von Synthesegas wirtschaftlich. Der Einsatz von Elektroenergie ist, anders als heute, nicht verlustbehaftet. Die Elektroenergie findet sich im Energiegehalt des erzeugten Wasserstoffs wieder und wird nahezu verlustfrei in Strom und

Wärme umgewandelt. Ein Teil des Stroms wird dann zur
erfindungsgemäßen Herstellung von Synthesegas genutzt. Die
Wärme kann immer genutzt werden. Das Heizen mit
Elektroenergie hat überdies den Vorteil, dass keine Rauchgase
entstehen und somit das Verfahren weitgehend abgasfrei ist.
Das erfindungsgemäße Verfahren ist auch geeignet für die
Verwertung von reinem Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse.
Die Gewinnung von Sauerstoff aus der Zerlegung von Luft ist
allerdings nur für sehr große Anlagen wirtschaftlich.

Verfahren mit Wirbelschichtreaktoren haben eine typische
Anlagengröße zwischen 1 MW und 1 GW, vorzugsweise zwischen 20
MW und 500 MW. Großanlagen sind zwar wirtschaftlicher, doch
stoßen sie oft an logistische Grenzen. Eine
Wasserstoffwirtschaft ist eine regionale und dezentrale
Energiewirtschaft. Die Anlagen sollten daher unter erhöhtem
Druck zwischen 5 und 50 bar arbeiten können, damit das
erzeugte Gas einfach gereinigt, und direkt in das regionale
Mitteldruck-Gasnetz eingespeist werden kann. Aus diesem Grund
wird das erfindungsgemäße Verfahren vor dem Hintergrund einer
Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff vorzugsweise mit einem
Eingangsdruck von 20 bis 40 bar, insbesondere mit einem
Eingangsdruck von etwa 30 bar, betrieben.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren erfolgt die Herstellung
des Synthesegases in einer Kaskade von mindestens zwei
Wirbelschichtreaktoren. Im ersten Wirbelschichtreaktor
erfolgt die Spaltung der Biomasse in Pyrolysegas und
Pyrolysekoks. Durch ein inertes Bettmaterial wie Sand, wird
der Pyrolysekoks im Wirbelbett fein gemahlen. In einer
stationären Wirbelschicht kann nur fein gemahlener Koks den
Wirbelschichtreaktor zusammen mit dem Pyrolysegas verlassen.
Eine stationäre Wirbelschicht ist also für das

erfindungsgemäße Verfahren besser geeignet als eine zirkulierende Wirbelschicht, bei der Sand und gröbere Kokspartikel ausgetragen werden. Feingemahlene Kokspartikel weisen in ihrem Inneren kaum noch primäre und sekundäre Teere auf, weil der Stoff- und Wärmeübergang bei kleinen Partikeln sehr groß ist. Diesen Koks kann man also als weitgehend teerfrei bezeichnen. Das ist die Voraussetzung zur Erzeugung von teerfreiem Synthesegas.

Das mit Pyrolysekoks beladene Pyrolysegas gelangt in den nachgeordneten Wirbelschichtreaktor. Das Pyrolysegas ist also das Wirbelgas für den nachgeordneten Wirbelschichtreaktor. In diesem Wirbelschichtreaktor trifft das Pyrolysegas auf feingemahlene heißen Koks, der die im Pyrolysegas enthaltenen Teere zum großen Teil katalytisch in H_2 , CO , CO_2 und CH_4 spaltet. Ist dieser Wirbelschichtreaktor der letzte Wirbelschichtreaktor in einer Kaskade von mehreren Wirbelschichtreaktoren, so wird die eingesetzte Biomasse hier abschließend in Synthesegas konvertiert. Die Bezeichnung „Pyrolysereaktor“ und „Reformer“ ist bei mehr als zwei Wirbelschichtreaktoren nicht mehr angebracht. Es handelt sich vielmehr um Reaktoren, deren Temperaturen in den nachgeordneten Reaktoren ansteigen und deren Teergehalt in den nachgeordneten Reaktoren abnimmt. Als „Pyrolysereaktor“ lässt sich allenfalls der erste Wirbelschichtreaktor im Verfahren bezeichnen. Um den Koks quantitativ umzusetzen, sind in der Regel Temperaturen von $850^{\circ}C$ bis $1.000^{\circ}C$ erforderlich. Erfindungsgemäß ist daher vorzugsweise vorgesehen, dass mindestens ein Wirbelschichtreaktor geheizt wird, beispielsweise mit einer elektrischen Widerstandsheizung in Form von Heizstäben, die in die Wirbelschicht eintauchen.

Der erste Wirbelschichtreaktor in einer Kaskade von mehreren, benötigt nur eine geringe Wärmezufuhr, weil die Spaltung der Biomasse in Pyrolysegas und Pyrolysekoks fast keine
5 Wärmetönung aufweist. Bei Nutzung von überhitztem Wasserdampf als Wirbelgas und vorgewärmter Biomasse läuft diese Reaktion also fast von selbst. Dennoch ist es vorteilhaft etwas Wärme einzukoppeln, damit auch der Pyrolysekoks mindestens teilweise umgesetzt wird. So erhält man einen weitgehend
10 teerfreien Koks für den nachgeordneten Wirbelschichtreaktor, was die Qualität des Synthesegases verbessert. Die Wärmeeinkopplung in den Pyrolysereaktor geschieht in vorteilhafter Weise durch Rohre im Wirbelbett, in denen das heiße Synthesegas hindurch geleitet wird. Die fühlbare Wärme
15 des Synthesegases kann weiterhin auch zur Erzeugung und Überhitzung des Wasserdampfes genutzt werden, der dem Pyrolysereaktor als Wirbelgas dient.

Gemäß vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung kann das
20 teerhaltige Gas, gemäß Anspruch 2, vor dem Eintritt in einen nachfolgenden Wirbelschichtreaktor erhitzt werden. Damit kann der Teergehalt im Gas reduziert werden. Das erhitzte Gas kühlt durch die endotherme Reaktion an Kokspartikeln im nachfolgenden Reaktor wieder ab, was als chemische Quenche
25 bekannt ist. Die Erhitzung kann beispielsweise durch ein elektrisches Heizregister erfolgen, das in Form eines Rohrbündelwärmetauschers zwischen zwei Wirbelschichtreaktoren eingebaut ist. Wenn das Pyrolysegas Kokspartikel enthält, sollte die Wandtemperatur dieses Heizregisters bei der
30 Nutzung von Holz den Ascheerweichungspunkt von 1.200°C vorzugsweise nicht überschreiten.

