



(11)

EP 4 353 801 A1

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
17.04.2024 Patentblatt 2024/16

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):  
**C10B 47/18** (2006.01)      **C10B 53/00** (2006.01)  
**C10B 53/02** (2006.01)

(21) Anmeldenummer: 22201673.5

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):  
**C10B 47/18; C10B 53/02**

(22) Anmeldetag: 14.10.2022

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB  
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL  
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA**  
Benannte Validierungsstaaten:  
**KH MA MD TN**

(71) Anmelder:  
• **Bayernoil Raffineriegesellschaft mbH**  
93333 Neustadt a.d. Donau (DE)

- **MarTech GmbH**  
93185 Michelsneukirchen (DE)

(72) Erfinder: **Artmann, Michael**  
93185 Michelsneukirchen (DE)

(74) Vertreter: **Lucke, Andreas**  
**Boehmert & Boehmert**  
Anwaltspartnerschaft mbB  
Pettenkoferstrasse 22  
80336 München (DE)

## (54) REAKTORVORRICHTUNG ZUR HERSTELLUNG EINES PYROLYSEPRODUKTS

(57) Die Erfindung betrifft eine Reaktorvorrichtung zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermo-chemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials sowie ein Verfahren zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts unter Verwendung einer solchen Reaktorvorrichtung. Die Reaktorvorrichtung weist eine Reaktorkammer sowie eine Vielzahl von Heizelementen auf. Die Reaktorkammer weist eine oder mehrere Zuführöffnungen zum Zuführen des Ausgangsmaterials in einem ersten Bereich der Reaktorkammer und eine oder mehrere Entnahmehöhlen zum Entnehmen von thermisch behandeltem Material in einem zweiten Bereich der Reaktorkammer auf. Die Heizelemente sind voneinander beabstandet in der Reaktorkammer angeordnet und erstrecken sich von dem ersten Bereich in den zweiten Bereich der Reaktorkammer. Die Reaktorvorrichtung ist dazu eingerichtet, das zu behandelnde Material im Laufe der thermochemischen Behandlung von dem ersten Bereich der Reaktorkammer entlang der Heizelemente in den zweiten Bereich zu bewegen und dabei mittels der Heizelemente im ersten Bereich der Reaktorkammer befindliches zu behandelndes Material auf eine erste Temperatur zu erhitzen und gleichzeitig im zweiten Bereich der Reaktorkammer befindliches zu behandelndes Material auf eine zweite Temperatur zu erhitzen, welche höher als die erste Temperatur ist.

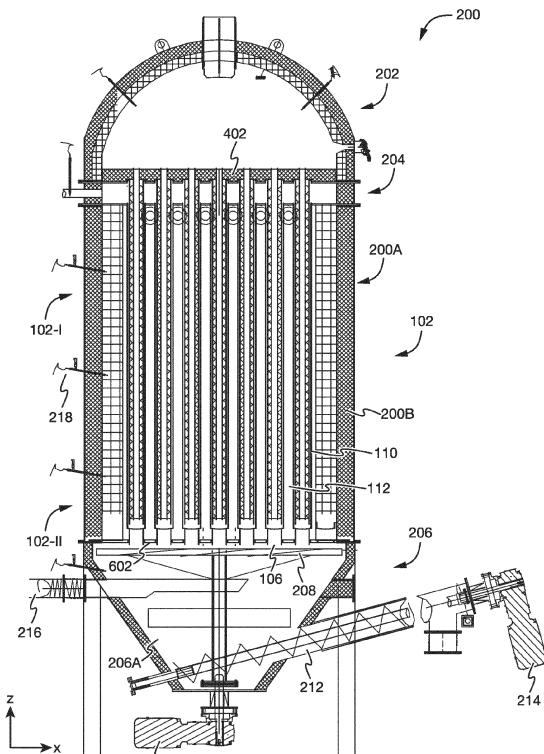


Fig. 2a

## Beschreibung

### TECHNISCHES GEBIET DER ERFINDUNG

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft die thermochemische Umwandlung von kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien in Pyrolyseprodukte, insbesondere Biokraftstoffe, und stellt eine Reaktorvorrichtung zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts sowie ein zugehöriges Herstellungsverfahren bereit.

### HINTERGRUND DER ERFINDUNG

**[0002]** Kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterialien wie beispielsweise Klärschlamm oder Biomasse können mittels thermochemischer Umwandlungsverfahren wie etwa pyrolytischer Zersetzung umgewandelt werden. Entsprechende Verfahren sind zum Beispiel aus der DE 10 2014 105 340 A1, der DE 10 2015 108 552 A1 und der DE 10 2016 115 700 A1 bekannt. Als Produkte eines solchen Prozesses, der üblicherweise im Wesentlichen unter Ausschluss von Sauerstoff durchgeführt wird, können beispielsweise flüssiges Pyrolyseöl, fester Pyrolysekoks sowie gasförmiges Pyrolysegas entstehen. Die relativen Anteile dieser Pyrolyseprodukte sowie deren Zusammensetzung können dabei durch Wahl von Prozessparametern wie beispielsweise der Pyrolysetemperatur und/oder der Dauer der Pyrolyse beeinflusst werden. Die so gewonnenen Pyrolyseprodukte können zum Beispiel als Brennstoff, insbesondere als Biokraftstoff, und/oder als Dünger verwendet werden.

**[0003]** Aufgrund der für die pyrolytische Zersetzung erforderlichen hohen Temperaturen und der damit einhergehenden starken Temperaturgradienten sind die Bestandteile von Anlagen zur Durchführung eines solchen Umwandlungsverfahrens erheblichen thermischen Belastungen ausgesetzt. Diese thermischen Belastungen können zu Beschädigungen wie zum Beispiel undichten Stellen führen, weshalb die Lebensdauer solcher Anlagen häufig unzureichend ist. Zwar kann das Design einer solchen Anlage im Hinblick auf die auftretenden thermischen Belastungen optimiert werden, dies ist jedoch oft nur für bestimmte Abmessungen und/oder Konfigurationen möglich. Die aus dem Stand der Technik bekannten Anlagen weisen daher den Nachteil auf, dass die Anlagen in aller Regel kaum skalierbar sind. Dies stand bisher einer Anwendung solcher Umwandlungsverfahren im größeren Maßstab entgegen.

### DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

**[0004]** Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, eine verbesserte Reaktorvorrichtung zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials bereitzustellen, die in ihrer Größe skalierbar ist und eine ausreichende Lebensdauer aufweist.

**[0005]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ei-

ne Reaktorvorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie ein Verfahren zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts unter Verwendung einer solchen Reaktorvorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 13 gelöst. Beispielhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

**[0006]** Es wird eine Reaktorvorrichtung zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials vorgesehen, die eine Reaktorkammer sowie eine Vielzahl von Heizelementen aufweist, welche voneinander beabstandet in der Reaktorkammer angeordnet sind. Die Reaktorkammer weist einen ersten Bereich und einen zweiten Bereich auf. In dem ersten Bereich sind eine oder mehrere Zuführöffnungen zum Zuführen des Ausgangsmaterials angeordnet. In dem zweiten Bereich sind eine oder mehrere Entnahmeöffnungen zum Entnehmen von thermochemisch behandeltem Material angeordnet. Die Heizelemente erstrecken sich jeweils von dem ersten Bereich in den zweiten Bereich der Reaktorkammer. Die Reaktorvorrichtung ist dazu eingerichtet, das zu behandelnde Material im Laufe der thermochemischen Behandlung von dem ersten Bereich der Reaktorkammer entlang der Heizelemente in den zweiten Bereich zu bewegen. Die Reaktorvorrichtung ist ferner dazu eingerichtet, dabei mittels der Heizelemente im ersten Bereich der Reaktorkammer befindliches zu behandelndes Material auf eine erste Temperatur zu erhitzten und gleichzeitig im zweiten Bereich der Reaktorkammer befindliches zu behandelndes Material auf eine zweite Temperatur zu erhitzten, wobei die zweite Temperatur höher als die erste Temperatur ist.

**[0007]** Die Reaktorvorrichtung kann beispielsweise zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens verwendet werden. Das Pyrolyseprodukt kann zum Beispiel ein Pyrolyseöl, ein Pyrolysegas, ein Pyrolysekoks oder eine Kombination davon sein. Wie im Folgenden genauer ausgeführt kann die Herstellung des Pyrolyseprodukts beispielsweise eine Umwandlung eines noch nicht pyrolysierten Ausgangsmaterials und/oder eine Nachbehandlung eines bereits pyrolysierten Ausgangsmaterials und/oder eines durch Pyrolyse des Ausgangsmaterials gewonnenen Zwischenmaterials umfassen. Das kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterial kann beispielsweise ein biogenes Ausgangsmaterial wie etwa Klärschlamm, Biomasse, Gülle, Mist, Stroh, Papier und/oder Pappe sein.

**[0008]** Eine thermochemische Behandlung im Sinne der vorliegenden Offenbarung kann beispielsweise eine oder mehrere chemische Reaktionen umfassen, welche durch Zufuhr von Wärme initiiert und/oder angetrieben werden. Die thermochemische Behandlung kann eine thermochemische Umwandlung des Ausgangsmaterials in ein oder mehrere Umwandlungsprodukte umfassen, insbesondere die teilweise oder vollständige Pyrolyse (pyrolytische Zersetzung) des Ausgangsmaterials in ein oder mehrere Pyrolyseprodukte. Alternativ oder zusätzlich kann die thermochemische Behandlung eine ther-

mochemische Nachbehandlung, zum Beispiel eine Veredelung oder Reformierung (reforming), eines teilweise oder vollständig pyrolysierten Materials umfassen, beispielsweise eines bereits teilweise oder vollständig pyrolysierten Ausgangsmaterials und/oder eines mittels der thermochemischen Behandlung aus dem Ausgangsmaterial gewonnenen teilweise oder vollständig pyrolysierten Zwischenmaterials (z.B. eines Umwandlungsprodukts). Die thermochemische Behandlung kann vollständig oder weitgehend unter Ausschluss von Sauerstoff stattfinden.

**[0009]** Die Reaktorkammer ist dazu eingerichtet, die thermochemische Behandlung des Ausgangsmaterials in einem von der Reaktorkammer umschlossenen Reaktionsvolumen durchzuführen. Die Reaktorkammer kann dazu ausgelegt sein, den für die thermochemische Behandlung erforderlichen Temperaturen und/oder Drücken Stand zu halten.

**[0010]** Der erste und der zweite Bereich können zum Beispiel Abschnitte oder Segmente der Reaktorkammer sein. Der erste und der zweite Bereich können aneinander angrenzen und insbesondere kontinuierlich ineinander übergehen. Anders ausgedrückt müssen der erste und der zweite nicht notwendigerweise strukturell oder baulich voneinander abgegrenzt sein. Der erste und der zweite Bereich können beispielsweise lediglich gedanklich voneinander abgegrenzte Abschnitte oder Segmente der Reaktorkammer sein (z.B. durch eine gedachte oder "virtuelle" Trennebene voneinander abgegrenzte Abschnitte oder Segmente). In einigen Ausgestaltungen kann der erste Bereich der Reaktorkammer oberhalb des zweiten Bereichs angeordnet sein, d.h. der erste Bereich kann ein oberer Bereich (zum Beispiel eine obere Hälfte) der Reaktorkammer sein und der zweite Bereich kann ein unterer Bereich (zum Beispiel eine untere Hälfte) der Reaktorkammer sein.

**[0011]** Der erste und der zweite Bereich der Reaktorkammer können die gleichen Abmessungen senkrecht zu einer Richtung vom ersten Bereich zum zweiten Bereich (zum Beispiel senkrecht zur Bewegungsrichtung des zu behandelnden Materials und/oder zu einer Längsrichtung der Heizelemente, im Folgenden auch als laterale Abmessungen bezeichnet) haben, zum Beispiel die gleiche Breite, den gleichen Innendurchmesser und/oder die gleiche Querschnittsfläche. Die Reaktorkammer kann beispielsweise im ersten Bereich, zwischen dem ersten und dem zweiten Bereich sowie im zweiten Bereich durchgängig die gleichen lateralen Abmessungen haben. In manchen Beispielen weist die Reaktorkammer zwischen den Zuführöffnungen und den Entnahmefüßen, in einem Beispiel über ihre gesamte Länge bzw. Höhe, durchgängig die gleichen lateralen Abmessungen auf.

**[0012]** Die eine oder die mehreren Zuführungsöffnungen können beispielsweise in einer Seitenwand und/oder einer oberen Wand (z.B. einem Deckel) der Reaktorkammer angeordnet sein. Die eine oder die mehreren Entnahmefüßen können zum Beispiel in einer Seiten-

wand und/oder einer unteren Wand (z.B. einem Boden) der Reaktorkammer angeordnet sein. Die Reaktorkammer kann beispielsweise ein Volumen zwischen 0.1 m<sup>2</sup> und 1000 m<sup>2</sup> umschließen, in manchen Beispielen zwischen 1 m<sup>2</sup> und 100 m<sup>2</sup>, in einem Beispiel zwischen 2 m<sup>2</sup> und 50 m<sup>2</sup>. Eine Höhe der Reaktorkammer in Richtung vom ersten Bereich zum zweiten Bereich kann beispielsweise zwischen 0.5 m und 20 m, in manchen Beispielen zwischen 1 m und 10 m, in einem Beispiel zwischen 1,5 m und 8 m in einem Beispiel zwischen 2 m und 5 m betragen.

**[0013]** Die Heizelemente sind voneinander beabstandet in der Reaktorkammer angeordnet, d.h. die Heizelemente sind durch Zwischenräume voneinander getrennt. Die Zwischenräume zwischen den Heizelementen können das Reaktionsvolumen für die thermochemische Behandlung des Ausgangsmaterials bilden. Anders ausgedrückt sind die Zwischenräume zwischen den Heizelementen so ausgestaltet, dass die Zwischenräume das zu behandelnde Material (z.B. das (unbehandelte) Ausgangsmaterial und/oder aus dem Ausgangsmaterial gewonnenes (teilweise behandeltes) Zwischenmaterial) und/oder das thermochemisch behandelte Material aufnehmen können. Die Zwischenräume können insbesondere so ausgestaltet sein, dass die Heizelemente (d.h. die in der Reaktorkammer befindlichen Teile der Heizelemente) vollständig von zu behandelndem Material und/oder thermochemisch behandelten Material umgeben sind, wenn die Reaktorkammer mit zu behandelndem Material und/oder thermochemisch behandeltem Material gefüllt ist. Die Heizelemente können in einer regelmäßigen Struktur, zum Beispiel in einer oder mehreren Reihen, angeordnet sein. Die Reaktorvorrichtung kann zum Beispiel mindestens zwei, mindestens drei oder mindestens vier Heizelemente aufweisen. Die Reaktorvorrichtung kann beispielsweise zwischen 5 und 500 Heizelementen, in manchen Beispielen zwischen 5 und 200 Heizelementen, in einem Beispiel zwischen 10 und 100 Heizelementen und in einem Beispiel zwischen 40 und 100 Heizelementen aufweisen.

**[0014]** Die Heizelemente erstrecken sich von dem ersten Bereich in den zweiten Bereich der Reaktorkammer. Die Heizelemente können sich durch die gesamte Reaktorkammer (zum Beispiel von einer Wand der Reaktorkammer zu einer gegenüberliegenden Wand) oder durch einen Teil der Reaktorkammer erstrecken. Die Heizelemente (z.B. ein erstes Ende der Heizelemente) können beispielsweise jeweils an einer Wand der Reaktorkammer (z.B. an einer oberen Wand/Deckel) angeordnet sein (z.B. mit dieser in Kontakt oder an dieser befestigt sein) und von einer gegenüberliegenden Wand der Reaktorkammer (z.B. einer unteren Wand/Boden) beabstandet sein (d.h. ein (zweites) Ende der Heizelemente kann von der gegenüberliegenden Wand beabstandet sein). Die Heizelemente können vollständig oder teilweise in der Reaktorkammer angeordnet sein (d.h. Teile der Heizelemente können sich auch außerhalb der Reaktorkammer befinden). Die Heizelemente können beispielsweise

eine Länge in Richtung von dem ersten Bereich zu dem zweiten Bereich der Reaktorkammer zwischen 1 m und 20 m, in manchen Beispielen zwischen 1 m und 10 m aufweisen, in einem Beispiel zwischen 2 m und 5 m. Eine Breite oder ein Durchmesser (z.B. ein Außendurchmesser) der Heizelemente kann zum Beispiel zwischen 1 cm und 50 cm, in manchen Beispielen zwischen 2 cm und 30 cm, in einem Beispiel zwischen 5 cm und 15 cm betragen.

**[0015]** Die Heizelemente sind dazu eingerichtet, erhitzt zu werden und der Reaktorkammer Wärme zuzuführen, zum Beispiel um das Ausgangsmaterial für die thermochemische Behandlung zu erhitzen. Die Heizelemente können passive Heizelemente sein, die dazu eingerichtet sind, durch Zuführen eines erhitzten Wärmeträgermediums (z.B. eines Wärmeträgerfluids) erhitzt zu werden, zum Beispiel um Wärme von dem Wärmeträgermedium in die Reaktorkammer zu übertragen. Die passiven Heizelemente können beispielsweise so ausgestaltet sein, dass das Wärmeträgermedium sich durch die Heizelemente bewegen kann (z.B. die Heizelemente durchlaufen oder durchströmen kann). Alternativ oder zusätzlich können einige oder alle Heizelemente aktive Heizelemente sein, die dazu eingerichtet sind, selbst Wärme zu erzeugen, zum Beispiel elektrische Heizelemente.

**[0016]** Die Reaktorvorrichtung ist dazu eingerichtet, das zu behandelnde Material (d.h. das Ausgangsmaterial und/oder daraus gewonnenes (teilweise behandeltes) Zwischenmaterial) im Laufe der thermochemischen Behandlung von dem ersten Bereich der Reaktorkammer entlang der Heizelemente in den zweiten Bereich zu bewegen. Anders ausgedrückt verbleibt das zu behandelnde Material während der thermochemischen Behandlung nicht statisch in der Reaktorkammer, sondern wird von der Reaktorvorrichtung in dieser, insbesondere durch diese bewegt. Die Bewegung des zu behandelnden Materials kann kontinuierlich oder schrittweise (z.B. durch wiederholtes Bewegen in mehreren Schritten) erfolgen. Die Bewegung des zu behandelnden Materials kann gerichtet oder unidirektional erfolgen, d.h. das zu behandelnde Material kann sich im Wesentlichen nur in Richtung des zweiten Bereichs bewegen, ohne dass ein Rücktransport in Richtung des ersten Bereichs erfolgt.