Gemäß weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist es für Biomasse mit niedrigem Ascheerweichungspunkt gemäß Anspruch 3 besser, den Pyrolysekoks vom Pyrolysegas abzutrennen und nur das staubfreie Pyrolysegas zu erhitzen. Die

5 Temperaturerhöhung kann hier viel weiter getrieben werden. Auch eine örtlich starke Erhitzung durch Zugabe von reinem Sauerstoff ist an dieser Stelle möglich.

Eine besonders wirkungsvolle Methode zur Zerstörung von Teeren ist, gemäß Anspruch 4, die Erzeugung eines Plasmas durch elektrische Entladungen. Das Plasma zerstört auch die ringförmigen Moleküle, die eine besonders starke Bindung aufweisen. Das Plasma kann beispielsweise durch Lichtbogen zwischen mindestens zwei Elektroden erzeugt werden.

15 Vorteilhaft ist die Anordnung mehrerer Elektroden zwischen denen abwechselnd Entladungen ausgelöst werden. Damit erreicht man hohe Turbulenzen im Gas und damit eine hohe Reaktionsrate der gebildeten freien Radikale.

Lichtbogenentladungen sind also viel wirksamer als eine einfache Heizung. Durch Lichtbogenentladungen wird das Gas natürlich auch insgesamt erwärmt. Anstelle einer Anordnung von mindestens zwei Elektroden im Gasraum zwischen zwei Wirbelschichtreaktoren kann man auch eine Anordnung von Hohlelektroden nutzen, die in einem separaten Gehäuse untergebracht sind. Die Entladungen erfolgen hier in einem Rohr zwischen ringförmigen Elektroden. Solche Geräte sind als „Plasma Converter“ bekannt. Das Rohr kann von einem Teil des Pyrolysegas durchströmt werden oder von einem kohlenstofffreien Gas, wie Wasserdampf. Kohlenwasserstoffe werden im Lichtbogen hauptsächlich in Wasserstoff und Kohlenstoff (Crackruß) zerlegt. Beide Produkte können

unmittelbar oder im nachfolgenden Wirbelschichtreaktor zu Synthesegas umgesetzt werden.

Gemäß weiterer Ausgestaltung nach Anspruch 5 kann das überhitzte teerhaltige Gas durch ein Katalysatorbett geleitet werden. Damit ist eine Reduzierung des Teergehaltes schon bei relativ niedrigen Temperaturen möglich. Bewährt haben sich hier nickelbasierte Katalysatoren.

Die Wirkung eines Katalysators kann nach Anspruch 6 wesentlich verbessert werden, wenn das teerhaltige Gas vor dem Inkontaktbringen mit dem Katalysator von Schadstoffen, insbesondere von Halogeniden und/oder Alkalien, befreit wird. Besonders wirkungsvoll ist auch eine Entschwefelung. Für diesen Zweck ist im Allgemeinen eine Heißgasentschwefelung ausreichend. Geeignet sind dafür Metalloxide wie beispielsweise Ca, Fe und Zn, auch in Mischungen mit anderen Metalloxiden. Ein Teil dieser Oxide kann auch organische Verbindungen des Schwefels und des Stickstoffs (COS, HCN) aufbrechen. Viele Metalloxide lassen sich mit Luft oder Wasserdampf regenerieren. Das teerhaltige Gas muss möglicherweise auf 600°C abgekühlt werden. Auf die Effizienz des Prozesses hat das aber keinen Einfluss, weil die freiwerdende Wärme in die vorgelagerten Prozessstufen eingekoppelt werden kann. Ebenfalls geeignet ist eine Trockenreinigung mit verbrauchenden Chemikalien wie beispielsweise Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Eine derartige Lösung wird einfach in den Gasstrom eingedüst und schadstoffbeladen mit Filtern entfernt.

Eine besonders einfache Anordnung von Wirbelschichtreaktoren erhält man gemäß Anspruch 7 dadurch, dass man die

Wirbelschichtreaktoren direkt übereinander anordnet. Man erhält so die Reaktionscharakteristik einer Rührkesselkaskade, die immer einen positiven Einfluss auf die Produktqualität hat.

5

An sich ist die Verwendung trockener Biomasse und die separate Beschaffung von Wasserdampf zur Herstellung von Synthesegas verfahrenstechnisch weniger aufwändig als die Nutzung feuchter Biomasse. Das nutzbare Potenzial von trockener Biomasse ist jedoch sehr begrenzt. Das größere Potenzial liegt bei einjährigen Energiepflanzen, die überwiegend nur als Silage lagerfähig sind. Es ist deshalb wichtig, dass der Prozess auch Biomasse mit Wassergehalten von 30% bis 50% zulässt. Die Einspeisung von Biomasse mit noch höheren Wassergehalten ist nicht notwendig, weil man das Wasser vorher kalt abpressen und in vorteilhafter Weise zu Biogas verarbeiten kann. Ein erhöhter Wassergehalt erleichtert überdies die Einbringung der Biomasse in einen unter Überdruck stehenden Behälter. Nach DE 10 2008 012 156.8 und DE 10 2008 012 154.1 sind Schneckenförderer bekannt, die in ihrem Inneren einen Pfropfen ausbilden, der das Zurückströmen von Gas verhindert.

Die direkte Einspeisung von feuchter Biomasse mit einem Wassergehalt von deutlich mehr als 40% in den Pyrolysereaktor kann zu Effizienzverlusten führen, denn der zusätzlich als Wirbelgas benötigte Wasserdampf würde nur als Ballast gelten, der die Wärmebilanz verschlechtert. Gemäß Anspruch 8 ist es darum vorteilhaft, die feuchte Biomasse zu trocknen und die entstehenden Brüden als Wirbelgas dem Pyrolysereaktor zuzuführen. Für Anlagen industrieller Größe ist es zweckmäßig, die Biomasse in einem Wander- oder Wirbelbett zu

30

trocknen. Die Biomasse sollte bei diesem Trocknungsvorgang vorzugsweise auf nicht mehr als 280°C aufgeheizt werden, weil sonst eine exotherme Zersetzung der Biomasse einsetzt. Die Trocknungsvorrichtung sollte ferner vorzugsweise einen

5 Brüdenkreislauf enthalten, der Wärmetauscher zur Einkopplung von Prozesswärme besitzt. Der Brüdenkreislauf wird durch einen Kompressor erzeugt.

Der Vorrichtung zur Trocknung der Biomasse kann nach den

10 Ansprüchen 10 und 11 eine ähnliche Vorrichtung zur Vorwärmung der Biomasse vorgeschaltet werden, die vorzugsweise ebenfalls einen Verdichter und Wärmetauscher zur Einkopplung von Prozesswärme aufweist. Bei druckaufgeladenen Anlagen ist das

15 Temperaturniveau dieser Vorwärmung deutlich tiefer als das Temperaturniveau der Vorrichtung zur Trocknung der Biomasse. Bei 30 bar beträgt der Wasserdampfdruck beispielsweise 234°C. Die Vorwärmung würde in diesem Fall vorteilhafterweise auf einem Temperaturniveau von 80°C bis 150°C erfolgen. Damit

20 stehen zwei Wärmesenken zur Verfügung, die eine fast vollständige Nutzung der fühlbaren Wärme aus dem Prozess ermöglichen. Das bedeutet eine außerordentlich hohe Effizienz.

Auch in der Vorrichtung zur Vorwärmung der Biomasse kann

25 schon eine nennenswerte Menge des Wassers verdampft werden, wenn diesem Kreislauf ein Produktgas beigemischt wird. Nach Anspruch 12 ist es besonders vorteilhaft, dafür Kohlendioxid (CO₂) aus der Weiterverarbeitung des Synthesegases zu nutzen. Überschüssiges CO₂ entsteht bei nahezu jeder nachfolgenden

30 chemischen Synthese aus Synthesegas, auch bei der Herstellung von Wasserstoff. Besonders vorteilhaft ist es, dafür eine CO₂-Fraktion zu verwenden, die noch brennbare Anteile

enthält, die man sonst durch Verbrennung entsorgen müsste.
Mit dem zugeführten CO₂ wird eine Teilmenge des Wassers aus
der Biomasse entsprechend dem Partialdruck des Wasserdampfs
mitgeschleppt. Das erhöht die einkoppelbare Wärme in diesen

5 Gaskreislauf. So kann auch die Kondensationswärme des im
Synthesegas enthaltenen Wassers teilweise genutzt werden.

Leitet man dieses CO₂-haltige Gas an die Vorrichtung zur
Trocknung der Biomasse weiter, so erfolgt die Trocknung auf
einem niedrigeren Temperaturniveau. Das eingebrachte CO₂

10 dient als zusätzliche Kohlenstoffquelle für das Synthesegas.

Das erfordert zwar einen erhöhten Einsatz von elektrischer
Energie, doch das hat bei der Herstellung und Nutzung von
Wasserstoff keinen Einfluss auf die verfügbare Nutzenergie je
Einheit Biomasse. Lediglich der Anteil der Elektroenergie an
15 der Nutzenergie sinkt geringfügig, wenn man die Zuführung von
CO₂ nicht übertreibt. Beispielsweise sinkt das Verhältnis
Strom/Wärme von 52/48 auf 47/53, wenn man statt des

Fremdbezuges elektrischer Energie, die elektrische Energie
für das erfindungsgemäße Verfahren von den Wasserstoffkunden

20 bezieht, die Brennstoffzellen mit einem elektrischen
Wirkungsgrad von 60% besitzen. Das gilt ohne Zuführung von
CO₂ in die Vorrichtung zur Vorwärmung der Biomasse. Die
moderate Zuführung von CO₂ in den Prozess dürfte solange

keine gravierenden nachteiligen Folgen haben, solange das

25 Verhältnis Strom/Wärme nicht unter 30/70 sinkt. In der realen
Energiewirtschaft in Deutschland von heute findet man
beispielsweise ein Verhältnis von 20/80. Das gilt auch für
den durchschnittlichen Haushalt.

30 Im Folgenden wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die
Figuren 1 bis 5 anhand von Ausführungsbeispielen näher
erläutert.

- Fig. 1 zeigt eine einfache Ausführungsform der Erfindung;
Fig. 2 zeigt eine Ausgestaltung der Erfindung mit integrierter Vorwärmung und Trocknung der Biomasse;
5 Fig. 3 zeigt eine Anordnung mit 4 Wirbelschichtreaktoren und integriertem Katalysatorbett;
Fig. 4 ist eine Modifikation von Fig. 3 mit zusätzlicher Gasreinigung vor dem Katalysatorbett;
Fig. 5 zeigt eine Anordnung, bei der Teere durch Erzeugung
10 eines Plasmas zerstört werden.

Nach Fig. 1 besteht die erfindungsgemäße Vorrichtung aus den zwei Wirbelschichtreaktoren 3 und 11, die vorzugsweise eine stationäre Wirbelschicht aufweisen. Die
15 Wirbelschichtreaktoren besitzen jeweils einen Düsenboden 4, eine Wirbelschicht 5 und einen Freiraum 6 über der Wirbelschicht. Die Biomasse 1 wird beispielsweise durch einen Schneckenförderer 2 in den Wirbelschichtreaktor 3 eingebracht und durch eine innen liegende Heizung 7 aufgeheizt. In diesem
20 Beispiel besteht die Heizung aus Rohren, die von dem heißen Synthesegas 15a durchströmt werden. Um eine höhere Produktqualität zu erreichen, ist es vorteilhaft, diesen Reaktor mit einer zusätzlichen, hier nicht dargestellten, Elektroheizung auf mindestens 600°C bis 700°C aufzuheizen.
25 Als Wirbelgas dient Wasserdampf, der durch die Leitung 10 zugeführt wird. Das in Leitung 8 eintretende Wasser wird im Wärmetauscher 9 verdampft und überhitzt. Dabei wird die fühlbare Wärme des Synthesegases 15a genutzt.

30 Im Wirbelschichtreaktor 3 wird die Biomasse in Pyrolysegas und Pyrolysekoks aufgespalten. Der Pyrolysekoks gelangt mit dem Pyrolysegas in den nachgeordneten Wirbelschichtreaktor

11. Durch Wahl der Korngröße des eingesetzten Sandes und der Wirbelgasgeschwindigkeit kann man erreichen, dass nur Kokspartikel von weniger als 0,8 mm den Wirbelschichtreaktor 11 erreichen. Zusätzlich kann der Querschnitt des Freiraumes 6 erweitert werden, um große Kokspartikel zurückzuhalten. Die weitgehend von flüchtigen Bestandteilen befreiten Kokspartikel, die in den Wirbelschichtreaktor 11 gelangt sind, dienen dazu, die Teere des Pyrolysegases katalytisch zu spalten. Damit auch der Koks zu Synthesegas umgesetzt werden kann, sind im Wirbelschichtreaktor 11 in der Regel Temperaturen von 800°C bis 1.000°C erforderlich, vorzugsweise zwischen 850°C und 950°C. Die Beheizung 12 dieses Reaktors erfolgt vorzugsweise elektrisch, beispielsweise in Form von vertikal angeordneten Stäben mit elektrischer Widerstandsheizung. Der beheizte Teil dieser Stäbe ist vollständig von der Wirbelschicht umgeben. Das Synthesegas 15a verlässt den Wirbelschichtreaktor 11 über den Freiraum 6, dessen Querschnitt vorzugsweise erweitert ist. Im Partikelabscheider 13 wird die Asche 14 abgeschieden. Der Sand in den Reaktoren 3 und 11 kann durch an sich bekannte Fördereinrichtungen, die hier nicht gezeigt sind, kontinuierlich erneuert werden.