**[0017]** Die Reaktorvorrichtung kann dazu eingerichtet sein, dass zu behandelnde Material aktiv zu bewegen, zum Beispiel von dem ersten Bereich in Richtung des zweiten Bereichs zu schieben oder zu pressen. Hierzu kann die Reaktorvorrichtung eine oder mehrere Fördervorrichtungen wie zum Beispiel Förderschnecken aufweisen. Vorzugsweise sind die Fördervorrichtungen in Bewegungsrichtung des zu behandelnden Materials vor oder hinter den Heizelementen angeordnet, zum Beispiel vor oder hinter der Reaktorkammer. Anders ausgedrückt können entlang der Heizelemente, zum Beispiel parallel zu den Heizelementen, keine Fördervorrichtungen angeordnet sein. Bevorzugt erfolgt die Bewegung des zu behandelnden Materials zumindest teilweise passiv, ins-

besondere wie unten genauer ausgeführt zumindest teilweise aufgrund der Gravitation, zum Beispiel durch kontinuierliche oder schrittweise (z.B. wiederholte) Entnahme von thermochemisch behandeltem Material aus der Reaktorkammer.

**[0018]** Die Reaktorvorrichtung ist ferner dazu eingerichtet, dabei (z.B. während das zu behandelnde Material im Laufe der thermochemischen Behandlung vom ersten Bereich in den zweiten Bereich bewegt wird) mittels der Heizelemente im ersten Bereich der Reaktorkammer befindliches zu behandelndes Material auf eine erste Temperatur zu erhitzen und gleichzeitig im zweiten Bereich der Reaktorkammer befindliches zu behandelndes Material auf eine zweite Temperatur zu erhitzen. Die zweite Temperatur ist höher als die erste Temperatur. Die unterschiedlichen Temperaturen des zu behandelnden Materials können zum Beispiel aus der Bewegung des zu behandelnden Materials (z.B. aus der unterschiedlich langen Aufenthaltsdauer in der Reaktorkammer) und/oder aus unterschiedlichen Temperaturen der Heizelemente im ersten und im zweiten Bereich der Reaktorkammer resultieren. Anders ausgedrückt kann die Reaktorvorrichtung dazu eingerichtet sein, die Heizelemente im ersten und im zweiten Bereich der Reaktorkammer auf unterschiedliche Temperaturen zu erhitzen, während das zu behandelnde Material bewegt wird. In einigen Ausgestaltungen kann die Reaktorvorrichtung dazu eingerichtet sein, das zu behandelnde Material in der Reaktorkammer so zu erhitzen, dass die Temperatur des zu behandelnden Materials vom ersten Bereich in den zweiten Bereich, in einem Beispiel entlang der gesamten Reaktorkammer, im Wesentlichen linear ansteigt.

**[0019]** Die Heizelemente können so ausgestaltet sein, dass die Heizelemente jeweils im ersten und im zweiten Bereich der Reaktorkammer auf unterschiedliche Temperaturen erhitzt werden können (d.h. so dass die Heizelemente jeweils im ersten und im zweiten Bereich zum gleichen Zeitpunkt unterschiedliche Temperaturen aufweisen), zum Beispiel um das in den zwei Bereichen der Reaktionskammer befindliche Material auf unterschiedliche Temperaturen zu erhitzen.

**[0020]** Dies kann bei passiven Heizelementen beispielweise durch eine geeignete Führung des Wärmeträgermediums erreicht werden, etwa wie im Folgenden ausgeführt, indem das erhitzte Wärmeträgermedium an einem vom ersten Bereich abgewandten (zweiten) Ende des betreffenden Heizelements eingeleitet wird und nach Durchlaufen des Heizelements an einem vom zweiten Bereich abgewandten (ersten) Ende des betreffenden Heizelements abgeführt wird. Alternativ kann das erhitzte Wärmeträgermedium wie ebenfalls im Folgenden genauer ausgeführt im Inneren des betreffenden Heizelements vom ersten zum zweiten Ende eingeleitet und anschließend im Gegenstrom in einem äußeren Bereich des betreffenden Heizelements vom zweiten zum ersten Ende zurückgeleitet werden. Bei aktiven elektrischen Heizelementen kann dies beispielsweise durch eine geeignete Anordnung und/oder Ausgestaltung der Heizwe-

dein erreicht werden.

**[0021]** Die Heizelemente können dazu eingerichtet sein, im ersten Bereich auf eine erste Heizelement-Temperatur erhitzt zu werden und gleichzeitig im zweiten Bereich auf eine zweite Heizelement-Temperatur erhitzt zu werden, die größer als die erste Heizelement-Temperatur ist. Die erste Heizelement-Temperatur kann gleich der oder größer als die erste Temperatur des zu behandelnden Materials sein. Die zweite Heizelement-Temperatur kann gleich der oder größer als die zweite Temperatur des zu behandelnden Materials sein. In einigen Beispielen sind die Heizelemente dazu eingerichtet, so erhitzt zu werden, dass die Temperatur entlang des Heizelements im Wesentlichen linear ansteigt, zum Beispiel von der ersten Heizelement-Temperatur auf die zweite Heizelement-Temperatur.

**[0022]** In einigen Ausgestaltungen kann die Reaktorvorrichtung dazu eingerichtet sein, ein erhitztes Wärmeträgermedium (z.B. ein erhitztes Wärmeträgerfluid) entgegen der Bewegungsrichtung des zu behandelnden Materials durch die Heizelemente zu leiten, d.h. im Gegenstrom zu dem zu behandelnden Material von dem zweiten Bereich der Reaktorkammer in den ersten Bereich. Die Reaktorvorrichtung kann zum Beispiel dazu eingerichtet sein, das Wärmeträgermedium von den zweiten Enden der Heizelemente zu den ersten Enden der Heizelemente zu leiten. Das Wärmeträgermedium (und somit die Heizelemente) kann im zweiten Bereich der Reaktorkammer eine höhere Temperatur als im ersten Bereich haben.

**[0023]** Die Heizelemente können jeweils ein doppelwandiges Rohr aufweisen, das ein Innenrohr und ein das Innenrohr umgebende Außenrohr umfasst. Das Innen- und das Außenrohr können beispielsweise als zylindrische Rohre ausgebildet sein. Das Innenrohr kann zumindest teilweise in dem Außenrohr aufgenommen sein, zum Beispiel in dieses eingesteckt oder eingeführt sein. Zwischen dem Innenrohr und dem Außenrohr kann sich ein Zwischenraum (zum Beispiel ein Spalt) befinden. Anders ausgedrückt kann die Außenseite des Innenrohr von der Innenseite des Außenrohrs beabstandet sein. Der Zwischenraum kann sich in Umfangsrichtung vollständig um das Innenrohr herum erstrecken. In manchen Ausgestaltungen kann das Innenrohr nicht mit dem Außenrohr in Kontakt sein. Vorzugsweise ist das Innenrohr gegenüber dem Außenrohr thermisch isoliert, zum Beispiel durch Vorsehen einer Isolationsschicht auf einer Innen- und/oder Außenseite des Innenrohrs. In manchen Ausgestaltungen kann das Innenrohr als doppelwandiges Rohr ausgebildet sein und zum Beispiel ein inneres Innenrohr und ein äußeres Innenrohr aufweisen, wobei das innere Innenrohr zumindest teilweise in dem äußeren Innenrohr aufgenommen ist und das äußere Innenrohr zumindest teilweise in dem Außenrohr aufgenommen ist (d.h. die Heizelemente können jeweils ein dreiwandiges Rohr aufweisen). Die Isolationsschicht kann zwischen dem inneren Innenrohr und dem äußeren Innenrohr angeordnet sein.

**[0024]** Das Innenrohr kann an einem ersten Ende des betreffenden Heizelements, insbesondere an einem von dem zweiten Bereich der Reaktorkammer abgewandten ersten (z.B. oberen) Ende des betreffenden Heizelements, eine Einlassöffnung zur Einleitung des erhitzten Wärmeträgermediums (z.B. eines erhitzten Wärmeträgerfluids) aufweisen. Das Innenrohr kann zum Beispiel am ersten Ende offen sein. Der Zwischenraum zwischen dem Innen- und dem Außenrohr kann an einem dem ersten Ende gegenüberliegenden zweiten Ende des betreffenden Heizelements, insbesondere an einem von dem ersten Bereich der Reaktorkammer abgewandten zweiten (z.B. unteren) Ende des betreffenden Heizelements, mit dem Innenrohr in Fluidverbindung stehen. Dadurch kann das durch das Innenrohr eingeleitete Wärmeträgermedium durch den Zwischenraum vom zweiten Ende des betreffenden Heizelements in Richtung des ersten Endes (und somit entgegen der Bewegungsrichtung des zu behandelnden Materials) zurückgeleitet werden. Das Innenrohr kann zum Beispiel am zweiten Ende offen sein. Das Außenrohr kann eine Auslassöffnung zum Abführen des Wärmeträgermediums aufweisen, zum Beispiel am ersten Ende des betreffenden Heizelements. Somit kann das Wärmeträgermedium zum Beispiel an derselben Seite der Reaktorkammer eingeleitet und abgeführt werden.

**[0025]** Das erhitzte Wärmeträgermedium kann von der Einlassöffnung am ersten Ende des Heizelements durch das Innenrohr zum zweiten Ende des Heizelements geleitet werden und anschließend durch das Außenrohr (z.B. durch den Zwischenraum zwischen dem Außen- und dem Innenrohr) wieder zurück zum ersten Ende des Heizelements geleitet werden. Beim Zurückleiten durch das Außenrohr kann das Wärmeträgermedium über das Außenrohr Wärme in die Reaktorkammer übertragen. Das im Außenrohr zurückgeleitete Wärmeträgermedium kann im zweiten Bereich der Reaktorkammer eine höhere Temperatur als im ersten Bereich der Reaktorkammer haben. Das Wärmeträgermedium kann das Außenrohr im zweiten Bereich auf die zweiten Heizelement-Temperatur erhitzt und im ersten Bereich auf die (niedrigere) erste Heizelement-Temperatur.

**[0026]** Die Reaktorvorrichtung kann ferner eine Abführkammer zum Abführen des Wärmeträgermediums aufweisen. Die Abführkammer kann zum Beispiel an einer dem ersten Bereich der Reaktorkammer benachbarten Seite (z.B. einer Oberseite und/oder einer Stirnseite) der Reaktorkammer angeordnet sein. In einigen Beispielen kann die Abführkammer direkt an die entsprechende Seite (z.B. Wand) der Reaktorkammer angrenzen. Die Reaktorkammer und die Abführkammer können beispielsweise durch eine gemeinsame Zwischenwand voneinander getrennt sein. In manchen Beispielen können weitere Elemente zwischen der Abführkammer und der Reaktorkammer angeordnet sein, zum Beispiel eine thermische Isolationsschicht. In manchen Beispielen können die Reaktor- und die Abführkammer in einem gemeinsamen Reaktorgehäuse angeordnet sein, welches

zum Beispiel durch eine oder mehrere Zwischenwände in die Reaktor- und die Abführkammer unterteilt sein kann. Die Abführkammer kann mit den Heizelementen in Fluidverbindung stehen, zum Beispiel um das Wärmeträgermedium nach Durchlaufen der Heizelemente aufzunehmen. Beispielsweise können die Außenrohre der Heizelemente (z.B. die Zwischenräume zwischen den Innenrohren und den Außenrohren) jeweils am ersten Ende des betreffenden Heizelements mit der Abführkammer in Fluidverbindung stehen, zum Beispiel über eine entsprechende Auslassöffnung. Die Außenrohre der Heizelemente können zum Beispiel zur Abführkammer hin offen sein.

**[0027]** Die Heizelemente, insbesondere die Außenrohre der Heizelemente, können jeweils an einer Wand zwischen der Reaktorkammer und der Abführkammer befestigt sein, zum Beispiel an einer der Abführkammer zugewandten Wand der Reaktorkammer, an einer der Reaktorkammer zugewandten Wand der Abführkammer und/oder an einer gemeinsamen Zwischenwand zwischen der Reaktor- und der Abführkammer. Die Heizelemente (z.B. die Außenrohre) können beispielsweise mit der betreffenden Wand verschweißt sein. Vorzugsweise sind die Heizelemente (z.B. die Außenrohre) gasdicht mit der Wand verbunden, zum Beispiel um ein Ausstreiten von Gas aus der Reaktorkammer in die Heizelemente und/oder die Abführkammer oder umgekehrt zu verhindern.

**[0028]** Die Innenrohre der Heizelemente können sich jeweils durch die Abführkammer hindurch zu der betreffenden Einlassöffnung erstrecken. Hierzu kann die Abführkammer entsprechende Öffnungen aufweisen, um die Innenrohre aufzunehmen. Die Innenrohre können gegenüber der Abführkammer thermisch isoliert sein, zum Beispiel durch Vorsehen einer Isolationsschicht auf einer Innen- und/oder Außenseite der Innenrohre.

**[0029]** Die Innenrohre der Heizelemente können jeweils ein Halteelement zur Halterung des betreffenden Innenrohrs in der Reaktorkammer aufweisen. Die Innenrohre können beispielsweise mittels des Halteelements auf einer von der Reaktorkammer abgewandten Seite der Abführkammer herausnehmbar (oder entnehmbar) eingehängt und/oder aufgelegt sein, beispielsweise an/auf der Abführkammer selbst (zum Beispiel an/auf einer entsprechenden Wand der Abführkammer) oder an/auf einem auf der betreffenden Seite der Abführkammer angeordneten anderen Element der Reaktorvorrichtung. In manchen Ausgestaltungen können die Innenrohre nicht mit dem Außenrohr des betreffenden Heizelements verbunden sein, sondern zum Beispiel freischwebend oder beweglich gelagert in diesem angeordnet sein. Dies kann beispielsweise einen separaten Austausch der Innenrohre der Heizelemente erleichtern und/oder eine unabhängige thermische Ausdehnung der Innen- und Außenrohre ermöglichen.

**[0030]** Das Halteelement kann zum Beispiel auf einer Außenseite des betreffenden Innenrohrs angeordnet sein. Das Halteelement kann beispielsweise ein umlau-

fender Kragen und/oder ein oder mehrere Vorsprünge (z.B. Stifte oder Kragensegmente) sein oder solche Elemente umfassen. Das Halteelement kann dazu eingerichtet sein, in ein entsprechendes Gegenstück eingehängt und/oder auf dieses aufgelegt zu werden. Das Gegenstück kann beispielsweise Teil einer Wand (z.B. einer oberen Wand) der Abführkammer sein, zum Beispiel eine Umrandung einer Öffnung zur Aufnahme des Innenrohrs in der betreffenden Wand. In einem Beispiel kann die Wand der Abführkammer einen um die Öffnung zur Aufnahme des Innenrohrs umlaufenden Vorsprung aufweisen und das Halteelement kann dazu eingerichtet sein, mit dem Vorsprung ineinander zu greifen, um das Innenrohr an der Wand der Abführkammer einzuhängen. Das Halteelement kann beispielsweise ein abgewinkelter umlaufender Kragen sein, der dazu eingerichtet ist, an dem Vorsprung eingehängt zu werden.

**[0031]** Zwischen den Innenrohren und der Abführkammer kann jeweils eine Dichtung angeordnet sein, zum Beispiel um die Öffnung zur Aufnahme des Innenrohrs abzudichten. Die Dichtung kann beispielsweise eine Stopfbuchsdichtung sein. Die Dichtung kann dazu eingerichtet sein, ein Austreten des Wärmeträgermediums aus der Abführkammer (zum Beispiel in die unten beschriebene Brennkammer und/oder in das Innenrohr) oder ein Eintreten des Wärmeträgermediums in die Abführkammer (zum Beispiel aus der Brennkammer und/oder aus dem Innenrohr) ganz oder teilweise zu verhindern.

**[0032]** Die Reaktorvorrichtung kann dazu eingerichtet sein, das erhitzte Wärmeträgermedium für die Heizelemente zu erzeugen. Hierzu kann die Reaktorvorrichtung Mittel zum Erzeugen des erhitzen Wärmeträgermediums aufweisen, beispielsweise Mittel zum Erhitzen eines bereits vorhandenen Wärmeträgermediums (wie etwa eines flüssigen Wärmeträgermediums, zum Beispiel eine Wärmequelle und einen Wärmetauscher) und/oder Mittel zum Erzeugen eines heißen Wärmeträgermediums (wie etwa eines gasförmigen Wärmeträgermediums) aufweisen. Die Reaktorvorrichtung kann beispielsweise dazu eingerichtet sein, das erhitzte Wärmeträgermedium mit einer Temperatur zwischen 500°C und 1200°C, in manchen Beispielen zwischen 650°C und 1000°C, in einem Beispiel zwischen 750°C und 900°C bereitzustellen. Die genannte Temperatur kann beispielsweise die Temperatur an einer Einlassöffnung der Heizelemente sein.

**[0033]** Die Reaktorvorrichtung kann insbesondere eine Brennkammer aufweisen, welche zur Verbrennung eines Brennstoffes wie beispielsweise Gas, insbesondere Pyrolysegas, ausgelegt ist. Die Brennkammer kann zum Beispiel auf einer von der Reaktorkammer abgewandten Seite der Abführkammer angeordnet sein, d.h. die Abführkammer kann zwischen der Reaktorkammer und der Brennkammer angeordnet sein. Die Abführkammer und die Brennkammer können beispielsweise durch eine gemeinsame Zwischenwand voneinander getrennt sein. In manchen Beispielen können weitere Elemente zwischen der Abführkammer und der Brennkammer an-

geordnet sein, zum Beispiel eine thermische Isolations-schicht. In manchen Beispielen können die Reaktor-, die Abführ- und/oder die Brennkammer in einem gemeinsa-men Reaktorgehäuse angeordnet sein, welches zum Beispiel durch eine oder mehrere Zwischenwände in die entsprechenden Kammern unterteilt sein kann.