In Fig. 2 wird eine Vorrichtung gezeigt, die auf der rechten Seite zwei Wirbelschichtreaktoren 3 und 11 aufweist, wie sie zuvor an Hand der Fig. 1 beschrieben wurden. Im Freiraum 6 zwischen den beiden Wirbelschichtreaktoren 3 und 11 ist jedoch eine Heizeinrichtung 16 angeordnet. Diese Heizeinrichtung kann beispielsweise aus einem Rohrbündelwärmetauscher bestehen, dessen Rohre elektrisch beheizbar sind. Das Pyrolysegas und die Kokspartikel werden hier auf eine Temperatur aufgeheizt, die über der Temperatur

des Wirbelschichtreaktors 11 liegt. Damit wird schon ein großer Teil der Teere und der Kokspartikel zu Synthesegas umgewandelt. Bei holzartiger Biomasse mit hohem Ascheerweichungspunkt kann die Überhitzung so weit getrieben werden, dass die Heizung 12 im Wirbelschichtreaktor 11 entfallen kann. Im Wirbelschichtreaktor 11 werden dann nur noch gröbere Kokspartikel zermahlen und umgesetzt. Durch diese chemische Quenche tritt eine Erniedrigung der Temperatur ein.

Damit die fühlbare Wärme aus dem erfindungsgemäßen Verfahren nutzbar gemacht werden kann, ist der Kaskade von mindestens zwei Wirbelschichtreaktoren vorzugsweise eine Vorwärmung und/oder eine Trocknung vorgeschaltet, deren Temperaturniveau unterhalb der Zersetzungstemperatur der Biomasse von ca. 280°C liegt.

Die Biomasse 1 wird mit einem speziellen Schneckenförderer 2 in einen unter Überdruck stehenden Behälter eingebracht. Hier erfolgt eine Vorwärmung der Biomasse auf ein Temperaturniveau von 80°C bis 150°C. Die Biomasse 18 wird dabei von einem Gaskreislauf aus Kompressor 25 und Wärmetauscher 26 durchströmt. Der Gaskreislauf enthält ferner einen Abscheider 23, der feinen Biomassestaub 24 in den Behälter zurückführt. Das Gas gelangt durch den Düsenboden 19 in das Wanderbett 18 der Biomasse. Die Biomasse gelangt dann in ein Fallrohr 20 mit einer Öffnung 21. Durch pulsierende Dampfstöße aus der Leitung 22 wird die Biomasse kontrolliert in den nächsten Kreislauf ausgetragen. Für die Vorwärmung und die nachfolgende Trocknung ist es vorteilhaft, wenn die Biomasse mit einer an sich bekannten Vorrichtung 17 zu Stücken einheitlicher Größe geformt wird. Mischt man diesem Kreislauf

an der Stelle 27 ein Gas zu, so kann in diesem Kreislauf bereits eine Trocknung erreicht werden, bei der der Partialdruck des Wasserdampfes kleiner ist als der Gesamtdruck. Dazu kann ein kleiner Teil des Synthesegases genutzt werden. Besonders geeignet ist CO₂ aus einer nachfolgenden Prozessstufe des Synthesegases. Das überschüssige Gas aus diesem Kreislauf gelangt über die Leitung 28 in einen zusätzlichen Kreislauf, gebildet aus einem Kompressor 32 und den Wärmetauschern 33, 34, 35. Die überhitzten Brüden gelangen über den Düsenboden in das Wirbelbett aus Biomasse 29. Mitgerissene Teilchen werden mit dem Abscheider 31 entfernt und an der Stelle 43 der Biomasse beigegeben. Mit 36 ist ein nachfolgender Prozess zur Weiterverarbeitung des Synthesegases angedeutet. Alle diese Prozesse sind exotherm und können Abfallwärme zur Trocknung oder Vorwärmung der Biomasse bereitstellen. Dafür können die Wärmetauscher 34 und 35 genutzt werden. Die vorgewärmte und getrocknete Biomasse gelangt über eine Fördereinrichtung 42, wie beispielsweise eine dosierende Förderschnecke, in den ersten Wirbelschichtreaktor 3, dem Pyrolysator. Die Brüden gelangen über die Leitung 40 und den Überhitzer 41 als Wirbelgas in den Wirbelschichtreaktor 3. An dieser Stelle kann auch problemlos Sauerstoff 41 beigegeben werden. Eine zusätzliche Heizung des Wirbelschichtreaktors 3 ist aber nur erforderlich, wenn in diesem Reaktor zur weiteren Produktverbesserung eine weitergehende Umsetzung des Kohlenstoffs angestrebt wird.

Ist in der eingespeisten Biomasse mehr Wasser enthalten als für den Prozess erforderlich ist, kann es über den Kondensator 37 und den Kondensatabscheider 38 entfernt werden. Dieser Bypass wird vom Ventil 39 gesteuert und sollte

nur der Feinabstimmung dienen. Die Biomasse sollte möglichst vor der Einschleusung in den Prozess durch Mischen, Abpressen und/oder Trocknen auf den optimalen Wassergehalt aufbereitet werden.

5

Dieser zusätzliche Kreislauf eignet sich für die abschließende Trocknung und der weiteren Vorwärmung der Biomasse bis knapp unterhalb der Zersetzungstemperatur von ca. 280°C. Ein zusätzlicher Kreislauf ist besonders
10 vorteilhaft, wenn der Prozess unter einem hohen Druck, beispielsweise bei 30 bar, betrieben werden soll.