**[0034]** Die Brennkammer kann mit Einlassöffnungen der Heizelemente, insbesondere mit den Einlassöffnun-gen der Innenrohre der Heizelemente, in Fluidverbin-dung stehen, zum Beispiel um das erhitze Wärmeträ-germedium den Heizelementen zuzuführen. In einem Beispiel kann das erhitze Wärmeträgermedium ein Ver-brennungsprodukt, insbesondere ein Rauchgas, aus der Verbrennung des Brennstoffs in der Brennkammer sein. Die Brennkammer kann mit den Heizelementen so in Flu-idverbindung stehen, dass das Verbrennungsprodukt aus der Brennkammer in die Heizelemente entweichen kann. Alternativ oder zusätzlich kann die Brennkammer auch dazu eingerichtet sein, mittels eines Wärmetaus-chers ein bereits vorhandenes Wärmeträgermedium zu erhitzen.

**[0035]** Die von dem ersten Bereich der Reaktorkam-mer abgewandten zweiten (z.B. unteren) Enden der Hei-zelemente können jeweils frei schwebend und/oder be-weglich gelagert in der Reaktorkammer angeordnet sein, insbesondere so, dass eine ungehinderte thermische Längsausdehnung der Heizelemente (z.B. in Längs-bzw. axialer Richtung des doppelwandigen Rohres) möglic ist. Die zweiten Enden der Heizelemente können zum Beispiel von anderen Elementen der Reaktorvor-richtung, insbesondere von den Wänden der Reaktorkam-mer, beabstandet angeordnet sein und/oder können mit einem oder mehreren anderen Elementen derart in Kontakt sein, dass eine Bewegung bzw. Ausdehnung der Heizelemente in Längsrichtung möglich ist. Der Abstand zwischen den zweiten Enden der Heizelemente und der ihnen gegenüberliegenden Wand der Reaktorkammer kann beispielsweise zwischen 5 cm und 50 cm betragen. In manchen Beispielen kann die Reaktorkammer eine Führungs vorrichtung aufweisen, die dazu eingerichtet sind, die Heizelemente (zum Beispiel deren zweite Enden) seitlich zu führen. Die Führungs vorrichtung kann beispielsweise dazu eingerichtet sein, eine seitliche Be-wegung der Heizelemente (z.B. senkrecht zur Längsrich-tung) zu verhindern und/oder zu begrenzen. Die Füh-ru ngsvorrichtung kann seitlich mit den zweiten Enden der Heizelemente in Kontakt sein, aber eine Bewegung bzw. Ausdehnung der Heizelemente in Längsrichtung er-lauben.

**[0036]** Vorzugsweise ist der erste Bereich der Reak-torkammer oberhalb des zweiten Bereichs der Reaktorkam-mer angeordnet ist, d.h. der erste Bereich kann ein oberer Bereich (zum Beispiel ein oberes Drittel, eine obe-re Hälfte oder obere zweite Drittel) der Reaktorkammer sein und der zweite Bereich kann ein unterer Bereich (zum Beispiel ein unteres Drittel, eine untere Hälfte oder un-tere zwei Drittel) der Reaktorkammer sein. Der erste und der zweite Bereich können so relativ zueinander an-

geordnet sein, dass das zu behandelnde Material sich zwischen den Heizelementen zumindest teilweise, in manchen Beispielen alleine aufgrund der Gravitation (d.h. ohne zusätzliche Mittel zum aktiven Transport) von

5 dem ersten Bereich in den zweiten Bereich bewegen kann. Die Heizelemente können in der Reaktorkammer abschnittsweise oder entlang ihrer gesamten Länge in vertikaler Richtung (d.h. parallel zur Richtung der Gravi-tation) verlaufen, zum Beispiel so, dass das zu behan-delnde Material in den Zwischenräumen zwischen den Heizelementen senkrecht nach unten sacken, rutschen, fließen und/oder fallen kann.

**[0037]** Die Reaktorvorrichtung kann dazu eingerichtet sein, thermochemisch behandeltes Material durch die ei-ne oder die mehreren Entnahmeföffnungen aus der Re-aktorkammer zu entnehmen. Hierzu kann die Reaktor-vorrichtung beispielsweise eine entsprechend ausgebil-dete Entnahmeverrichtung aufweisen. Die Entnahmeverrichtung kann beispielsweise dazu eingerichtet sein, 10 die eine oder die mehreren Entnahmeföffnungen ganz oder teilweise zu öffnen, um thermochemisch behandeltes Material aus der Reaktorkammer zu entnehmen, und/oder ganz oder teilweise zu verschließen, um die Entnahme (zum Beispiel das Herausfallen und/oder He-rausfließen/-strömen) von thermochemisch behandel-tem Material zu steuern. Alternativ oder zusätzlich kann die Entnahmeverrichtung auch eine oder mehrere För-dervorrichtungen aufweisen, um Material durch die eine oder die mehreren Entnahmeföffnungen zu entnehmen 15 (zum Beispiel zu transportieren). Die Entnahmeverrichtung kann insbesondere eine oder mehrere Abräumvor-richtungen (als Beispiel einer Fördervorrichtung) aufwei-sen, die jeweils in und/oder benachbart zu einer Entnahmeföffnung angeordnet sind. Die Abräumvorrichtungen 20 können jeweils dazu eingerichtet sein, thermochemisch behandeltes Material derart abzutragen und/oder abzu-räumen (z.B. zu entfernen und/oder wegzbewegen), dass weiteres thermochemisch behandeltes Material in die und/oder durch die entsprechende Entnahmeföffnung 25 nachkommen (z.B. nachsacken, -rutschen oder -fließen) kann. Die Entnahmeverrichtung kann dazu eingerichtet sein, das entnommene Material einer Separationsvor-richtung wie unten beschrieben zuzuführen.

**[0038]** Vorzugsweise ist die Reaktorvorrichtung dazu 30 eingerichtet, das thermochemisch behandelte Material derart zu entnehmen, dass das zu behandelnde Material sich zwischen den Heizelementen zumindest teilweise, in manchen Beispielen alleine aufgrund der Gravitation von dem ersten Bereich in den zweiten Bereich bewegt. 35 Die Reaktorvorrichtung kann beispielweise dazu einge-richitet sein, das zu behandelnde Material im unteren (zweiten) Bereich der Reaktorkammer zu entnehmen, wodurch das in der Reaktorkammer verbleibende Mate-rial in der Reaktorkammer nach unten sacken, rutschen, fließen und/oder fallen kann und sich dadurch vom ersten Bereich in Richtung des zweiten Bereichs bewegen kann. 40 Die Reaktorvorrichtung kann dazu eingerichtet sein, kontinuierlich und/oder schrittweise thermochemi- 45

sches Material zu entnehmen, zum Beispiel mit einer im Wesentlichen konstanten Entnahmerate oder durch Entnehmen von Material (z.B. von einer bestimmten Materialmenge) zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z.B. in regelmäßigen Abständen).

**[0039]** Die Reaktorvorrichtung kann eine oder mehrere Fördervorrichtungen aufweisen, die jeweils dazu eingerichtet sind, Ausgangsmaterial von einer der einen oder der mehreren Zuführöffnungen in Zwischenräume zwischen den Heizelementen in der Reaktorkammer zu transportieren, zum Beispiel im ersten Bereich der Reaktorkammer. Die Fördervorrichtungen können sich beispielsweise von der betreffenden Zuführungsoffnung in die Zwischenräume zwischen den Heizelementen hinein erstrecken. Die Fördervorrichtung können jeweils eine Förderschnecke zum Transport des Ausgangsmaterials aufweisen. Alternativ oder zusätzlich können die Fördervorrichtung zum Beispiel jeweils eine Bandfördervorrichtung, eine Rollenfördervorrichtung, eine Kettenfördervorrichtung und/oder ein Förderrohr aufweisen. In manchen Beispielen können die Heizelemente in mehreren Reihen angeordnet sein und jede der Fördervorrichtungen kann sich in den Zwischenraum zwischen zwei benachbarten Reihen von Heizelementen hinein erstrecken, vorzugsweise entlang der gesamten Länge der betreffenden Reihen.

**[0040]** Die Reaktorvorrichtung ist dazu ausgelegt, das zu behandelnde Material auf Temperaturen, insbesondere auf die erste und die zweite Temperatur, zu erhitzen, die für das zu behandelnde Ausgangsmaterial und die durchzuführende thermochemische Behandlung geeignet sind. Insbesondere kann die Reaktorvorrichtung dazu ausgelegt sein, dass zu behandelnde Material im Laufe der thermochemischen Behandlung entsprechend eines (räumlichen und/oder zeitlichen) Temperaturverlaufs zu erhitzen, der für das zu behandelnde Ausgangsmaterial und die durchzuführende thermochemische Behandlung geeignet ist. Beispielsweise können die Heizelemente so ausgelegt sein, dass der Temperaturverlauf entlang der Heizelemente, insbesondere die erste und die zweite Heizelement-Temperatur, für das zu behandelnde Ausgangsmaterial und die durchzuführende thermochemische Behandlung geeignet sind.

**[0041]** Die zweite Temperatur kann beispielsweise gewählt sein, um ein in dem zweiten Bereich der Reaktorkammer befindliches Pyrolyseprodukt nachzubehandeln (zum Beispiel zu veredeln oder zu reformieren). Die entsprechende Temperatur kann auch als Nachbehandlungstemperatur bezeichnet werden. Die zweite Temperatur (Nachbehandlungstemperatur) kann zum Beispiel zwischen 450°C und 950°C, in manchen Beispielen zwischen 450°C und 800°C, in manchen Beispielen zwischen 500°C und 750°C, in einem Beispiel zwischen 550°C und 700°C betragen. Hierzu können die Heizelemente im zweiten Bereich der Reaktorkammer beispielsweise auf eine zweite Heizelement-Temperatur erhitzt werden, die gleich oder größer als die zweite Temperatur ist, zum Beispiel auf eine zweite Heizelement-Temperatur

tur zwischen 450°C und 1050°C, in manchen Beispielen zwischen 450°C und 900°C, in manchen Beispielen zwischen 500°C und 850°C, in einem Beispiel zwischen 550°C und 800°C.

5 **[0042]** Die erste Temperatur kann beispielsweise gewählt sein, um in dem ersten Bereich der Reaktorkammer befindliches Ausgangsmaterial zumindest teilweise, in manchen Beispielen vollständig oder im Wesentlichen vollständig zu pyrolysern. Die entsprechende Temperatur kann auch als Pyrolysetemperatur bezeichnet werden. In anderen Beispielen kann die erste Temperatur gewählt sein, um in dem ersten Bereich der Reaktorkammer befindliches Ausgangsmaterial vorzubehandeln (zum Beispiel zu erwärmen) und/oder nachzubehandeln.

10 15 Die erste Temperatur kann zum Beispiel zwischen 200°C und 600°C, in manchen Beispielen zwischen 200°C und 550°C, in manchen Beispielen zwischen 350°C und 550°C, in einem Beispiel zwischen 400°C und 500°C betragen. Hierzu können die Heizelemente im ersten Bereich der Reaktorkammer beispielsweise auf eine erste Heizelement-Temperatur erhitzt werden, die gleich oder größer als die erste Temperatur ist, zum Beispiel auf eine erste Heizelement-Temperatur zwischen 250°C und 650°C, in manchen Beispielen zwischen 250°C und 600°C, in manchen Beispielen zwischen 400°C und 600°C, in einem Beispiel zwischen 450°C und 550°C.

20 25 30 35 40 45 **[0043]** Die zweite Temperatur kann mindestens 20°C, in einigen Beispielen mindestens 50°C, vorzugsweise mindestens 100°C, in einem Beispiel mindestens 150°C und in einem Beispiel mindestens 200°C höher als die erste Temperatur sein. Die erste und die zweite Temperatur können beispielsweise die Temperatur der festen Bestandteile des Materials sein. Gasförmige Bestandteile des Materials können möglicherweise eine andere Temperatur, insbesondere eine niedrigere Temperatur aufweisen. Die Heizelemente können dazu eingerichtet sein, auf die erste und die zweite Heizelement-Temperatur erhitzt zu werden, während die Reaktorkammer in Betrieb ist, zum Beispiel während die Reaktorkammer mit Ausgangsmaterial und/oder thermochemisch behandeltem Material gefüllt ist, während das Ausgangsmaterial in der Reaktorkammer thermochemisch behandelt wird und/oder während das Ausgangsmaterial und/oder das thermochemisch behandelte Material sich durch die Reaktorkammer bewegt.

50 55 **[0044]** Die Reaktorvorrichtung kann eine Separationsvorrichtung aufweisen, die dazu eingereicht ist, feste und gasförmige Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials voneinander zu trennen. Die Separationsvorrichtung kann mit der einen oder den mehreren Entnahmeeöffnungen verbunden sein, zum Beispiel um der Separationsvorrichtung thermochemisch behandeltes Material zuzuführen. Die gasförmigen Bestandteile können kondensierbare und/oder nicht-kondensierbare Bestandteile umfassen. In manchen Ausgestaltungen kann die Separationsvorrichtung ferner dazu eingerichtet sein, kondensierbare Bestandteile (z.B. flüssige Bestandteile und/oder gasförmige, aber verflüssigbare (z.B. bei Nor-

malbedingungen flüssige) Bestandteile) und nicht-kondensierbare Bestandteile (z.B. bei Normalbedingungen gasförmige Bestandteile) des thermochemisch behandelten Materials voneinander zu trennen.

**[0045]** Die Separationsvorrichtung kann eine Separationskammer aufweisen. In einem unteren Bereich der Separationskammer kann eine Feststoff-Entnahmeverrichtung zur Entnahme von festen Bestandteilen des thermochemisch behandelten Materials aus dem unteren Bereich (z.B. vom Boden) der Separationskammer angeordnet sein. Die Feststoff-Entnahmeverrichtung kann Förder-/Transportmittel wie zum Beispiel eine Förderorschnecke, eine Bandfördervorrichtung, eine Rollenfördervorrichtung und/oder eine Kettenfördervorrichtung zum Abtransport der festen Bestandteile aufweisen. Im oberen Bereich der Separationskammer kann eine Gas-Entnahmeverrichtung zur Entnahme von gasförmigen Bestandteilen des thermochemisch behandelten Materials aus dem oberen Bereich (z.B. unterhalb einer oberen Begrenzung/eines Deckels) der Separationskammer angeordnet sein. Die Gas-Entnahmeverrichtung kann beispielsweise ein Austrittsrohr umfassen, welches dazu eingerichtet ist, die gasförmigen Bestandteile aus der Reaktorvorrichtung und/oder dem Reaktorgehäuse herauszuleiten.

**[0046]** Die Separationsvorrichtung kann zum Beispiel an einer dem zweiten Bereich der Reaktorkammer benachbarten Seite der Reaktorkammer angeordnet sein. In manchen Beispielen kann die Separationsvorrichtung oder ein oder mehrere Teile davon mit der Reaktorkammer, der Abführkammer und/oder der Brennkammer in einem gemeinsamen Reaktorgehäuse angeordnet sein.

**[0047]** Es wird weiterhin ein Verfahren zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts unter Verwendung einer Reaktorvorrichtung nach einem der hierin beschriebenen Beispiele vorgesehen. Das Verfahren umfasst das Zuführen eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials, insbesondere eines biogenen Ausgangsmaterials, in den ersten Bereich der Reaktorkammer durch die einen oder die mehreren Zuführöffnungen. Das Ausgangsmaterial wird durch Erhitzen des Ausgangsmaterials mittels der Vielzahl von Heizelementen thermochemisch behandelt, um das Pyrolyseprodukt herzustellen. Während des thermochemischen Behandlungs bewegt sich das Ausgangsmaterial von dem ersten Bereich in den zweiten Bereich der Reaktorkammer.

**[0048]** Die Herstellung eines Pyrolyseprodukts im Sinne der vorliegenden Offenbarung kann beispielsweise eine Umwandlung, insbesondere eine teilweise oder vollständige Pyrolyse, eines noch nicht oder noch nicht vollständig pyrolysierten Ausgangsmaterials umfassen. Alternativ oder zusätzlich kann die Herstellung eines Pyrolyseprodukts auch eine Nachbehandlung, zum Beispiel eine Veredelung oder Reformierung, eines teilweise oder vollständig pyrolysierten Materials umfassen. Dabei kann das teilweise oder vollständig pyrolysierte Material beispielsweise das Ausgangsmaterial sein (d.h. die Herstellung des Pyrolyseprodukt kann z.B. die Ver-

edelung oder Reformierung des Ausgangsmaterial umfassen oder sein). Alternativ kann das teilweise oder vollständig pyrolysierte Material beispielsweise ein durch Umwandlung des Ausgangsmaterials als Teil des erfundungsgemäßen Verfahrens gewonnenes Zwischenmaterial sein (d.h. die Herstellung des Pyrolyseprodukt kann z.B. sowohl eine Pyrolyse als auch eine Veredelung/Reformierung umfassen).

**[0049]** Das Ausgangsmaterial kann ein festes Material sein. Das Ausgangsmaterial kann zum Beispiel in stückiger Form, beispielsweise als Granulat und/oder Pellets, zugeführt werden. Die Stück- oder Partikelgröße (z.B. die durchschnittliche Stück- oder Partikelgröße) des Ausgangsmaterials kann beispielsweise zwischen 1 mm und 20 mm, in manchen Beispielen zwischen 3 mm und 10 mm betragen. Das Ausgangsmaterial kann ein biogenes Material sein, d.h. ganz oder teilweise biologischen Ursprungs sein. Das Ausgangsmaterial kann insbesondere Klärschlamm, Biomasse (z.B. pflanzliche Biomasse) Gülle, Mist, Stroh, Papier und/oder Pappe umfassen oder daraus bestehen. Das Ausgangsmaterial kann noch nicht pyrolysiert sein (d.h. kein pyrolysiertes Material umfassen). Alternativ kann das Ausgangsmaterial bereits ganz oder teilweise pyrolysiert sein. Das Ausgangsmaterial kann zum Beispiel mittels einer oder mehrerer Fördervorrichtungen wie oben beschrieben zugeführt werden.

**[0050]** Mittels der Vielzahl von Heizelementen wird das Ausgangsmaterial in der Reaktorkammer erhitzt. Die Heizelemente können beispielsweise durch Zuführen eines erhitzen Wärmeträgermediums wie oben beschrieben erhitzt werden. Dies kann die Verbrennung eines Brennstoffes in einer Brennkammer wie oben beschrieben umfassen, wobei der Brennstoff vorzugsweise ein mittels des erfundungsgemäßen Verfahrens hergestelltes Pyrolyseprodukt, insbesondere Pyrolysegas umfasst oder daraus besteht.