15

In Fig. 3 wird eine Kaskade von vier Wirbelschichtreaktoren 45, 46, 47 und 48 gezeigt. Diese Kaskadierung allein
ermöglicht schon eine hohe Produktqualität. Der Produktstrom aus Gas und Koks wird hier nach dem Wirbelschichtreaktor 46 mittels Prallblech 57a auf den Abscheider 49 umgelenkt. Der Koks wird durch Leitung 50 dem Wirbelschichtreaktor 47
20 zugeführt. Das partikelfreie Gas in Leitung 51 kann nun ohne Rücksicht auf eine Ascheerweichung erhitzt werden, beispielsweise durch das elektrische Heizregister 52. Zur weiteren Unterstützung der Teerspaltung kann unterhalb des Wirbelschichtreaktors 47 ein nickelbasiertes Katalysatorbett 53 angeordnet sein, beispielsweise in Form von an sich
25 bekannten Waben. Zur Auffrischung der Katalysatoraktivität ist es zweckmäßig, eine Vielzahl von Rohren 56 mit Düsen anzuordnen. Mit abwechselnden Dampfstößen aus einem der Rohre 56 ist eine Auffrischung während des Betriebes möglich. Für den Fall, dass Biomasse mit einem sehr niedrigen
30 Ascheerweichungspunkt genutzt werden soll, ist es zweckmäßig, dem erhitzten Gas durch die Leitung 55 abgekühltes Synthesegas oder ein anderes kühles Gas aus einem

nachgeordneten Prozess zuzumischen. Methanhaltige Gase aus einem nachgeordneten Prozess sollten besser an der Stelle 54, also vor dem Katalysatorbett zugeführt werden, damit das Methan gespalten werden kann. Die Erhitzungssektion ist hier in der Mitte der Kaskade angeordnet. Diese Sektion kann je nach Temperaturführung auch an anderer Stelle angeordnet sein. Die gezeigte Anordnung zielt auf einen hohen Kohlenstoffumsatz bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen.

Der Kaskade aus Wirbelschichtreaktoren wird vorgeheizte Biomasse durch eine Fördereinrichtung 42 und erhitzte Brüden durch Leitung 40 zugeführt, wie in Fig.2 dargestellt. Der untere Wirbelschichtreaktor 45 kann in Heizeinrichtung 7 mit Prozesswärme geheizt werden, muss aber nicht unbedingt. Eine Heizung ist jedoch zur Inbetriebnahme vorteilhaft. Die nachgeordneten Wirbelschichtreaktoren 46, 47 und 48 sollten vorzugsweise mit einer Elektroheizung 12 geheizt werden. An den mit 44 bezeichneten Stellen kann Sauerstoff zugegeben werden, muss aber nicht. Sauerstoff erhöht in einer Wasserstoffwirtschaft nur den durchschnittlichen Stromanteil der Nutzenergie beim Endkunden. Auf die Effizienz hat Sauerstoff fast keinen Einfluss.

Fig. 4 zeigt eine erfindungsgemäße Vorrichtung, die mit Fig. 3 fast identisch ist. Der Unterschied besteht nur darin, dass das Gas nach der Abtrennung des Kokes eine Heißgasreinigungsstufe 60 durchläuft. Als Katalysatoren, die eine gute Reinigungswirkung für Schwefel haben, sind vor allem Metalloxide geeignet. Um eine Regeneration auch während des Betriebes zu ermöglichen, sollte die Gasreinigung vorzugsweise doppelt ausgeführt sein. Eine Heißgasreinigung ist für Biomasse mit hohem Schwefelgehalt vorteilhaft, weil

dann das Katalysatorbett 53 schon bei niedrigeren Temperaturen eine hohe Wirksamkeit und lange Standzeit aufweist. Für die Heißgasreinigung sollte das Gas vorzugsweise auf Temperaturen unter 600°C abgekühlt werden.

5 Das kann dadurch geschehen, dass ein Teil der Brüden aus Leitung 40 mit dem Ventil 58 auf den Kühler 59 umgelenkt werden. Auf die Effizienz hat die Abkühlung des Gases mit Kühler 59 praktisch keinen Einfluss. Es ändert sich nur die Temperaturstaffelung in der Kaskade der
10 Wirbelschichtreaktoren und die jeweils einzukoppelnde Menge der Elektroenergie.

Fig. 5 zeigt eine Anordnung ähnlich wie Fig. 3. Das Katalysatorbett ist hier aber ersetzt durch eine Vielzahl von
15 Elektroden 68, zwischen denen elektronisch Entladungen in wechselnden Richtungen und kurzen Abständen ausgelöst werden. Das Gas wird dadurch teilweise in den Plasmazustand versetzt. Die entstehenden Radikale spalten alle Kohlenwasserstoffe mit denen sie in Kontakt kommen in Kohlenstoff (Crackruß) und
20 Wasserstoff, die dann unmittelbar oder im nachgeordneten Wirbelschichtreaktor 47 in Synthesegas umgewandelt werden. Das „Blitzgewitter“ erzeugt hohe Turbulenzen im Gas, die eine hohe Reaktionsrate zur Folge haben. Mit der Plasmaerzeugung ist auch eine Temperaturerhöhung verbunden, die an sich schon
25 eine Spaltung der Teere bewirkt. Die Plasmaheizung ist also eine besonders wirksame Form der Teerzerstörung. Eine Alterung oder Vergiftung, wie bei einem Katalysatorbett, wird auf diese Weise umgangen.

30 Der Ersatz und der Austausch des Bettmaterials kann, wie erwähnt, für jeden Wirbelschichtreaktor gesondert durch an sich bekannte Vorrichtungen vorgenommen werden. Eine

vorteilhafte Lösung besteht darin, der Biomasse eine geringe Menge Sand beizugeben und den Sand nur am heißesten Wirbelschichtreaktor 48 abzuziehen. Der Abzug kann beispielsweise mit einer Schnecke 69 erfolgen. Der durch

5 Versinterungen vergrößerte Sand wird dann von einem Sieb 64 abgetrennt und über Schleusen ausgeschleust. Der unverbrauchte Sand wird dann dem untersten

Wirbelschichtreaktor 45 beispielsweise durch eine pneumatische Förderanlage zugeführt. Zur Vermeidung von

10 Stößen durch eine überfüllte Wirbelschicht, ist es zweckmäßig, die Düsenböden 4 mit Rohren 61 auszustatten, die etwas in den Freiraum 6 hineinragen und abgeschrägt sind. Zur Vermeidung des Sandrückflusses bei Stillstand der Anlage können Prallteller 62 oder radiale Bohrungen angeordnet

15 werden. Das Sandbettmanagement eignet sich besonders für Wirbelschichtreaktoren, die im Grenzbereich von der stationären zur zirkulierenden Wirbelschicht betrieben werden.

20 Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt, vielmehr ergeben sich für den Fachmann im Rahmen der Erfindung vielfältige Abwandlungs- und Modifikationsmöglichkeiten. Insbesondere wird der Schutzzumfang der Erfindung durch die Ansprüche festgelegt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von teerarmem Synthesegas aus Biomasse, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- 5 a) die Biomasse in mindestens einem ersten Wirbelschichtreaktor in mindestens die Komponenten Pyrolysegas und Pyrolysekoks zerlegt wird,
- b) das im ersten Wirbelschichtreaktor erzeugte Gas als Wirbelgas mindestens einem nachfolgenden
- 10 Wirbelschichtreaktor zugeführt wird,
- c) der Pyrolysekoks in feinen Partikeln mit dem Gas ausgetragen und dem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor zugeführt wird.