**[0051]** Das Ausgangsmaterial (bzw. das zu behandelnde Material) wird auf eine Temperatur erhitzt, welche für die Durchführung der thermochemischen Behandlung ausreichend ist, z.B. auf eine Temperatur, die ausreichend hoch ist, um die mit der thermochemischen Behandlung verknüpften chemischen Reaktionen zu initiieren und/oder ablaufen zu lassen. Die Verweildauer des Ausgangsmaterials in der Reaktorkammer, z.B. die Verweildauer in dem ersten Bereich und/oder die Verweildauer in dem zweiten Bereich, wird ebenfalls so gewählt, dass die Verweildauer für die thermochemische Behandlung ausreichend ist, zum Beispiel um das gesamte Ausgangsmaterial oder zumindest einen Teil davon thermochemisch zu behandeln, zum Beispiel ganz oder teilweise zu pyrolyseren und/oder ganz oder teilweise zu reformieren. Das Ausgangsmaterial bzw. das zu behandelnde Material kann kontinuierlich erhitzt werden, während es sich von dem ersten in den zweiten Bereich der Reaktorkammer bewegt, zum Beispiel so, dass die Temperatur des Materials im Laufe der thermochemischen Behandlung monoton ansteigt.

**[0052]** Das thermochemische Behandeln des Ausgangsmaterials kann das Erhitzen des Ausgangsmaterials auf eine Pyrolysetemperatur im ersten Bereich der Reaktorkammer umfassen, um das Ausgangsmaterial (insbesondere ein noch nicht pyrolysiertes Ausgangsmaterial oder noch nicht pyrolysierte Bestandteile des Ausgangsmaterials) ganz oder teilweise zu pyrolyseren. Durch kann ein ganz oder teilweise pyrolysiertes Zwischenmaterial gewonnen werden. Die Pyrolyse kann dabei im ersten und/oder im zweiten Bereich der Reaktorkammer stattfinden. Das thermochemische Behandeln kann ferner das Erhitzen des zumindest teilweise pyrolysierten (Zwischen-)Materials im zweiten Bereich der Reaktorkammer auf eine Nachbehandlungstemperatur umfassen, um ein in dem zumindest teilweise pyrolysierten Material enthaltenes Pyrolyseprodukt (z.B. ein Pyrolyseöl, ein Pyrolysegas und/oder ein Pyrolysekoks) nachzubehandeln (z.B. zu veredeln oder zu reformieren). Die Nachbehandlungstemperatur kann höher als die Pyrolysetemperatur sein, zum Beispiel mindestens 20°C, in einigen Beispielen mindestens 50°C, in einem Beispiel mindestens 100°C höher als die Pyrolysetemperatur.

**[0053]** Die Pyrolyse und das Nachbehandeln können kontinuierlich ineinander übergehen, d.h. in einem gemeinsamen, nicht klar unterteilbaren Prozess erfolgen. Beispielsweise kann das zu behandelnde Material kontinuierlich erhitzt werden, während es sich durch die Reaktorkammer bewegt, z.B. so dass es zunächst im ersten Bereich die Pyrolysetemperatur erreicht und dann weiter erhitzt wird, so dass es im zweiten Bereich dann die Nachbehandlungstemperatur erreicht. Im ersten Teil der thermochemischen Behandlung, der beispielsweise etwa die ersten zwei Drittel der Behandlungsdauer bzw. Verweildauer in der Reaktorkammer ausmachen kann, kann überwiegend die Pyrolyse des Ausgangsmaterials erfolgen. Anschließend kann im zweiten Teil der thermochemischen Behandlung, die beispielsweise etwa das letzte Drittel der Behandlungsdauer bzw. Verweildauer in der Reaktorkammer ausmachen kann, überwiegend die Nachbehandlung des im ersten Teil pyrolysierten Materials erfolgen. Entsprechend können beispielsweise die oberen zwei Drittel der Reaktorkammer (welche zum Beispiel dem ersten Bereich entsprechen können) eine "Pyrolysezone" bilden, in der überwiegend Pyrolyse stattfindet, und das untere Drittel der Reaktorkammer (welches zum Beispiel dem zweiten Bereich entsprechen kann), eine "Nachbehandlungszone" bilden, in der überwiegend eine Nachbehandlung stattfindet.

**[0054]** In manchen Beispielen umfasst das Ausgangsmaterial bereits ganz oder teilweise pyrolysiertes Material. Dies ganz beispielsweise zuvor in einer anderen Reaktorvorrichtung pyrolysiert worden sein. Das thermochemische Behandeln des Ausgangsmaterials kann das Erhitzen des teilweise pyrolysierten Materials im ersten Bereich und/oder im zweiten Bereich der Reaktorkammer auf eine Nachbehandlungstemperatur umfassen, um ein in dem zumindest teilweise pyrolysierten Material

enthaltetes Pyrolyseprodukt nachzubehandeln. Das Verfahren kann ferner das Pyrolyseren von noch nicht pyrolysierten Bestandteilen des Ausgangsmaterials umfassen, zum Beispiel wie oben beschrieben.

**[0055]** Die Pyrolysetemperatur und/oder die Nachbehandlungstemperatur können abhängig von dem zu behandelnden Ausgangsmaterial und der durchzuführenden thermochemischen Behandlung gewählt werden. Die Pyrolysetemperatur kann zum Beispiel zwischen 200°C und 600°C, in manchen Beispielen zwischen 200°C und 550°C, in manchen Beispielen zwischen 350°C und 550°C, in einem Beispiel zwischen 400°C und 500°C betragen. Die Nachbehandlungstemperatur kann zum Beispiel zwischen 450°C und 950°C, in manchen Beispielen zwischen 450°C und 800°C, in manchen Beispielen zwischen 500°C und 750°C, in einem Beispiel zwischen 550°C und 700°C betragen. Die genannten Temperaturen können beispielsweise die Temperatur der festen Bestandteile des Materials angeben. Gasförmigen Bestandteile des Materials können eine andere Temperatur, insbesondere eine niedrigere Temperatur aufweisen.

**[0056]** Die Verweildauer des Materials in der Reaktorkammer (z.B. die Zeit vom Zuführen des Ausgangsmaterials bis zur Entnahme des Pyrolyseprodukts aus der Reaktorkammer) kann ebenfalls abhängig von dem zu behandelnden Ausgangsmaterial und der durchzuführenden thermochemischen Behandlung gewählt werden. Die Verweildauer kann zum Beispiel zwischen 30 Minuten und 10 Stunden, in manchen Beispielen zwischen 1 Stunde und 5 Stunden, in einem Beispiel zwischen 1 Stunde und 3 Stunden und in einem Beispiel zwischen 1,5 Stunden und 2,5 Stunden betragen. Die Pyrolysetemperatur, die Nachbehandlungstemperatur und/oder die Verweildauer des Materials können als Parameter genutzt werden, um die Zusammensetzung und/oder die Qualität des thermochemisch behandelten Materials und/oder des Pyrolyseprodukts zu verändern, zum Beispiel um die relativen Anteile von festen, kondensierbaren und/oder nicht-kondensierbaren Anteilen und/oder die Qualität und/oder chemische Zusammensetzung dieser Anteile zu verändern.

**[0057]** Das thermochemische Behandeln kann ein thermokatalytisches Behandeln unter Verwendung eines Katalysators umfassen. Insbesondere kann das Nachbehandeln ein thermokatalytisches Nachbehandeln sein oder umfassen. In manchen Ausgestaltungen kann dabei das zumindest teilweise pyrolysierte Material, insbesondere ein fester Bestandteil des zumindest teilweise pyrolysierten Materials (z.B. ein Pyrolysekoks) als Katalysator dienen. Dieser kann beispielsweise in einer porösen Form und/oder Struktur (zum Beispiel einer Schüttung) im zweiten Bereich der Reaktorkammer vorliegen und zum Beispiel als Katalysator für eine thermokatalytische Nachbehandlung gasförmiger Bestandteile des zumindest teilweise pyrolysierten Materials dienen.

**[0058]** Während des thermochemischen Behandelns bewegt sich das Ausgangsmaterial von dem ersten Be-

reich der Reaktorkammer in den zweiten Bereich. Anders ausgedrückt bewegt sich das Material (z.B. seine festen und/oder gasförmigen Bestandteile) während seiner Umwandlung aus dem Ausgangsmaterial in das Pyrolyseprodukt von dem ersten Bereich in den zweiten Bereich. Die Bewegung kann kontinuierlich oder schrittweise erfolgen, zum Beispiel wie oben für die erfindungsgemäße Vorrichtung beschrieben.

**[0059]** Die Bewegung erfolgt dabei vorzugsweise zumindest teilweise passiv, insbesondere zumindest teilweise aufgrund der Gravitation. Beispielsweise kann der erste Bereich der Reaktorkammer oberhalb des zweiten Bereichs angeordnet sein. Das Material (insbesondere seine festen Bestandteile) kann sich während des thermochemischen Behandelns in der Reaktorkammer nach unten bewegen, z.B. nach unten sacken, rutschen, fließen und/oder fallen. Hierzu kann beispielweise thermochemisch behandeltes Material (z.B. das fertige Pyrolyseprodukt) aus der Reaktorkammer (z.B. an deren Boden) entnommen werden, in manchen Beispielen kontinuierlich. Alternativ oder zusätzlich kann die Bewegung auch zumindest teilweise aufgrund einer Druckdifferenz erfolgen, wobei die Druckdifferenz beispielsweise durch die Entstehung gasförmiger Bestandteile hervorgerufen werden kann. In manchen Beispielen kann die Bewegung des Materials alternativ oder zusätzlich auch zumindest teilweise aktiv erfolgen, zum Beispiel durch eine oder mehrere Förder-/Transportvorrichtungen innerhalb und/oder außerhalb der Reaktorkammer.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER FIGUREN

**[0060]** Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen näher erläutert. In den Figuren zeigen in schematischer Darstellung:

Fig. 1a: eine Reaktorvorrichtung zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials gemäß einem Beispiel in einer Seitenansicht;

Fig. 1b: die Reaktorvorrichtung aus Fig. 1a in Draufsicht;

Fig. 2a: eine Reaktorvorrichtung zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials gemäß einem weiteren Beispiel in einer ersten Seitenansicht;

Fig. 2b: die Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a in einer zweiten Seitenansicht;

Fig. 3: ein Heizelement der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b in einer vergrößerten Seitenansicht;

Fig. 4: die Abführkammer der Reaktorvorrichtung

aus Fig. 2a, 2b in einer vergrößerten Seitenansicht;

Fig. 5: den ersten Bereich der Reaktorkammer der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b in Draufsicht;

Fig. 6: den zweiten Bereich der Reaktorkammer der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b in Draufsicht;

Fig. 7a: die Entnahmeverrichtung der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b in Draufsicht;

Fig. 7b: die Entnahmeverrichtung aus Fig. 7a in einer Seitenansicht;

Fig. 7c: die Entnahmeverrichtung aus Fig. 7a in einer perspektivischen Ansicht;

Fig. 8: ein Flussdiagramm eines Verfahrens zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts gemäß einem Beispiel;

Fig. 9a: eine Entnahmeverrichtung der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b mit linear beweglichen Abräumschiebern gemäß einem weiteren Beispiel in einer Seitenansicht;

Fig. 9b: die Entnahmeverrichtung aus Fig. 9a in Draufsicht;

Fig. 10a: eine Entnahmeverrichtung der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b mit einem rotierbaren Abräumarm gemäß einem weiteren Beispiel in einer Seitenansicht; und

Fig. 10b: die Entnahmeverrichtung aus Fig. 10a in Draufsicht.

#### BESCHREIBUNG DER FIGUREN

**[0061]** Fig. 1a und 1b zeigen schematische Darstellungen (nicht maßstabsgerecht) einer Reaktorvorrichtung 100 zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials gemäß einem Beispiel. Die Reaktorvorrichtung 100 (im Folgenden auch als Vorrichtung 100 bezeichnet) ist dabei in Fig. 1a in einer Seitenansicht (z.B. entlang der y-Achse in Fig. 1b) dargestellt und in Fig. 1b in Draufsicht (z.B. entlang der z-Achse in Fig. 1a). In manchen Beispielen ist die Vorrichtung 100 so angeordnet, dass die z-Achse in Fig. 1a der Vertikalen entspricht (d.h. mit der Richtung der Gravitation zusammenfällt). Die Vorrichtung 100 kann beispielsweise zur Durchführung eines Verfahrens zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts gemäß einem der hierin beschriebenen Beispiele verwendet werden, zum Beispiel zur Durchführung des unten in Bezug auf Fig. 8 beschriebenen Verfahrens 800.

**[0062]** Die Vorrichtung 100 weist eine Reaktorkammer

102 auf, die aus einem temperaturbeständigen Material wie etwa Metall, zum Beispiel Stahl, hergestellt ist. Die Reaktorkammer 102 kann zudem eine oder mehrere thermische Isolationsschichten (nicht dargestellt) aufweisen (z.B. an ihrer Außen- und/oder Innenseite), um das Innere der Reaktorkammer 102 thermisch zu isolieren.

**[0063]** Die Reaktorkammer weist eine Zuführöffnung 104 sowie eine Entnahmehöfning 106 auf. Die Zuführöffnung 104 ist in einem ersten Bereich 102-I der Reaktorkammer, im Beispiel der Fig. 1a in einem oberen Bereich der Reaktorkammer 102, angeordnet. Der erste/obere Bereich 102-I kann zum Beispiel eine obere Hälfte, ein oberes Drittel oder die zwei oberen Drittel der Reaktorkammer 102 umfassen. Durch die Zuführöffnung 104 kann kohlenstoffhaltiges Ausgangsmaterial 108A der Reaktorkammer 102 zugeführt werden, zum Beispiel wie unten für das Verfahren 800 beschrieben. Die Entnahmehöfning 106 ist in einem zweiten Bereich 102-II der Reaktorkammer, im Beispiel der Fig. 1a in einem unteren Bereich (z.B. in einer unteren Hälfte) der Reaktorkammer 102 angeordnet. Der zweite/untere Bereich 102-II kann beispielsweise die nicht im ersten Bereich 102-I enthaltenen Teile oder Bereiche der Reaktorkammer 102 umfassen, zum Beispiel eine untere Hälfte, die zwei unteren Drittel oder ein unteres Drittel der Reaktorkammer 102. Durch die Entnahmehöfning 106 kann thermochemisch behandeltes Material 108B (welches das herzustellende Pyrolyseprodukt sein oder enthalten kann) aus der Reaktorkammer 102 entnommen werden.

**[0064]** Die Vorrichtung 100 weist ferner eine Vielzahl von länglichen Heizelementen 110 auf, die durch Zwischenräume 112 voneinander beabstandet in der Reaktorkammer 102 angeordnet sind. Die Vorrichtung 100 kann zum Beispiel zwischen 10 und 100 Heizelemente aufweisen. Die Heizelemente 110 erstrecken sich jeweils von dem oberen Bereich 102-I in den unteren Bereich 102-II der Reaktorkammer 102, nämlich von einer oberen Wand oder Begrenzung (z.B. Deckel) der Reaktorkammer 102 nach unten in Richtung der unteren Wand (z.B. Boden) der Reaktorkammer 102. Die unteren Enden der Heizelemente 110 sind dabei frei schwebend in der Reaktorkammer 102 angeordnet, so dass sich die Heizelemente 110 in Längsrichtung ungehindert thermisch ausdehnen können. Anders ausgedrückt sind die unteren Enden der Heizelemente zumindest von der unteren Wand der Reaktorkammer 102 beabstandet angeordnet.

**[0065]** Die Heizelemente 110 sind dazu eingerichtet, erhitzt zu werden. Die Heizelemente 110 können zum Beispiel dazu eingerichtet sein, ein erhitztes Wärmeträgermedium aufzunehmen (z.B. zu leiten), um dadurch (passiv) erhitzt zu werden, beispielsweise wie bei der unten beschriebenen Reaktorvorrichtung 200 aus Fig. 2a bis 7b. Alternativ oder zusätzlich können die Heizelemente 110 auch dazu eingerichtet sein, sich aktiv zu erhitzen und hierzu beispielsweise einen oder mehrere elektrische Glühwendel (nicht dargestellt) aufweisen.

**[0066]** Die Vorrichtung 100 ist dazu eingerichtet, das

zu behandelnde Material (d.h. das Ausgangsmaterial 108A sowie noch nicht vollständig thermochemisch behandeltes Zwischenmaterial) im Laufe der thermochemischen Behandlung von dem oberen Bereich 102-I entlang der Heizelemente 110 in den zweiten Bereich 102-II zu bewegen. Dabei wird das zu behandelnde Material mittels der Heizelemente 110 im oberen Bereich 102-I auf eine erste Temperatur erhitzt und im unteren Bereich 102-II auf eine zweite Temperatur erhitzt, wobei die zweite Temperatur höher als die erste Temperatur ist. Anders ausgedrückt weist das zu behandelnde Material in der Reaktorkammer 102 einen Temperaturgradienten von unten nach oben auf, wird also sukzessive heißer während es sich durch die Reaktorkammer von oben nach unten bewegt. Die erste Temperatur kann beispielsweise zwischen 350° und 550°C betragen und die zweite Temperatur zwischen 500°C und 750°C.

**[0067]** Um das zu behandelnde Material zu bewegen, kann die Vorrichtung 100 beispielsweise dazu eingerichtet sein, weiteres Ausgangsmaterial durch die Zuführöffnung 104 zuzuführen, zum Beispiel um das zu behandelnde Material durch die Reaktorkammer 102 zu drücken oder zu pressen. Alternativ oder zusätzlich kann die Vorrichtung auch dazu eingerichtet sein, thermochemisch behandeltes Material aus der Entnahmehöfning 106 zu entnehmen, zum Beispiel damit das in der Reaktorkammer 102 verbliebene Material sukzessive weiter nach unten sacken, rutschen, fließen und/oder fallen kann. Das Zuführen und/oder Entnehmen von Material kann kontinuierlich oder schrittweise erfolgen.

**[0068]** Die Heizelemente 110 können dazu eingerichtet sein, im oberen Bereich 102-I und im unteren Bereich 102-II zum gleichen Zeitpunkt auf unterschiedliche Temperaturen erhitzt zu werden, zum Beispiel auf eine erste Heizelement-Temperatur im oberen Bereich 102-I und auf eine zweite Heizelement-Temperatur 102-II im unteren Bereich, wobei die zweite Heizelement-Temperatur höher als die erste Temperatur sein kann, z.B. mindestens 50°C, in manchen Beispielen mindestens 100°C höher als die erste Temperatur. Je nach Ausgangsmaterial und durchzuführender thermochemischer Behandlung kann die erste Heizelement-Temperatur beispielsweise zwischen 400°C und 600°C betragen und die zweite Heizelement-Temperatur zwischen 500°C und 850°C. In manchen Ausgestaltungen können die Heizelemente 110 einen im wesentlichen linearen Temperaturgradienten entlang ihrer Länge aufweisen.

**[0069]** Mittels der Heizelemente 110 kann das Ausgangsmaterial 108A erhitzt und thermochemisch behandelt werden, um das thermochemisch behandelte Material 108B herzustellen. Währenddessen wird das zu behandelnde Material durch die Reaktorkammer 102 bewegt. Durch die Bewegung des Materials (sowie gegebenenfalls durch die lokal unterschiedliche Temperatur der Heizelement 110) kann das zu behandelnde Material im oberen Bereich 102-I und im unteren Bereich 102-II auf unterschiedliche Temperaturen erhitzt werden, zum Beispiel um sukzessive verschiedene Verfahrensschritte

der thermochemischen Behandlung zu durchlaufen. Beispielsweise kann durch die Entnahmöffnung 106 kontinuierlich thermochemisch behandeltes Material entnommen werden, so dass das durch die Zuführöffnung 104 zugeführte Ausgangsmaterial 108A in der Reaktorkammer 102 langsam nach unten sackt (d.h. vom oberen Bereich 102-I in den unteren Bereich 102-II). Während dessen wird das Material kontinuierlich erhitzt und dadurch thermochemisch behandelt, so dass das Ausgangsmaterial 108A sukzessive in das thermochemisch behandelte Material 108B umgewandelt wird. Dies ist in Fig. 1a durch das gepunktete Muster illustriert, wobei die von oben nach unten anwachsenden Punktgröße den fortschreitenden Behandlungsprozess andeutet.

**[0070]** Fig. 2a und 2b zeigen schematische Darstellungen einer Reaktorvorrichtung 200 zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials gemäß einem weiteren Beispiel. Die Reaktorvorrichtung 200 (im Folgenden auch als Vorrichtung 200 bezeichnet) ist dabei in Fig. 2a im Querschnitt in einer ersten Seitenansicht (z.B. entlang der y-Achse in Fig. 2b) dargestellt und in Fig. 2b im Querschnitt in einer zweiten Seitenansicht (z.B. entlang der x-Achse in Fig. 2a). In manchen Beispielen ist die Vorrichtung 200 so angeordnet, dass die z-Achse in Fig. 2a und 2b der Vertikalen entspricht (d.h. mit der Richtung der Gravitation zusammenfällt). Die Vorrichtung 200 kann beispielsweise zur Durchführung eines Verfahrens zur Herstellung eines Pyrolyseprodukt gemäß einem der hierin beschriebenen Beispiele, zum Beispiel des unten in Bezug auf Fig. 8 beschriebenen Verfahrens 800 verwendet werden.

**[0071]** Die Vorrichtung 200 ist ähnlich der Vorrichtung 100 aus Fig. 1a, 1b ausgebildet, wobei entsprechende Elemente mit denselben Bezugszeichen versehen sind. Die Vorrichtung 200 weist ebenfalls eine Reaktorkammer 102 sowie eine Vielzahl von Heizelementen 110 auf, die voneinander abstandet in der Reaktorkammer 102 angeordnet sind und sich von einem ersten/oberen Bereich 102-I der Reaktorkammer 102 in einem zweiten/unteren Bereich 102-II der Reaktorkammer 102 erstrecken.

**[0072]** Im Beispiel der Fig. 2a, 2b ist die Reaktorkammer 102 in einem Reaktorgehäuse 200A angeordnet, welches durch Zwischenwände in eine Brennkammer 202, eine Abführkammer 204, die Reaktorkammer 102 und eine Separationskammer 206A einer Separationsvorrichtung 206 unterteilt ist. Das Reaktorgehäuse 200A ist aus einem temperaturbeständigen Material wie etwa Metall, zum Beispiel Stahl, hergestellt. Das Reaktorgehäuse 200A kann mehrstückig ausgebildet sein. Das Reaktorgehäuse 200A kann mehrwandig ausgebildet sein und zum Beispiel eine Innen- und eine Außenwand aufweisen. Das Reaktorgehäuse 200A kann zudem eine oder mehrere thermische Isolationsschichten 200B aufweisen, z.B. wie in Fig. 2a, 2b gezeigt zwischen einer Innenwand und einer Außenwand des Reaktorgehäuses 200A. Die thermischen Isolationsschichten 200B können zum Beispiel aus einer Hochtemperaturwolle wie etwa

Erdalkalisisilikatwolle, Aluminiumsilikatwolle oder polycristalliner Wolle ausgebildet sein.

**[0073]** Die Reaktorkammer 102 weist in einem ersten/oberen Bereich 102-I eine Vielzahl von Zuführöffnungen 104 auf, durch die Ausgangsmaterial dem oberen Bereich 102-I der Reaktorkammer 102 zugeführt werden kann, zum Beispiel mittels einer Zuführvorrichtung 220 wie unten in Bezug auf Fig. 5 genauer beschrieben.

**[0074]** Zum Entnehmen von thermochemisch behandeltem Material weist die Reaktorkammer 102 in einem zweiten/unteren Bereich 102-II eine Entnahmöffnung 106 auf, nämlich im Beispiel der Fig. 2a, 2b einen nach unten zur Separationskammer 206A hin offenen Boden. Oberhalb der Entnahmöffnung 106 ist wie unten in Bezug auf Fig. 6 genauer erläutert eine Führungsvorrichtung 602 für die Heizelemente 110 angeordnet. In der Entnahmöffnung 106 ist eine Entnahmeverrichtung 208 angeordnet, die dazu eingerichtet ist, feste Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials vom Boden der Reaktorkammer 102 zu entnehmen und der Separationsvorrichtung 206 zuzuführen. Die Entnahmeverrichtung 208 kann zum Beispiel von einem Motor 210 angetrieben werden und wird unten in Bezug auf Fig. 7a-7c genauer beschrieben. Die Vorrichtung 200 ist dazu eingerichtet, in der Reaktorkammer 102 befindliches Material von dem oberen Bereich 102-I in den unteren Bereich 102-II zu bewegen, indem mittels der Entnahmeverrichtung 200 Material vom Boden der Reaktorkammer 102 entnommen wird, so dass darüber befindliches Material unter dem Einfluss der Gravitation nach unten sacken, rutschen, fließen und/oder fallen kann.

**[0075]** Die Vorrichtung 200 weist eine Separationsvorrichtung 206 auf, die dazu eingerichtet ist, feste und gasförmige Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials voneinander zu trennen. Die Separationsvorrichtung 206 umfasst die unterhalb der Reaktorkammer 102 angeordnete Separationskammer 206A. Im unteren Bereich der Separationskammer 206A ist eine Förderschnecke 212 angeordnet, die zum Beispiel von einem weiteren Motor 214 angetrieben werden kann. Die Förderschnecke 212 ist dazu eingerichtet, feste Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials vom Boden der Separationskammer 206A aus dem Reaktorgehäuse 200A nach außen zu befördern. Die Separationsvorrichtung 206 weist ferner ein Austrittsrohr 216 auf, dessen Einlassöffnung im oberen Bereich der Separationskammer 206A angeordnet ist. Durch das Austrittsrohr 216 können gasförmige Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials, die sich zum Beispiel im oberen Bereich der Separationskammer 206A sammeln können, aus dem Reaktorgehäuse 200A nach außen gelangen. In manchen Beispielen kann die Separationsvorrichtung 206 dazu eingerichtet sein, durch das Austrittsrohr 216 nach außen gelangende gasförmige Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials weiter in kondensierbare und nicht-kondensierbare Bestandteile zu trennen.

**[0076]** Über die Vorrichtung 200 verteilt sind eine Viel-

zahl von Sensoren 218 angeordnet, die zum Beispiel zur Überwachung und/oder Steuerung der Vorrichtung 200 verwenden werden können. Die Sensoren 218 können beispielsweise jeweils einen Drucksensor und/oder einen Temperatursensor aufweisen, zum Beispiel um einen Druck bzw. eine Temperatur in der Reaktorkammer 102, der Brennkammer 202 und/oder der Separationskammer 206A zu messen.

**[0077]** Fig. 3 zeigt eines der Heizelemente 110 der Reaktorvorrichtung aus Fig. 2a, 2b gemäß einem Beispiel in einer vergrößerten Seitenansicht, wobei der einfacheren Darstellung wegen lediglich das obere und das untere Ende des Heizelements 110 dargestellt sein, während der Mittelteil des Heizelements 110 wie durch die durchbrochenen Linien angedeutet weggelassen wurde. **[0078]** Das Heizelement 110 ist als doppelwandiges Rohr ausgebildet und weist ein Innenrohr 302 auf, welches von einem Außenrohr 304 umgeben ist. Das Innenrohr 302 und das Außenrohr 304 sind ebenfalls aus einem hitzebeständigen Material ausgebildet. Das Innenrohr 302 und das Außenrohr 304 können beispielsweise zylindrische Rohre sein, d.h. senkrecht zu ihrer Achse einen elliptischen und insbesondere kreisförmigen Querschnitt aufweisen. Das Innenrohr 302 kann beispielsweise einen Innendurchmesser zwischen 2 cm und 20 cm, in einem Beispiel zwischen 4 cm und 10 cm aufweisen. Das Außenrohr kann beispielsweise einen Innendurchmesser zwischen 4 cm und 40 cm, in einem Beispiel zwischen 6 cm und 20 cm aufweisen. Eine Länge des Heizelement 110 (entlang der z-Richtung in Fig. 2a und 3) kann zum Beispiel zwischen 1 m und 10 m, in manchen Beispielen zwischen 2 m und 5 m, in einem Beispiel zwischen 3 m und 4 m betragen. Die Länge der Heizelemente 110 kann beispielsweise abhängig von der durchzuführenden thermochemischen Behandlung gewählt werden. Soll lediglich eine Nachbehandlung bereits pyrolysierten Materials durchgeführt werden, kann eine kürzere Länge gewählt werden, zum Beispiel zwischen 1 m und 2 m. Soll zusätzlich zur Nachbehandlung das Ausgangsmaterial zunächst pyrolysiert werden kann eine größere Länge gewählt werden, zum Beispiel zwischen 2 m und 5 m.

**[0079]** Das Innenrohr 302 ist an seinem oberen Ende offen, wodurch eine Einlassöffnung 302A gebildet wird. Durch diese kann ein Wärmeträgermedium, zum Beispiel ein Wärmeträgerfluid wie ein heißes Gas oder eine heiße Flüssigkeit eingeleitet werden, um das Heizelement 110 zu erhitzen, zum Beispiel aus der Brennkammer 102 wie unten in Bezug auf Fig. 4 beschrieben. An der Außenseite des Innenrohrs 302 ist eine Isolationsschicht 306, zum Beispiel aus Hochtemperaturwolle, angeordnet, um das Innenrohr 302 gegenüber dem Außenrohr 304 thermisch zu isolieren. Zwischen der Isolationsschicht 306 und dem Außenrohr 304 verbleibt ein Zwischenraum (z.B. ein Spalt) 308, der vom unteren Ende des Innenrohrs 302 zum oberen Ende des Außenrohrs 304 verläuft. In manchen Ausgestaltungen kann auf der Außenseite der Isolationsschicht 306 eine weitere Schicht (zum Beispiel aus Metall) angeordnet sein, um

die Isolationsschicht 306 von dem Zwischenraum 308 und dem darin befindlichen Wärmeträgermedium zu trennen. Die weitere Schicht kann ebenfalls als Rohr ausgebildet sein. Anders ausgedrückt kann das Innenrohr 302 wie in Fig. 3 dargestellt als doppelwandiges Rohr ausgebildet sein, wobei die Isolationsschicht 306 zwischen einem inneren Rohr und einem äußeren Rohr des Innenrohrs 302 angeordnet ist.

**[0080]** Das untere Ende des Innenrohrs 302 ist ebenfalls offen und steht mit dem Inneren des Außenrohrs 304, genauer gesagt mit dem Zwischenraum 308 zwischen dem Innenrohr 302 und dem Außenrohr 304, in Fluidverbindung. Der Zwischenraum 308 kann beispielsweise eine Breite zwischen 1 cm und 10 cm, in einem Beispiel 2 cm und 5 cm aufweisen. Das obere Ende des Außenrohrs 304 ist ebenfalls offen, wodurch eine Auslassöffnung 304A gebildet wird. Durch diese kann das Wärmeträgermedium nach dem Durchlaufen des Heizelementes 110 aus dem Zwischenraum 308 entweichen, zum Beispiel in den Abführkammer 104 wie unten in Bezug auf Fig. 4 beschrieben.

**[0081]** Das durch das Innenrohr 302 eingeleitete Wärmeträgermedium tritt am unteren Ende des Heizelementes 110 in den Zwischenraum 308 ein und läuft durch diesen zurück zur Auslassöffnung 304A. Das Wärmeträgermedium kann Wärme auf das Außenrohr (und von dort auf in der Reaktorkammer 102 befindliches Material) übertragen, zum Beispiel durch Wärmestrahlung und/oder Wärmeleitung. Das heiße Wärmeträgermedium kommt zunächst mit dem unteren Bereich oder Abschnitt des Außenrohrs 304 in Kontakt. Während das Wärmeträgermedium durch den Zwischenraum 308 zurückläuft, kann das Wärmeträgermedium durch den Wärmeübertrag auf das Außenrohr 304 abkühlen. Das Wärmeträgermedium kann daher im oberen Bereich oder Abschnitt des Zwischenraums 308 eine niedrigere Temperatur als im unteren Bereich des Zwischenraums 308 aufweisen. Dadurch kann der untere Bereich des Außenrohrs 304 auf eine höhere Temperatur als der obere Bereich des Außenrohrs 304 erhitzt werden. Die Temperaturdifferenz des Wärmeträgermedium zwischen dem unteren und dem oberen Bereich des Zwischenraums 308 kann beispielsweise mindestens 50°C, in manchen Beispielen mindestens 100°C, in einem Beispiel mindestens 200°C betragen (z.B. während die Vorrichtung 200 in Betrieb ist, z.B. während Material durch die Reaktorkammer 102 bewegt wird).

**[0082]** Das Innenrohr 302 kann wie in Fig. 3 gezeigt freischwebend in dem Außenrohr 304 angeordnet sein, wobei das untere Ende des Innenrohrs 304 vom Außenrohr 304 beabstandet angeordnet ist. In manchen Ausgestaltungen sind das Innenrohr 302 und das Außenrohr 304 nicht fest miteinander verbunden, zum Beispiel so, dass das Innenrohr 302 aus dem Außenrohr 304 entnommen werden kann. Beispielsweise kann wie in Fig. 3 gezeigt weder das Innenrohr 302 noch die Isolation 306 mit dem Außenrohr 304 in Kontakt sein. Dies kann beispielsweise einen separaten Austausch des In-

nenrohres 302 sowie eine unabhängige thermische Ausdehnung der Rohr 302, 304 ermöglichen.

**[0083]** In manchen Beispielen kann in dem Zwischenraum 308, insbesondere im oberen Bereich des Zwischenraums 308, ein oder mehrere Strömungsführungsmitte (nicht dargestellt) angeordnet sein, zum Beispiel um einen Strömungsweg (insbesondere eine Länge des Strömungswegs), eine Strömungsgeschwindigkeit und/oder ein Turbulenzverhalten des Wärmeträgermediums und/oder eine Kontaktfläche für das Wärmeträgermedium zu verändern. Dadurch kann beispielsweise die Verweildauer des Wärmeträgermediums in dem Zwischenraum 308 und/oder der Wärmeübertrag zwischen dem Wärmeträgermedium und dem Außenrohr beeinflusst werden. Die Strömungsführungsmitte können beispielsweise dazu eingerichtet sein, den Strömungsweg, die Strömungsgeschwindigkeit und/oder das Turbulenzverhalten des Wärmeträgermediums und/oder die Kontaktfläche für das Wärmeträgermedium derart zu verändern, dass eine Abnahme der Temperatur und/oder des Volumens des Wärmeträgermediums entlang des Zwischenraums 308 ganz oder teilweise kompensiert wird, um einen homogeneren oder gleichbleibenden Wärmeübertrag entlang des Heizelements 110 zu erreichen. In einem Beispiel sind die Strömungsführungsmitte dazu eingerichtet, die Strömungsgeschwindigkeit des (z.B. gasförmigen) Wärmeträgermediums entlang des Zwischenraums 308 aufrechtzuerhalten (z.B. konstant zu halten).

**[0084]** Das Strömungsführungsmitte kann beispielsweise ein spiral- oder wendelförmig ausgebildeter Wirbulator sein, zum Beispiel ein spiralförmiges Leitblech. Der Wirbulator kann beispielsweise zwischen 1 und 50 Windungen, in einem Beispiel zwischen 2 und 10 Windungen aufweisen. In manchen Beispielen kann eine Steigung des Wirbulators in Strömungsrichtung des Wärmeträgermediums (d.h. von unten nach oben) abnehmen, zum Beispiel kontinuierlich oder schrittweise. Der Wirbulator kann beispielsweise in einem ersten Bereich des Zwischenraums 308 (zum Beispiel einem mittleren Bereich, beispielsweise einem mittleren Drittel) eine erste Steigung aufweisen und in einem zweiten Bereich des Zwischenraums 308 stromabwärts des ersten Bereichs (zum Beispiel in einem oberen Bereich, beispielsweise einem oberen Drittel) eine zweite Steigung, wobei die erste Steigung größer als die zweite Steigung ist. Die erste Steigung kann zum Beispiel zwischen 120% und 200%, in einem Beispiel zwischen 130% und 170% der zweiten Steigung sein. Die erste Steigung kann zum Beispiel zwischen 0.5 m und 1.0 m pro Windung, in einem Beispiel zwischen 0.7 m und 0.8 m pro Windung betragen. Die zweite Steigung kann zum Beispiel zwischen 0.25 m und 0.75 m pro Windung, in einem Beispiel zwischen 0.4 m und 0.6 m pro Windung betragen. Die Steigung des Wirbulators kann über den ersten und den zweiten Bereich jeweils konstant sein. In manchen Beispielen kann der Wirbulator im ersten Bereich und im zweiten Bereich als getrennte Bauteile ausgebildet sein oder an-

ders ausgedrückt ein erster Wirbulator mit der ersten Steigung im ersten Bereich angeordnet sein und ein zweiter Wirbulator mit der zweiten Steigung im zweiten Bereich angeordnet sein.