15 2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gas vor Eintritt in den nachfolgenden Wirbelschichtreaktor erwärmt wird.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kokspartikel aus dem Gas abgetrennt, und dem nachfolgendem Wirbelschichtreaktor auf getrenntem Wege zugeführt werden.

20

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gas durch elektrische Energie mindestens teilweise in den Plasmazustand überführt wird.

25

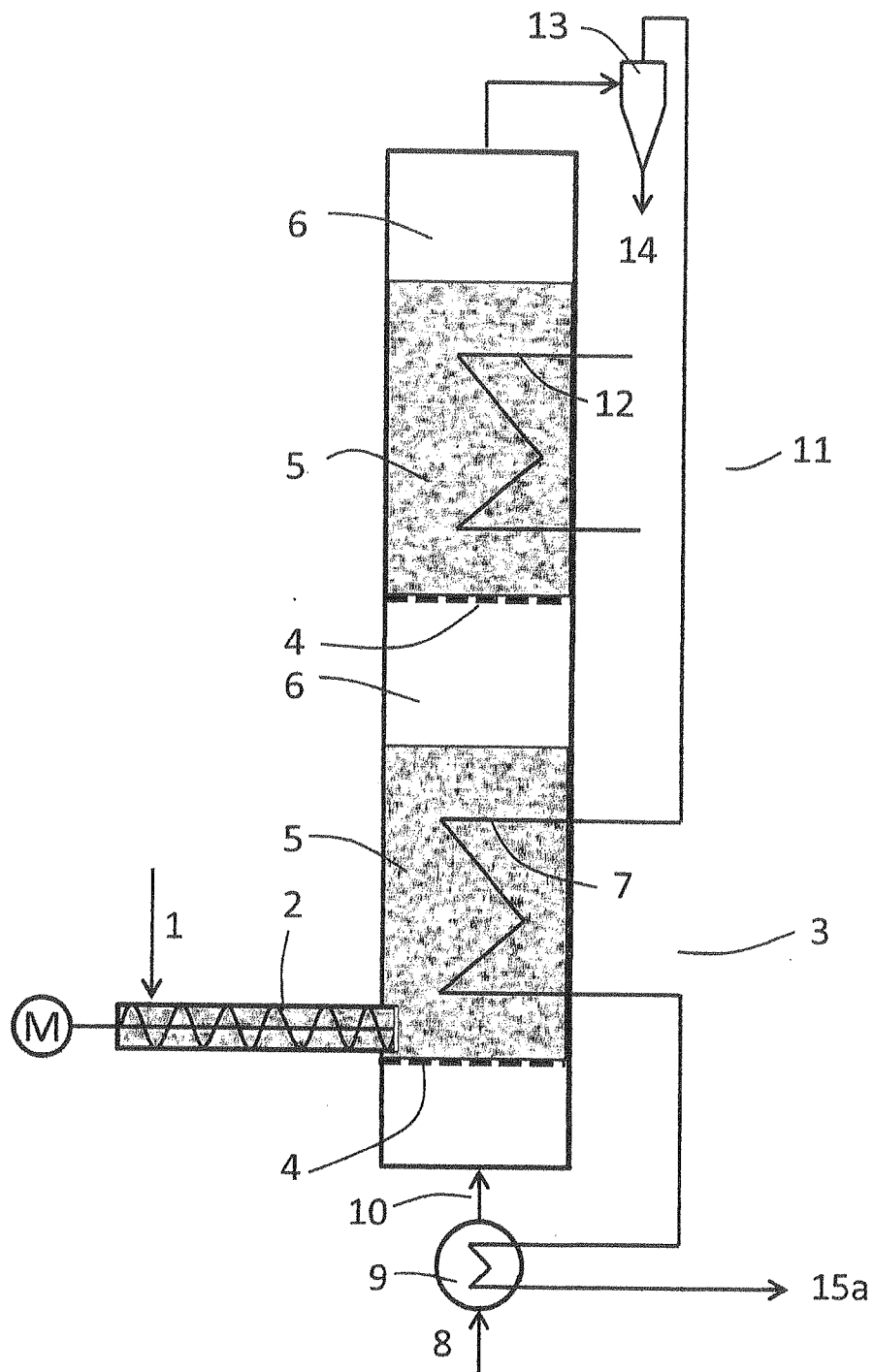
5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gas ein Katalysatorbett durchströmt.

30

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gas im Wesentlichen von Schadstoffen befreit wird.
- 5
7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens zwei Wirbelschichtreaktoren übereinander angeordnet sind.
- 10
8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Biomasse vor Eintritt in den ersten Wirbelschichtreaktor getrocknet wird.
- 15
9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Trocknung in einer Trocknungsvorrichtung erfolgt, welche einen Brüdenkreislauf mit Wärmetauscher aufweist, wobei die Brüden dem ersten Wirbelschichtreaktor als Wirbelgas zugeführt werden.
- 20
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Biomasse vor dem Trocknen vorgewärmt wird.
- 25
11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorwärmung der Biomasse in einer Vorwärmvorrichtung erfolgt, die einen Gaskreislauf mit Wärmetauscher aufweist, wobei das Gas der Trocknungsvorrichtung zugeführt wird.
- 30
12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Vorwärmvorrichtung Kohlendioxid (CO₂) aus einem Prozess zur Weiterverarbeitung des Synthesegases zugeführt wird.

13. Vorrichtung zur Herstellung von Synthesegas nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung mindestens einen ersten Wirbelschichtreaktor und mindestens einen nachfolgenden Wirbelschichtreaktor aufweist, wobei die Wirbelschichtreaktoren ausgelegt sind, dass (a) im ersten Wirbelschichtreaktor mindestens ein Gas erzeugt wird, welches dem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor als Wirbelgas zugeführt und (b) im ersten Wirbelschichtreaktor Pyrolysekoks erzeugt wird, der in feinen Partikeln mit dem Gas ausgetragen und dem nachfolgenden Wirbelschichtreaktor zugeführt wird.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung ein Mittel zum Erwärmen des Gases vor Eintritt in den nachfolgenden Wirbelschichtreaktor umfasst.
15. Vorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass dem ersten Wirbelschichtreaktor eine Vorrichtung zur Trocknung der Biomasse vorgeschaltet ist.
16. Vorrichtung nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Trocknungsvorrichtung einen Brüdenkreislauf mit Wärmetauscher aufweist.
17. Vorrichtung nach Anspruch 15 oder 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Trocknungsvorrichtung eine Vorrichtung zum Vorwärmen der Biomasse vorgeschaltet ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorwärmvorrichtung einen Gaskreislauf mit Wärmetauscher aufweist.