**[0085]** In manchen Ausgestaltungen können in dem Zwischenraum 308 eine Vielzahl von azimutal (in Umfangsrichtung) versetzten Strömungsführungsmitte, insbesondere eine Vielzahl von azimutal versetzten Wirbulatoren angeordnet sein, zum Beispiel zwischen 3 und 10 Strömungsführungsmitte, in einem Beispiel zwischen 5 und 15 Strömungsführungsmitte. Die Strömungsführungsmitte bzw. Wirbulatoren können beispielsweise dazu ausgebildet sein, den Zwischenraum 308 in eine Vielzahl von Kanälen zu unterteilen. Die Strömungsführungsmitte bzw. Wirbulatoren können jeweils parallel zueinander verlaufen.

**[0086]** Zur Halterung in der Reaktorvorrichtung 200 weist das Innenrohr 302 an seinem oberen Ende ein Haltelelement, nämlich einen umlaufenden, abgewinkelten Kragen 310 auf, mittels dessen das Innenrohr 302 wie unten in Bezug auf Fig. 4 beschrieben in einer Zwischenwand 204A zwischen der Brennkammer 202 und der Abführkammer 204 eingehängt werden kann. Das Außenrohr 304 kann wie ebenfalls unten in Bezug auf Fig. 4 beschrieben an seinem oberen Ende mit einer Zwischenwand 204B zwischen der Abführkammer 204 und der Reaktorkammer 102 verschweißt sein. An seinem unteren Ende weist das Außenrohr 304 ein Führungselement 312 auf, um das Heizelement 110 mittels der im unteren Bereich 102-II der Reaktorkammer 102 angeordneten Führungsvorrichtung 602 seitlich zu führen wie unten in Bezug auf Fig. 6 genauer beschrieben.

**[0087]** Fig. 4 zeigt eine vergrößerte Seitenansicht der Reaktorvorrichtung 200 im Bereich der Abführkammer 204 gemäß einem Beispiel. Die Abführkammer 204 wird durch eine obere Zwischenwand 204A in dem Reaktorgehäuse 200A von der Brennkammer 202 getrennt, wobei auf der Zwischenwand 204A eine thermische Isolationsschicht 402 angeordnet ist. Von der Reaktorkammer 102-I ist die Abführkammer 204 durch eine untere Zwischenwand 204B in dem Reaktorgehäuse 200A getrennt. Die Abführkammer 204 kann beispielsweise eine Höhe (z.B. einen Abstand zwischen der unteren und der oberen Zwischenwand 204A, 204B) zwischen 10 cm und 50 cm, in einem Beispiel zwischen 20 cm und 30 cm aufweisen. Aus der Abführkammer 204 führt ein Abführrohr 404 aus dem Reaktorgehäuse 200A hinaus.

**[0088]** Die Abführkammer 204 weist in der oberen und der unteren Zwischenwand 204A, 204B Öffnungen auf, in denen die oberen Enden der Heizelemente 110 angeordnet sind. Die Einlassöffnungen 302A der Innenrohre 302 sind mit der Brennkammer 202 in Fluidverbindung, um ein erhitztes Wärmeträgermedium in die Innenrohre 302 einzuleiten, zum Beispiel so, dass ein bei Verbrennung eines Brennstoffs (zum Beispiel eines gasförmigen Brennstoffs wie Pyrolysegas) in der Brennkammer 202 entstehendes heißes Rauchgas als Wärmeträgermedium in die Innenrohre 302 eingeleitet werden kann. Zur

Halterung der Innenrohre 302 ist der umlaufende Kragen 310 jeweils auf einem Gegenstück, nämlich einen umlaufenden ringförmigen Vorsprung um die entsprechende Öffnung in der Zwischenwand 204A aufgelegt. Der Kragen 310 ist wie in Fig. 3 zu sehen nach unten abgewinkelt, so dass die Innenrohre 302 in der Zwischenwand 204A eingehängt werden können. Zwischen dem Kragen 310 und dem ringförmigen Vorsprung ist eine Dichtung 406, zum Beispiel eine Stopfbuchsdichtung, angeordnet. Diese kann dazu eingerichtet sein, das Austreten des Wärmeträgermediums von der Brennkammer 202 in die Abführkammer 204 und umgekehrt zu verhindern. Vorgezugsweise sind die Innenrohre 302 nicht an der Zwischenwand 204A befestigt, sondern lediglich aufgelegt bzw. eingehängt, so dass die Innenrohre 302 ohne weiteres entnommen werden können.

**[0089]** Die Außenrohre 304 sind an der unteren Zwischenwand 204B befestigt, so dass der Zwischenraum 308 über die Auslassöffnung 304A mit der Abführkammer 204 in Fluidverbindung stehen. Die Außenrohre 304 können zum Beispiel mit der Zwischenwand 204B verschweißt sein. Um die Reaktorkammer 202 gegenüber der Abführkammer 204 abzudichten, ist die Schweißverbindung (z.B. Schweißnaht) 408 vorzugsweise gasdicht ausgebildet, zum Beispiel um das Austreten von bei der thermochemischen Behandlung entstehenden gasförmigen Bestandteilen aus der Reaktorkammer 202 in die Abführkammer 204 zu verhindern. Über die Abführkammer 204 und das Abführrohr 404 kann das Wärmeträgermedium nach Durchlaufen der Heizelemente 110 aus dem Reaktorgehäuse 200A geleitet werden. Das Wärmeträgermedium kann in einigen Beispielen anschließend wieder der Brennkammer 202 zugeführt werden, zum Beispiel um das Wärmeträgermedium erneut zu erhitzen und in die Heizelemente 110 einzuleiten. Alternativ oder zusätzlich kann das Wärmeträgermedium auch zum Vorwärmen eines anderen Mediums, insbesondere eines Wärmeträgermediums oder eines Brennstoffs, verwendet werden.

**[0090]** Die Brennkammer 202 ist dazu eingerichtet, einen Brennstoff, insbesondere einen gasförmigen Brennstoff wie Pyrolysegas, darin zu verbrennen. Im Beispiel der Fig. 2a, 2b weist die Brennkammer 202 eine einzige Kammer (Brennraum) auf, in der der Brennstoff verbrannt wird. Diese Kammer ist zugleich mit den Innenrohren 302 in Fluidverbindung, so dass bei der Verbrennung entstehendes heißes Rauchgas als Wärmeträgermedium in die Heizelemente 110 eingeleitet werden kann. In anderen Beispielen kann ein Wärmeträgermedium verwendet werden, welches getrennt vom Brennraum geführt wird. Die Brennkammer 202 kann zum Beispiel einen Wärmetauscher aufweisen, der dazu eingerichtet ist, Wärme aus dem Brennraum auf das Wärmeträgermedium zu übertragen, ehe dieses in die Innenrohre 302 eingeleitet wird.

**[0091]** Fig. 5 zeigt den ersten/oberen Bereich 102-I der Reaktorkammer 102 der Reaktorvorrichtung 200 gemäß einem Beispiel in Draufsicht. Die Heizelemente 110 sind

in der Reaktorkammer 102 in mehreren parallelen Reihen angeordnet. Die Anordnung der Heizelemente 110 ist in die Form der Reaktorkammer 102 eingepasst, so dass die Heizelemente 110 im Wesentlichen die gesamte Querschnittsfläche der Reaktorkammer 102 ausfüllen. Die Heizelemente 110 sind voneinander beabstandet angeordnet, so dass zwischen den Heizelementen 110 Zwischenräume 112 verbleiben. Diese Zwischenräume 112 bilden das eigentliche Reaktionsvolumen der Reaktorkammer, um das Ausgangsmaterial aufzunehmen und die thermochemische Behandlung durchzuführen. Die Zwischenräume 112 sind so ausgebildet, dass sie die Heizelemente 110 seitlich vollständig umgeben. Wird die Reaktorkammer 102 vollständig mit zu behandelndem gefüllt, sind die Heizelemente 110 somit auf allen Seiten von zu behandelndem Material umgeben.

**[0092]** Die Abstände zwischen benachbarten Heizelementen 110 können beispielsweise zwischen 2 cm und 40 cm, in manchen Beispielen zwischen 5 cm und 30 cm, in einem Beispiel zwischen 10 cm und 20 cm betragen. Der Abstand zwischen benachbarten Heizelementen 110 derselben Reihe kann kleiner sein als der Abstand zwischen benachbarten Reihen. Der Abstand zwischen den äußersten Heizelementen 110 und der Innenwand (innere Seitenwand) der Reaktorkammer 102 kann zum Beispiel ebenfalls zwischen 2 cm und 40 cm, in manchen Beispielen zwischen 2 cm und 20 cm, in einem Beispiel zwischen 5 cm und 15 cm betragen. Der Abstand zwischen den äußersten Heizelementen 110 und der Innenwand (innere Seitenwand) der Reaktorkammer 102 kann kleiner als der Abstand zwischen benachbarten Heizelementen 110 sein, zum Beispiel kleiner als der Abstand zwischen benachbarten Reihen von Heizelementen 110 und/oder kleiner als der Abstand zwischen benachbarten Heizelementen 110 derselben Reihe.

**[0093]** Die Reaktorkammer 102 weist eine Vielzahl von Zuführöffnungen 104 auf, die beispielsweise als Flansch ausgebildet sein können. Die Vorrichtung 200 weist eine Zuführvorrichtung 220 zum Zuführen von Ausgangsmaterial durch die Zuführöffnungen 104 auf. Die Zuführvorrichtung 220 kann wie in Fig. 2b gezeigt eine oder mehrere Kammern 222 zum Aufnehmen von Ausgangsmaterial aufweisen. Die Kammern 222 sind über eine oder mehrere Schleusen 224 miteinander verbunden. Die Schleusen 224 können ein Stellglied wie zum Beispiel einen Schieber oder eine Klappe aufweisen, um die betreffende Schleuse 224 zu schließen. Die Zuführvorrichtung 220 kann ferner einen Materialkasten 226 zum Bereitstellen von Ausgangsmaterial aufweisen, der mit den Kammern 222 über eine Zuleitung wie zum Beispiel ein Rohr verbunden sein kann.

**[0094]** Die Zuführvorrichtung 220 weist eine Vielzahl von Fördervorrichtungen 228 auf, die jeweils dazu eingerichtet sind, Ausgangsmaterial von einer der Zuführöffnungen 104 in die Zwischenräume 112 zwischen den Heizelementen 110 zu transportieren. Im Beispiel der Fig. 5 sind die Fördervorrichtungen 228 als Förderschne-

cken 228 ausgebildet. Die Förderschnecken 228 erstrecken sich jeweils von dem Materialkasten 226 durch die jeweilige Zuführöffnung 104 in die Zwischenräume 112, zum Beispiel bis zu einer gegenüberliegenden Seitenwand der Reaktorkammer 102. Die Förderschnecken 228 können jeweils durch einen Motor 230 angetrieben werden, um Ausgangsmaterial aus dem Materialkasten 226 in den oberen Bereich 102-I der Reaktorkammer 102 zu transportieren.

**[0095]** In manchen Ausgestaltungen kann die Zuführvorrichtung 220 Sensoren 232 aufweisen, die dazu eingerichtet sein, die Menge an zu behandelndem Material (bzw. Material im Allgemeinen) in der Reaktorkammer 102 zu bestimmen, zum Beispiel um die Zufuhr von Ausgangsmaterial zu steuern. Im Beispiel der Fig. 5 sind die Sensoren 232 an dem von den Zuführöffnungen 104 abgewandten Ende der Förderschnecken 228 angeordnet. Die Sensoren 232 sind dazu eingerichtet zu erkennen, ob Material (zum Beispiel Ausgangsmaterial oder zu behandelndes Material) an diesen (distalen) Ende der Förderschnecken 228 ankommt. Dies kann darauf hindeuten, dass die Reaktorkammer 102 vollständig oder im Wesentlichen vollständig mit Material gefüllt ist. Die Zuführvorrichtung 220 kann dazu eingerichtet sein, Ausgangsmaterial zuzuführen, bis Material am distalen Ende der Förderschnecken 228 ankommt, zum Beispiel bis einer oder mehrere der Sensoren 232 melden, dass Material am betreffenden Sensor detektiert wird. Daraufhin kann die Zuführvorrichtung 220, zum Beispiel mittels der Schleuse(n) 224 die Zufuhr von Ausgangsmaterial unterbrechen, beispielsweise bis einer oder mehrere der Sensoren 232 melden, dass kein Material mehr am betreffenden Sensor detektiert wird. Die Sensoren 232 können beispielsweise als Drehflügelsensoren ausgebildet sein.

**[0096]** Fig. 6 zeigt den zweiten/unteren Bereich 102-II der Reaktorkammer 102 der Reaktorvorrichtung 200 gemäß einem Beispiel in Draufsicht. Im unteren Bereich 102-II der Reaktorkammer 102, zum Beispiel wie in Fig. 2a, 2b gezeigt oberhalb der Entnahmöffnung 106 bzw. oberhalb des Bodens der Reaktorkammer 102 ist eine Führungsvorrichtung 602 angeordnet, um die unteren Enden der Heizelemente 110 seitlich zu führen. Der Übersichtlichkeit halber ist von der Führungsvorrichtung 602 in Fig. 6 lediglich ein Teil im linken Bereich der Reaktorkammer 102 gezeigt, wohingegen von den Heizelementen 110 lediglich diejenigen im mittleren und rechten Bereich der Reaktorkammer 102 gezeigt sind. Die Führungsvorrichtung 602 kann sich aber wie aus Fig. 2a, 2b ersichtlich über die gesamte Breite der Reaktorkammer 102 erstrecken.

**[0097]** Die Führungsvorrichtung 602 kann eine Vielzahl von Öffnungen aufweisen, die jeweils dazu eingerichtet sind, das untere Ende eines Heizelements, zum Beispiel das Führungselement 312, aufzunehmen. Die Führungsvorrichtung 602 kann zum Beispiel wie in Fig. 6 dargestellt als Gitter ausgebildet sein, wobei die Umrundungen der Öffnungen beispielsweise durch Quer-

streben miteinander verbunden sein können. Die Öffnungen können dazu eingerichtet sein, eine seitliche Bewegung der Heizelemente 110 zu verhindern oder zu begrenzen.

**[0098]** Gleichzeitig kann die Führungsvorrichtung 602 aber dazu eingerichtet sein, eine ungehinderte thermische Ausdehnung der Heizelemente 110 in Längsrichtung (z-Richtung) zu ermöglichen. Beispielsweise können die Heizelemente 110 bzw. die Führungselemente 312 frei schwebend oder beweglich gelagert in der jeweiligen Öffnung angeordnet sein, so dass sich das Heizelement 110 bzw. das Führungselement 312 zumindest in Längsrichtung relativ zu der Öffnung frei bewegen kann. Alternativ oder zusätzlich kann die Führungsvorrichtung 602 als Ganze frei beweglich sein, zum Beispiel frei schwebend oder beweglich gelagert in der Reaktorkammer 102 angeordnet sein oder gehalten werden. In diesem Fall können die Heizelemente 110 bzw. das Führungselement 312 starr mit der Führungsvorrichtung 602, z.B. den Öffnungen, verbunden sein. Beispielsweise können die Führungselemente 312 an der Führungsvorrichtung 602 befestigt sein oder umgekehrt. Die Führungsvorrichtung 602 kann dazu eingerichtet sein, mit einer Seitenwand der Reaktorkammer 102 in Kontakt zu kommen (oder zu sein), um eine seitliche Bewegung der Heizelement 110 zu verhindern oder zu begrenzen.

**[0099]** In manchen Ausgestaltungen kann zusätzlich zu den Heizelementen 110 ein Strukturelement 604 in der Reaktorkammer 102 angeordnet sein, zum Beispiel im Zentrum der Reaktorkammer 102. Das Strukturelement 604 kann zum Beispiel als Halterung für die Führungsvorrichtung 602 und/oder als Verdrängungselement dienen. Das Strukturelement 604 kann beispielweise als Rohr ausgestaltet sein. Das Strukturelement 604 kann an seinem unteren Ende ein Haltemittel aufweisen, welches dazu eingerichtet ist, die Führungsvorrichtung 602 zu halten. Beispielsweise kann das Strukturelement 604 als Aufhängung für die Führungsvorrichtung 602. Hierzu kann das Strukturelement 604 zum Beispiel ein Haltemittel aufweisen, in das die Führungsvorrichtung 602 eingehängt werden kann. Alternativ oder zusätzlich können auch die Heizelemente 110 als Halterung oder Aufhängung für die Führungsvorrichtung dienen.

**[0100]** Fig. 7a, 7b und 7c zeigen die Entnahmeverrichtung 208 der Vorrichtung 200 gemäß einem Beispiel. In Fig. 7a ist die Entnahmeverrichtung 208 in Draufsicht gezeigt, in Fig. 7b in einer Seitenansicht und in Fig. 7c in einer perspektivischen Ansicht. Die Entnahmeverrichtung 208 ist wie in Fig. 2a, 2b gezeigt in oder benachbart zu der Entnahmöffnung 106 angeordnet. Die Entnahmeverrichtung 208 ist dazu eingerichtet, feste Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials vom Boden der Reaktorkammer 102 zu entnehmen und der Separationsvorrichtung 206 zuzuführen.

**[0101]** Die Entnahmeverrichtung 208 kann wie in Fig. 7a, 7b gezeigt beispielsweise als drehbar gelagertes Rad oder Scheibe ausgebildet sein (oder ein solches/eine solche umfassen), welches/welche durch den Motor 210

antrieben bzw. gedreht werden kann. Das Rad bzw. die Scheibe kann eine Vielzahl von Öffnungen 208A aufweisen, durch die sowohl feste als auch gasförmige Bestandteile aus der Reaktorkammer 102 in die Separationskammer 206A fallen bzw. entweichen können. Das Rad bzw. die Scheibe können als Abräumvorrichtung ausgebildet sein und dazu eingerichtet sein, thermochemisch behandeltes Material derart abzutragen und/oder abzuräumen (z.B. zu entfernen und/oder wegzubewegen), dass weiteres thermochemisch behandeltes Material in die und/oder durch die Entnahmöffnung 106 nachkommen (z.B. nachsacken oder nachfließen) kann. Im Beispiel der Fig. 7a-7c weist die Entnahmeverrichtung 208 (z.B. das Rad bzw. die Scheibe) eine Vielzahl von Blättern oder Schaufeln 208B auf, die in Umfangsrichtung miteinander überlappen und in axialer Richtung durch Öffnungen 208A in Form von Spalten voneinander beabstandet sind. Die Blätter 208B können dazu eingerichtet sein, in der Reaktorkammer 102 befindliches festes Material abzutragen (zum Beispiel abzutrennen oder abzuschneiden), wenn die Entnahmeverrichtung 208 gedreht wird. Hierzu können die Blätter 208B an ihren oberen, zu den Spalten 208B benachbarten Enden eine scharfe Kante oder Klinge aufweisen. Das abgetrennte oder abgeschnittene Material kann anschließend durch die Spalte 208B in die Separationskammer 206A fallen oder befördert werden. Dadurch kann in der Reaktorkammer 102 verbleibendes Material nach unten nachrutschen und sich so von erstem Bereich 102-I in den zweiten Bereich 102-II bewegen. Die Form der Blätter 208B, insbesondere die Ausdehnung und/oder die Steigung bzw. der Neigungswinkel der Blätter 208B in Umfangsrichtung, kann so angepasst sein, dass die Entnahmerate der festen Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials über die Entnahmöffnung 106 im Wesentlichen gleich ist (zum Beispiel um weniger als  $\pm 20\%$ , in einem Beispiel um weniger als  $\pm 10\%$  variiert). Somit kann zum Beispiel eine im Wesentlichen gleiche Fließgeschwindigkeit des zu behandelnden Materials in den Zwischenräumen 112 zwischen den Heizelementen 110 erreicht werden. Beispielsweise kann die Ausdehnung und/oder die Steigung bzw. der Neigungswinkel der Blätter 208B in Umfangsrichtung als Funktion des Radius variieren, d.h. sich in radialer Richtung von innen nach außen verändern.

**[0102]** Die Vorrichtung 200 kann dazu eingerichtet sein, mittels der Entnahmeverrichtung 208 kontinuierlich Material aus der Reaktorkammer zu entnehmen, zum Beispiel indem das Rad/die Scheibe kontinuierlich gedreht wird. Alternativ oder zusätzlich kann die Vorrichtung 200 auch dazu eingerichtet sein, Material schritt- bzw. stückweise aus der Reaktorkammer zu entnehmen, beispielsweise indem das Rad/die Scheibe in bestimmten, z.B. regelmäßigen Abständen, gedreht wird, zum Beispiel jeweils um einen bestimmten Drehwinkel.

**[0103]** Fig. 8 zeigt ein Flussdiagramm eines Verfahrens 800 zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts gemäß einem Beispiel. Das Verfahren 800 kann mit einer Reak-

torvorrichtung nach einem der hierin beschriebenen Beispiele ausführt werden, zum Beispiel der Vorrichtung 100 aus Fig. 1a, 1b oder der Vorrichtung 200 aus Fig. 2a, 2b. Letztere wird im Folgenden zur beispielhaften Illustration des Verfahrens 800 herangezogen. Die Ausführung des Verfahrens 800 ist nicht auf die durch das Flussdiagramm in Fig. 8 angedeutete Abfolge beschränkt. Soweit technisch möglich können die Schritte des Verfahrens 800 in einer beliebigen Reihenfolge ausgeführt werden und insbesondere auch zumindest teilweise gleichzeitig. Beispielsweise können die Schritte 802, 804 und 806 zumindest teilweise gleichzeitig ausgeführt werden.

**[0104]** Das Verfahren 800 kann dazu verwendet werden, aus einem kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterial ein Pyrolyseprodukt, insbesondere ein veredeltes oder reformierte Pyrolyseprodukt (z.B. ein Pyrolyseprodukt mit einer erhöhten Qualität und/oder einem erhöhten Brennwert) herzustellen. Das Pyrolyseprodukt kann beispielsweise ein Pyrolyseöl, insbesondere ein veredeltes oder reformiertes Pyrolyseöl sein. Alternativ oder zusätzlich kann das Pyrolyseprodukt auch andere Bestandteile wie zum Beispiel Pyrolysekoks und/oder Pyrolysegas umfassen oder diese können als Nebenprodukte des Verfahrens 800 entstehen.

**[0105]** In Schritt 802 wird das kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterial durch die Zuführöffnungen 104 in den ersten/oberen Bereich 102-I der Reaktorkammer 102 zugeführt, beispielsweise mittels der Zuführvorrichtung 220. Das kohlenstoffhaltige Ausgangsmaterial kann insbesondere in biogenes Material sein (d.h. zumindest teilweise biologischen Ursprungs sein), zum Beispiel Klärschlamm und/oder Biomasse. Das Ausgangsmaterial kann in stückiger Form zugeführt werden, zum Beispiel als Granulat und/oder Pellets. Die Stückgröße des Granulats bzw. der Pellets kann beispielsweise zwischen 3 mm und 10 mm betragen. Das Ausgangsmaterial kann beim Zuführen in die Reaktorkammer 102 eine Temperatur von weniger als 100°C, beispielsweise Raumtemperatur haben. Das Ausgangsmaterial kann in dem Materialkasten 226 bereitgestellt werden, zum Beispiel aus der/den Kammer(n) 222, und kann mittels der Förderschnecken 228 durch die Zuführöffnungen 104 in den oberen Bereich 102-I transportiert werden.

**[0106]** In Schritt 804 wird das Ausgangsmaterial in der Reaktorkammer 102 thermochemisch behandelt, um das Pyrolyseprodukt herzustellen. Hierzu wird das Ausgangsmaterial mittels der Heizelemente 110 auf eine für die Durchführung der thermochemischen Behandlung geeignete Temperatur erhitzt. Im Beispiel der Vorrichtung 200 kann hierzu in der Brennkammer 202 ein Brennstoff verbrannt werden und das dabei entstehende Rauchgas durch die Einlassöffnungen 302 in die Heizelemente 110 eingeleitet werden, um diese zu erhitzen. Der Brennstoff kann zum Beispiel ein gasförmiger Brennstoff wie beispielsweise Erdgas sein. Vorzugsweise umfasst der Brennstoff ein zum Beispiel mittels des Verfahrens 800 hergestelltes Pyrolyseprodukt (z.B. Pyrolysegas). In einem Beispiel kann der Brennstoff vollständig

aus einem oder mehreren mittels des Verfahrens 800 hergestellten Pyrolyseprodukten, insbesondere Pyrolysegas, bestehen. Somit kann das Verfahren 800 vollständig oder im Wesentlichen selbsterhaltend betrieben werden. Der Brennstoff kann beispielsweise mittels der Separationsvorrichtung 206 gewonnen und von dieser der Brennkammer 202 zugeführt werden.

**[0107]** Während der thermochemischen Behandlung bewegt sich das Ausgangsmaterial von dem ersten Bereich 102-I der Reaktorkammer 102 in den zweiten Bereich 102-II. Im Beispiel der Vorrichtung 200 kann hierzu mittels der Entnahmeverrichtung 208 bereits thermochemisch behandeltes Material am Boden der Reaktorkammer 102 entnommen werden, zum Beispiel als Teil des unten beschriebenen Schritts 806. Das darüber befindliche Ausgangsmaterial kann aufgrund der Gravitation in der Reaktorkammer 102 nach unten sacken oder rutschen und sich so während der thermochemischen Behandlung sukzessive von oben nach unten durch die Reaktorkammer 102 bewegen. Die Entnahmerate (z.B. die Entnahmemenge und/oder Entnahmehäufigkeit) kann so gewählt werden, dass die Verweildauer des Materials in der Reaktorkammer 102 für die durchzuführende Behandlung geeignet ist. Die Verweildauer kann zum Beispiel zwischen 1 Stunde und 5 Stunden, in einem Beispiel zwischen 2 Stunden und 3 Stunden betragen. Die Materialdurchsatz durch die Reaktorvorrichtung 200 (zum Beispiel die Zuführrate von Ausgangsmaterial und/oder die Entnahmerate von thermochemisch behandeltem Material) kann zum Beispiel zwischen 100 kg/Stunde und 50 t/Stunde, in einem Beispiel zwischen 1 t/Stunde und 10 t/Stunde betragen.

**[0108]** Die Temperatur der Heizelemente 110 und/oder der Temperaturverlauf entlang der Heizelemente 110 können so gewählt werden, dass das Material eine für die durchzuführende thermochemischen Behandlung geeignete Temperaturkurve durchläuft, während es sich von oben nach unten durch die Reaktorkammer 102 bewegt. Dies kann zum einen durch eine geeignete Ausgestaltung und/oder Anordnung der Heizelemente 110 erreichen werden, beispielsweise durch eine geeignete Wahl der Abmessungen der Heizelemente 110 (z.B. ihrer Länge und/oder ihres Durchmessers), des Abstands zwischen den Heizelementen 110 und/oder zwischen den Heizelementen und der Seitenwand der Reaktorkammer 102 und/oder durch das Vorsehen von Strömungsführungsmitteln in den Heizelementen 110. Alternativ oder zusätzlich kann dies erreicht werden, indem eine Temperatur und/oder eine Durchflussrate des Wärmeträgermediums (z.B. des Rauchgases aus der Brennkammer 202) geeignet gewählt wird. Die Rauchgastemperatur kann beispielsweise durch die der Brennkammer 202 zugeführte Luftmenge und/oder Brennstoffmenge beeinflusst werden. Die Temperatur des in die Heizelemente 110 eingeleiteten Wärmeträgermediums (z.B. an der Einlassöffnung 302A) kann zum Beispiel zwischen 500°C und 1200°C, in manchen Beispielen zwischen 650°C und 1000°C, in manchen Bei-

spielen zwischen 750°C und 900°C, in einem Beispiel zwischen 830°C und 870°C betragen. Die Durchflussgeschwindigkeit des Wärmeträgermediums durch die Heizelemente 110, z.B. im Innenrohr 302 und/oder im Außenrohr 304, kann zum Beispiel zwischen 2 m/s und 20 m/s, in einem Beispiel zwischen 5 m/s und 15 m/s betragen. Die Temperatur des aus den Heizelementen 110 austretenden Wärmeträgermediums (z.B. an der Austrittsöffnung 304A) kann zum Beispiel zwischen 250°C und 650°C, in manchen Beispielen zwischen 350°C und 600°C, in manchen Beispielen zwischen 400°C und 550°C, in einem Beispiel zwischen 430°C und 470°C betragen.

**[0109]** Das Ausgangsmaterial kann noch nicht (oder auch noch nicht vollständig) pyrolysiertes Material sein, zum Beispiel im Wesentlichen unbehandelter Klärschlamm und/oder Biomasse. Das thermochemische Behandeln in Schritt 804 kann zunächst ein Pyrolysern des Ausgangsmaterials in Schritt 804A und anschließend ein Nachbehandeln des pyrolysierten Materials in Schritt 804B umfassen. Beide Schritte (d.h. das Pyrolysern und das Nachbehandeln) erfolgen während das Material sich durch die Reaktorkammer 102 nach unten bewegt. Das Pyrolysern und das Nachbehandeln können im Wesentlichen kontinuierlich (d.h. ohne eindeutige Trennung) ineinander übergehen bzw. zu einem durchgängigen Umwandlungsprozess verschmelzen. Die thermochemische Behandlung kann unter vollständigen Ausschluss oder im Wesentlichen unter Ausschluss von Sauerstoff erfolgen.

**[0110]** Um das Ausgangsmaterial zu pyrolysern, wird das Ausgangsmaterial zunächst im ersten/oberen Bereich 102-I mittels der Heizelemente 110 auf eine Pyrolysetemperatur erhitzt, d.h. auf eine (erste) Temperatur, die für eine teilweise oder vollständige pyrolytische Zersetzung des Ausgangsmaterial geeignet ist. Abhängig vom verwendeten Ausgangsmaterial kann die Pyrolysetemperatur zum Beispiel zwischen 350°C und 550°C, in einem Beispiel zwischen 400°C und 500°C betragen. Um das Ausgangsmaterial auf die Pyrolysetemperatur zu erhitzen, können die Heizelemente 110 im oberen Bereich 102-I auf eine (erste) Heizelement-Temperatur erhitzt werden, die größer oder gleich der Pyrolysetemperatur ist. Die erste Heizelement-Temperatur kann zum Beispiel zwischen 400°C und 600°C, in einem Beispiel zwischen 450°C und 550°C betragen. Die erste Heizelement-Temperatur kann beispielsweise die Temperatur der Außenwand des Außenrohrs 304 im ersten Bereich 102-I sein.

**[0111]** Für die Nachbehandlung des (teilweise oder vollständig) pyrolysierten Materials in Schritt 804B wird das Material im zweiten Bereich 102-II der Reaktorkammer 102 mittels der Heizelemente 110 auf eine Nachbehandlungstemperatur erhitzt, welche im Allgemeinen höher als die Pyrolysetemperatur ist. Die Nachbehandlung kann beispielsweise dazu dienen, dass pyrolysierte Material, insbesondere ein oder mehrere darin enthaltene Pyrolyseprodukte, zu veredeln oder zu reformieren, zum

Beispiel um deren chemische Zusammensetzung (z.B. Kettenlänge und/oder Anteile von chemischen Elementen wie Kohlenstoff, Sauerstoff und/oder Wasserstoff), Qualität und/oder Brennwert zu verändern. Abhängig vom verwendeten Ausgangsmaterial kann die Nachbehandlungstemperatur zum Beispiel zwischen 500°C und 750°C, in einem Beispiel zwischen 550°C und 700°C betragen. Um das Material auf die Nachbehandlungstemperatur zu erhitzen, werden die Heizelemente 110 im unteren Bereich 102-II auf eine (zweite) Heizelement-Temperatur erhitzt, die größer oder gleich der Nachbehandlungstemperatur ist. Die zweite Heizelement-Temperatur kann zum Beispiel zwischen 550°C und 800°C, in einem Beispiel zwischen 600°C und 750°C betragen. Die zweite Heizelement-Temperatur kann beispielsweise die Temperatur der Außenwand des Außenrohres 304 im zweiten Bereich 102-II sein. In manchen Ausgestaltungen kann die Nachbehandlung eine thermokatalytische Nachbehandlung sein, wobei das zumindest teilweise pyrolysierte Material in der Reaktorkammer 102, insbesondere ein fester Bestandteil des zumindest teilweise pyrolysierten Materials, als Katalysator dienen kann.

**[0112]** In manchen Ausgestaltungen kann das thermochemische Behandeln in Schritt 804 das Pyrolysieren in Schritt 804A oder das Nachbehandeln in Schritt 804B nicht umfassen. Beispielsweise kann das Ausgangsmaterial bereits vor dem Zuführen in die Reaktorkammer 102 ganz oder teilweise pyrolysiert worden sein und das thermochemische Behandeln in Schritt 804 lediglich die Nachbehandlung in Schritt 804B umfassen. Hierzu kann beispielsweise die Temperatur der Heizelemente 110 und/oder die Verweildauer des Materials entsprechend angepasst werden. In manchen Beispielen können alternativ oder zusätzlich auch die Heizelemente 110 entsprechend ausgestaltet sein, beispielsweise eine kürzere Länge aufweisen.

**[0113]** Das Verfahren 800 kann ferner das Entnehmen von thermochemisch behandeltem Material (z.B. des nachbehandelten Materials) aus der Reaktorkammer 102 in Schritt 806 umfassen, beispielsweise mittels der Entnahmeverrichtung 208. Durch kontinuierliches oder schrittweises bzw. wiederholtes Entnehmen des thermochemisch behandelten Materials kann das in der Reaktorkammer 102 befindliche Material sukzessive von den Zuführöffnungen 104 entlang der Heizelemente 110 durch die Reaktorkammer 102 zu der Entnahmeöffnung 106 bewegt werden. Wie oben erwähnt können zumindest die Schritte 804 und 806 zumindest teilweise gleichzeitig ausgeführt werden. Beispielsweise kann während der thermochemischen Behandlung in Schritt 804 kontinuierlich oder immer wieder thermochemisch behandeltes Material aus der Reaktorkammer 102 entnommen werden, um das zu behandelnde Material während der thermochemischen Behandlung zu bewegen. Zudem kann gleichzeitig in Schritt 802 neues Ausgangsmaterial der Reaktorkammer 102 zugeführt werden, zum Beispiel ebenfalls kontinuierlich oder schrittweise.

**[0114]** Schritt 806 kann außerdem das Separieren von

Bestandteilen des thermochemisch behandelten Materials umfassen, beispielsweise mittels der Separationsvorrichtung 206. Das Material kann zum Beispiel in feste und gasförmige Bestandteile getrennt werden, in manchen Beispielen in feste, kondensierbare/flüssige und nicht-kondensierbare/gasartige Bestandteile. Einer oder mehrere dieser Bestandteile kann/können das herzustellende Pyrolyseprodukt sein. Dieses kann in manchen Ausgestaltungen weiteren Nachbehandlungsprozesses, zum Beispiel Rafinationsprozessen unterzogen werden. Schritt 806 kann ferner das Separieren oder Gewinnen von Brennstoff für die Brennkammer 202 aus dem thermochemisch behandelten Material umfassen. Beispielsweise kann ein nicht-kondensierbares Pyrolysegas mittels der Separationsvorrichtung 206 von anderen Bestandteilen des thermochemisch behandelten Materials getrennt werden und in die Brennkammer 202 eingeleitet werden.