**Fig. 1**

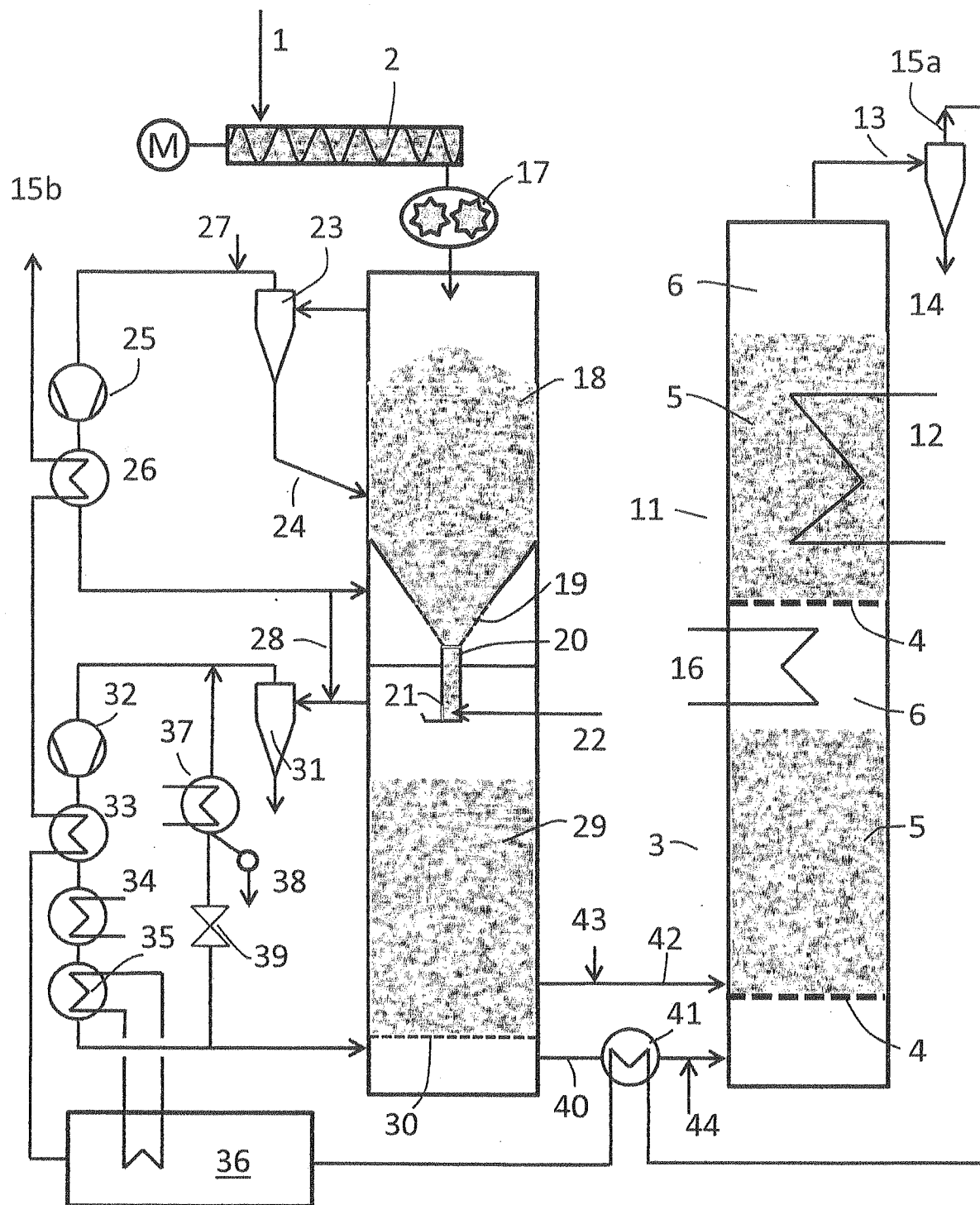


Fig. 2

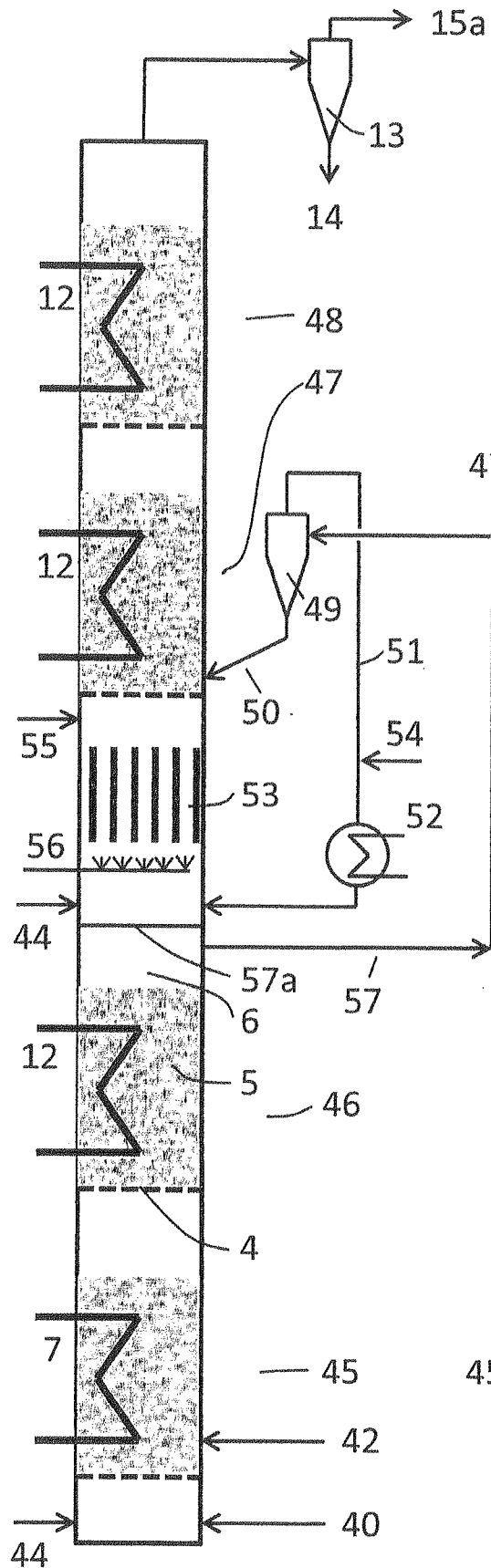


Fig. 3

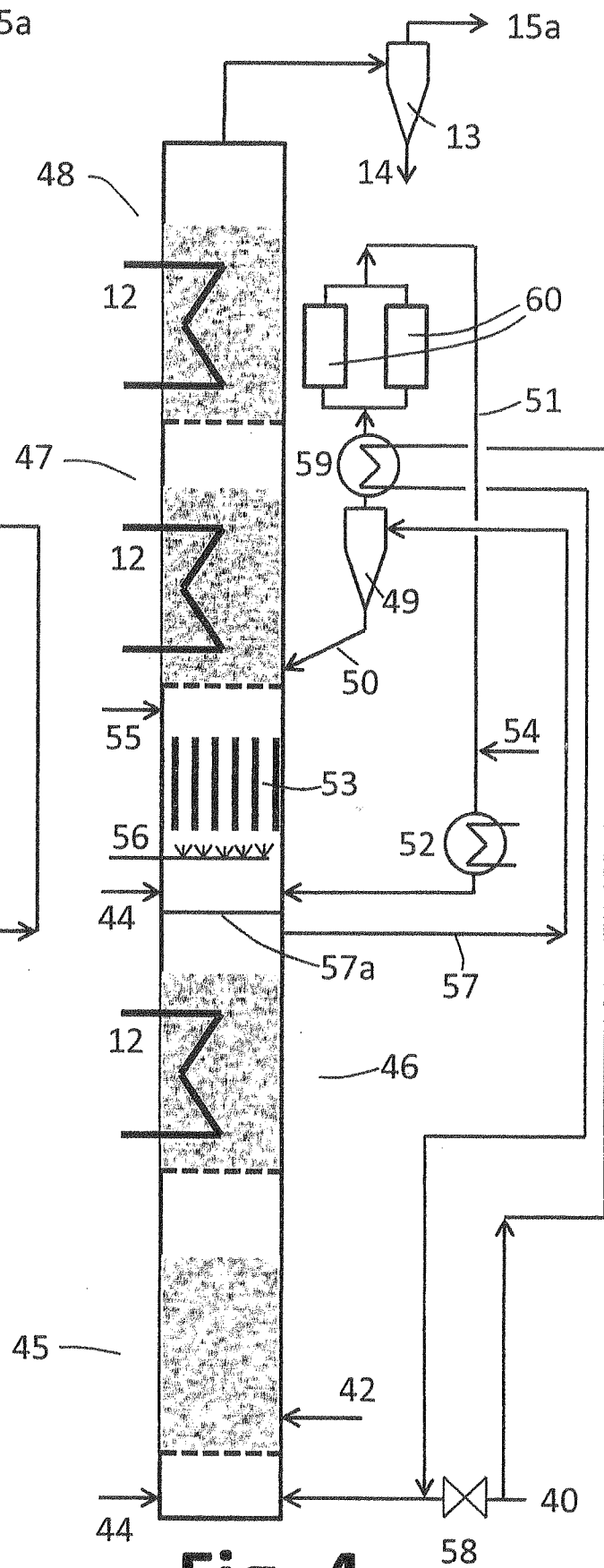
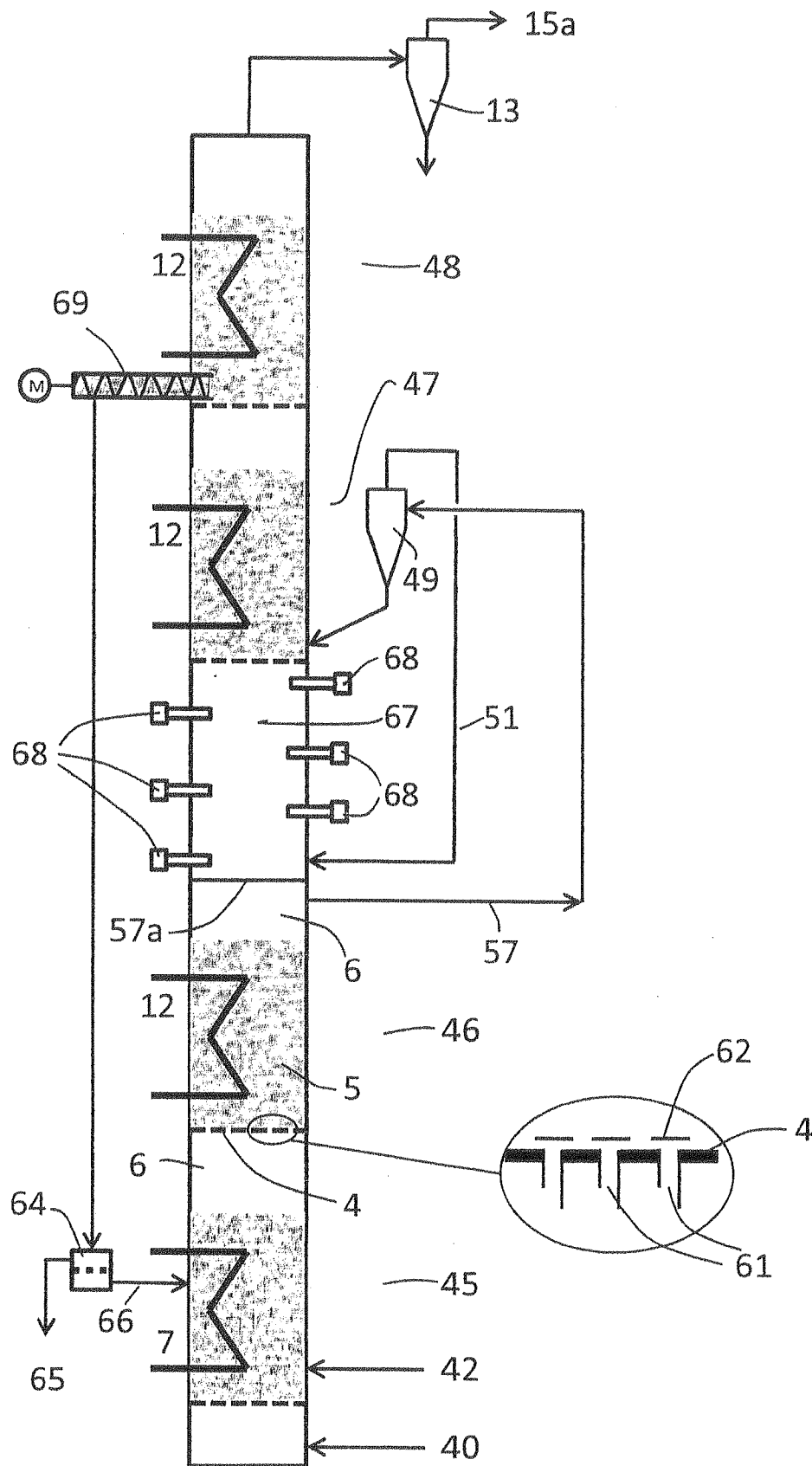


Fig. 4

**Fig. 5**