**[0115]** Fig. 9a und 9b zeigen eine Entnahmeverrichtung 208 der Reaktorkammer 200 aus Fig. 2a, 2b gemäß einem weiteren Beispiel. Ähnlich der Entnahmeverrichtung aus Fig. 7a-7c ist die Entnahmeverrichtung 208 in oder benachbart zu der Entnahmeöffnung 106 angeordnet und dazu eingerichtet, thermochemisch behandeltes Material 108B (insbesondere feste Bestandteile davon) durch die Entnahmeöffnung 106 aus der Reaktorkammer 102 zu entnehmen und der Separationsvorrichtung 206 zuzuführen.

**[0116]** Die Entnahmeverrichtung 208 umfasst eine Auflage 902 für das thermochemisch behandelte Material 108B, die in oder unterhalb der Entnahmeöffnung 106 angeordnet ist. Die Auflage 902 weist eine oder mehrere Öffnungen 904 auf, durch die feste Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials in die Separationsvorrichtung 206 gelangen (z.B. fallen) können. Im Beispiel der Fig. 9a, 9b ist die Auflage 902 als eine Vielzahl von Querverbindungen oder Querstreben ausgebildet, die sich jeweils in horizontaler Richtung (z.B. entlang der y-Richtung in Fig. 9b) durch das Reaktorgehäuse (z.B. durch die Entnahmeöffnung 106 oder die Separationskammer 206A) hindurch erstrecken. Die Querstreben sind durch spaltförmige Öffnungen 904 voneinander getrennt. Die Auflage 902 (z.B. die Querstreben) kann ein Füllmaterial aufweisen, welches beispielsweise dazu dienen kann, ein Verziehen der Auflage 902 bei Erwärmung zu vermeiden oder zu verringern und/oder ein Aufwärmen der Auflage 902 zu verlangsamen. In einem Beispiel ist die Auflage 902 (z.B. die Querstreben) im Inneren mit Beton, insbesondere Dämm- oder Isolierbeton, ausgegossen.

**[0117]** Oberhalb der Auflage 902 kann eine Materialführungsvorrichtung 906 angeordnet sein, die dazu eingerichtet ist, feste Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials 108B auf die Auflage 902 zu führen oder zu lenken. Hierzu kann die Materialführungsvorrichtung 906 beispielweise eine oder mehrere geneigte Flächen aufweisen. Im Beispiel der Fig. 9a begrenzt oder bildet die Materialführungsvorrichtung eine Vielzahl sich

nach unten hin verjüngender Öffnungen (die z.B. wie in Fig. 9a gezeigt in der x-z-Ebene einen dreieckigen oder trichterförmigen Querschnitt haben können). Die Öffnungen sind jeweils oberhalb einer der Querstreben der Auflage 902 angeordnet. Feste Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials 108B können in diesen Öffnungen wie in Fig. 9a gezeigt eine auf den Querstreben aufliegende Schüttung bilden, wobei in Fig. 9a der einfacheren Darstellung wegen das thermochemisch behandelte Material 108B nur in einer der Öffnungen gezeigt ist.

**[0118]** Die Entnahmeverrichtung 208 weist ferner eine Abräumvorrichtung auf, die dazu eingerichtet ist, auf der Auflage 902 aufliegendes thermochemisch behandeltes Material abzutragen und/oder abzuräumen. Die Abräumvorrichtung kann beispielsweise dazu eingerichtet sein, auf der Auflage 902 aufliegendes Material (z.B. Material im Zwischenraum zwischen der Auflage 902 und der Materialführungsvorrichtung 906) in die Öffnungen 904 zu bewegen (z.B. zu schieben), zum Beispiel so dass das Material in die Separationsvorrichtung 206 fällt.

**[0119]** Im Beispiel der Fig. 9a, 9b weist die Abräumvorrichtung eine Vielzahl von Abräumschiebern 908 auf, die jeweils oberhalb (z.B. auf) einer der Querstreben angeordnet sind und entlang der x-Richtung beweglich sind. Die Abräumvorrichtung weist ferner einen Antrieb 910 auf, der dazu eingerichtet ist, die Abräumschieber 908 entlang der x-Richtung hin und her zu bewegen (in Fig. 9a, 9b durch die horizontalen Pfeile angedeutet), um auf der entsprechenden Querstrebe aufliegendes Material in die Öffnungen 904 zu schieben. Der Antrieb 910 kann hierzu beispielsweise eine Antriebswelle und einen mit der Antriebswelle gekoppelten Exzenter aufweisen, wobei der Exzenter dazu eingerichtet sein kann, die Drehbewegung der Antriebswelle in eine Längsbewegung der Abräumschieber 908 umzusetzen. In manchen Ausgestaltungen können alle Abräumschieber 908 mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt werden, zum Beispiel starr miteinander gekoppelt sein. Die Verwendung linear beweglicher Abräumschieber wie in Fig. 9a, 9b kann vorteilhaft sein, um eine möglichst gleichmäßige Entnahme fester Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials durch die Entnahmöffnung 106 zu erreichen. Die Entnahmerate kann durch Änderung der Geschwindigkeit bzw. der Frequenz der Bewegung der Abräumschieber 908 angepasst werden.

**[0120]** Fig. 10a und 10b zeigen eine Entnahmeverrichtung 208 der Reaktorvorrichtung 200 aus Fig. 2a, 2b gemäß einem weiteren Beispiel. Die Entnahmeverrichtung 208 ist ähnlich der Entnahmeverrichtung aus Fig. 9a, 9b ausgebildet und weist ebenfalls eine Auflage 902 mit Öffnungen 904, eine Materialführungsvorrichtung 906 und eine Abräumvorrichtung auf. Im Beispiel der Fig. 10a, 10b ist die Abräumvorrichtung als ein drehbarer Abräumschieber oder Abräumarm 912 ausgebildet. Der Abräumarm 912 ist zwischen der Auflage 902 und der Materialführungsvorrichtung 906 angeordnet. Durch Drehen des Abräumarms 912 (z.B. in einer horizontalen Ebene)

ne) kann auf der Auflage 902 aufliegendes Material in die Öffnungen 904 geschoben werden. Die Entnahmerate kann durch Änderung der Drehzahl des Abräumarms 912 angepasst werden.

**[0121]** Die beschriebenen erfindungsgemäßen Ausführungsformen und die Figuren dienen nur zur rein beispielhaften Illustration. Die Erfindung kann in ihrer Gestalt variieren, ohne dass sich das zugrundeliegende Funktionsprinzip ändert. Der Schutzmfang der erfindungsgemäßen Vorrichtung und des erfindungsgemäßen Verfahrens ergibt sich allein aus den folgenden Ansprüchen.

#### LISTE DER BEZUGSZEICHEN

15	<b>[0122]</b>
20	100 - Reaktorvorrichtung 102 - Reaktorkammer 102-I - erster/oberer Bereich 102-II - zweiter/unterer Bereich 104 - Zuführöffnung 106 - Entnahmöffnung 108A - Ausgangsmaterial 108B - thermochemisch behandeltes Material
25	110 - Heizelement 112 - Zwischenraum 200 - Reaktorvorrichtung 200A - Reaktorgehäuse 200B - Isolation
30	202 - Brennkammer 204 - Abführkammer 204A - obere Zwischenwand 204B - untere Zwischenwand 206 - Separationsvorrichtung 206A - Separationskammer 208 - Entnahmeverrichtung 208A - Öffnung 208B - Blatt/Schaufel 210 - Motor
35	212 - Förderschnecke 214 - Motor 216 - Austrittsrohr 218 - Sensor
40	220 - Zuführvorrichtung 222 - Kammer 224 - Schleusse 226 - Materialkasten 228 - Fördervorrichtung/Förderschecke
45	230 - Motor 232 - Sensor 302 - Innenrohr 302A - Eintrittsöffnung 304 - Außenrohr 304A - Austrittsöffnung 306 - Isolation 308 - Zwischenraum 310 - Halteelement/Kragen
50	
55	

312 - Führungselement	
402 - Isolation	
404 - Abführrohr	
406 - Dichtung	
408 - Schweißverbindung/Schweißnaht	
602 - Führungsvorrichtung	5
604 - Strukturelement	
800 - Verfahren zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts	
802 - Zuführen von Ausgangsmaterial	10
804 - Thermochemisches Behandeln des Ausgangsmaterials	
804A - Pyrolysieren des Ausgangsmaterials	
804B - Nachbehandeln des pyrolysierten Materials	
806 - Separieren von Bestandteilen des thermochemisch behandelten Materials	15
902 - Auflage	
904 - Öffnung	
906 - Materialführungsvorrichtung	
908 - Abräumschieber	20
910 - Antrieb	
912 - Abräumarm	

#### Patentansprüche

1. Reaktvorrichtung (100, 200) zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts mittels thermochemischer Behandlung eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials (108A), wobei die Reaktvorrichtung (100, 200) aufweist:

eine Reaktorkammer (102) mit einer oder mehreren Zuführöffnungen (104) zum Zuführen des Ausgangsmaterials (108A) in einem ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) und einer oder mehreren Entnahmöffnungen (106) zum Entnehmen von thermochemisch behandeltem Material (108B) in einem zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102); und einer Vielzahl von Heizelementen (110), die voneinander beabstandet in der Reaktorkammer (102) angeordnet sind und sich von dem ersten Bereich (102-I) in den zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) erstrecken,

wobei die Reaktvorrichtung (100, 200) dazu eingerichtet ist, das zu behandelnde Material im Laufe der thermochemischen Behandlung von dem ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) entlang der Heizelemente (110) in den zweiten Bereich (102-II) zu bewegen und dabei mittels der Heizelemente (110) im ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) befindliches zu behandelndes Material auf eine erste Temperatur zu erhitzen und gleichzeitig im zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) befindliches zu behandelndes Material auf eine zweite Temperatur zu erhitzen, welche höher als die

erste Temperatur ist.

2. Reaktvorrichtung (100, 200) nach Anspruch 1, wobei der erste Bereich (102-I) und der zweite Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) nicht strukturell oder baulich voneinander abgegrenzt sind, insbesondere wobei die Reaktorkammer (102) im ersten Bereich (102-I), zwischen dem ersten Bereich (102-I) und dem zweiten Bereich (102-II) sowie im zweiten Bereich (102-II) durchgängig die gleichen Abmessungen senkrecht zur Bewegungsrichtung des zu behandelnden Materials aufweist.
3. Reaktvorrichtung (100, 200) nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Reaktvorrichtung (100, 200) dazu eingerichtet ist, ein erhitztes Wärmeträgermedium entgegen der Bewegungsrichtung des zu behandelnden Materials durch die Heizelemente (110) zu leiten.
4. Reaktvorrichtung (100, 200) nach Anspruch 3, wobei jedes der Heizelemente (110) ein doppelwandiges Rohr mit einem Innenrohr (302) und einem Außenrohr (304) aufweist, wobei das Innenrohr (302) zumindest teilweise in dem Außenrohr (304) aufgenommen ist und sich zwischen dem Innenrohr (302) und dem Außenrohr (304) ein Zwischenraum (308) befindet, wobei das Innenrohr (302) an einem dem zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) abgewandten ersten Ende des betreffenden Heizelements (110) eine Einlassöffnung (302A) zur Einleitung des erhitzten Wärmeträgermediums aufweist und der Zwischenraum (308) zwischen dem Innenrohr (302) und dem Außenrohr (304) an einem dem ersten Ende gegenüberliegenden zweiten Ende des betreffenden Heizelements (110) mit dem Innenrohr (302) in Fluidverbindung steht, um das durch das Innenrohr (302) eingeleitete Wärmeträgermedium durch den Zwischenraum (308) vom zweiten Ende des betreffenden Heizelements (110) in Richtung des ersten Endes des betreffenden Heizelements (110) zurückzuleiten.
5. Reaktvorrichtung (100, 200) nach Anspruch 4, wobei die Reaktvorrichtung (100, 200) ferner eine Abführkammer (204) zum Abführen des Wärmeträgermediums aufweist, die an einer dem ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) benachbarten Seite der Reaktorkammer (102) angeordnet ist, wobei die Zwischenräume (308) zwischen den Innenrohren (302) und den Außenrohren (304) der Heizelemente (110) jeweils am ersten Ende des betreffenden Heizelements (110) mit der Abführkammer (204) in Fluidverbindung stehen.
6. Reaktvorrichtung (100, 200) nach Anspruch 5, wobei die Außenrohre (304) der Heizelemente (110) jeweils an einer Wand (204B) zwischen der Reak-

- torkammer (102) und der Abführkammer (204) befestigt sind und die Innenrohre (302) der Heizelemente (110) sich jeweils durch die Abführkammer (204) hindurch zu der betreffenden Einlassöffnung (204A) erstrecken, wobei die Innenrohre (302) der Heizelemente (110) vorzugsweise jeweils ein Haltelement (310) aufweisen und mittels des Haltelements (310) auf einer von der Reaktorkammer (110) abgewandten Seite der Abführkammer (204) herausnehmbar eingehängt und/oder aufgelegt sind. 5
7. Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der Ansprüche 3 bis 6, wobei die Reaktorvorrichtung (100, 200) ferner eine Brennkammer (202) zur Erzeugung des erhitzen Wärmeträgermediums aufweist, die mit Einlassöffnungen der Heizelemente (110), insbesondere mit den Einlassöffnungen (302A) der Innenrohre (302) der Heizelemente (110), in Fluidverbindung steht, wobei die Abführkammer (204) vorzugsweise zwischen der Reaktorkammer (202) und der Brennkammer (102) angeordnet ist. 15
8. Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die von dem ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) abgewandten zweiten Enden der Heizelemente (110) jeweils frei schwebend und/oder beweglich gelagert in der Reaktorkammer (102) angeordnet sind, um eine ungehinderte thermische Längsausdehnung der Heizelemente (110) zu ermöglichen. 20
9. Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der erste Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) oberhalb des zweiten Bereichs (102-II) der Reaktorkammer (102) angeordnet ist, so dass das zu behandelnde Material sich zwischen den Heizelementen (110) zumindest teilweise aufgrund der Gravitation von dem ersten Bereich (102-I) in den zweiten Bereich (102-II) bewegen kann, wobei die Reaktorvorrichtung (100, 200) vorzugsweise dazu eingerichtet ist, thermochemisch behandeltes Material durch die eine oder die mehreren Entnahmöffnungen (106) aus der Reaktorkammer (102) derart zu entnehmen, dass das zu behandelnde Material sich zwischen den Heizelementen (110) zumindest teilweise aufgrund der Gravitation von dem ersten Bereich (102-I) in den zweiten Bereich (102-II) bewegt. 25
10. Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Reaktorvorrichtung (100, 200) ferner eine oder mehrere Fördervorrichtungen (228) aufweist, die jeweils dazu eingerichtet sind, Ausgangsmaterial (108A) von einer der einen oder der mehreren Zuführöffnungen (104) in Zwischenräume (112) zwischen den Heizelementen (110) in der Reaktorkammer (102) zu transportieren. 30
11. Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei:
- die zweite Temperatur zwischen 450°C und 950°C beträgt, um ein in dem zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) befindliches Pyrolyseprodukt nachzubehandeln; und/oder
  - die erste Temperatur zwischen 200°C und 600°C beträgt, um in dem ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) befindliches Ausgangsmaterial (108A) zumindest teilweise zu pyrolysieren; und /oder
  - die zweite Temperatur mindestens 50°C, vorzugsweise mindestens 100°C höher als die erste Temperatur ist.
12. Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Reaktorvorrichtung (100, 200) ferner eine Separationsvorrichtung (206) aufweist, die mit der einen oder den mehreren Entnahmöffnungen (106) verbunden ist und dazu eingerichtet ist, feste und gasförmige Bestandteile des thermochemisch behandelten Materials (108B) voneinander zu trennen, wobei die Separationsvorrichtung (206) vorzugsweise an einer dem zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) benachbarten Seite der Reaktorkammer (102) angeordnet ist. 35
13. Verfahren (800) zur Herstellung eines Pyrolyseprodukts unter Verwendung einer Reaktorvorrichtung (100, 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren (800) umfasst:
- Zuführen eines kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterials (108A), insbesondere eines biogenen Ausgangsmaterials, in den ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) durch die einen oder die mehreren Zuführöffnungen (104); und thermochemisches Behandeln des Ausgangsmaterials (108A) durch Erhitzen des Ausgangsmaterials (108A) mittels der Vielzahl von Heizelementen (110), um das Pyrolyseprodukt herzustellen, wobei das Ausgangsmaterial (108A) sich während des thermochemischen Behandlens von dem ersten Bereich (102-I) in den zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) bewegt. 40
14. Verfahren (800) nach Anspruch 13, wobei:
- das thermochemische Behandeln des Ausgangsmaterials (108A) das Erhitzen des Ausgangsmaterials (108A) im ersten Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) auf eine Pyrolysetemperatur umfasst, um das Ausgangsmaterial (108A) zumindest teilweise zu pyrolysieren, und 45

das Erhitzen des zumindest teilweise pyrolysierten Materials im zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) auf eine Nachbehandlungs-temperatur, um ein in dem zumindest teilweise pyrolysierten Material enthaltenes Pyrolyseprodukt nachzubehandeln; und/oder  
5  
das Ausgangsmaterial (108A) zumindest teilweise pyrolysiertes Material umfasst und das thermochemische Behandeln des Ausgangsmaterials (108A) das Erhitzen des teilweise pyrolysierten Materials im ersten Bereich (102-I) und/oder im zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) auf die Nachbehandlungstemperatur umfasst, um ein in dem zumindest teilweise pyrolysierten Material enthaltenes Pyrolyseprodukt nachzubehandeln.  
10  
15

**15.** Verfahren (800) nach Anspruch 13 oder 14, wobei:

die Pyrolysetemperatur zwischen 200°C und 20  
600°C beträgt; und/oder  
die Nachbehandlungstemperatur zwischen 450°C und 950°C beträgt; und/oder  
der erste Bereich (102-I) der Reaktorkammer (102) oberhalb des zweiten Bereichs (102-II) der Reaktorkammer (102) angeordnet ist und das Verfahren (800) ferner das Entnehmen von thermochemisch behandeltem Material aus der Reaktorkammer (102) durch die eine oder die mehreren Entnahmöffnungen (106) umfasst, so 25  
dass das Ausgangsmaterial (108A) sich während des thermochemischen Behandelns zumindest teilweise aufgrund der Gravitation von dem ersten Bereich (102-I) in den zweiten Bereich (102-II) der Reaktorkammer (102) bewegt. 30  
35

40

45

50

55

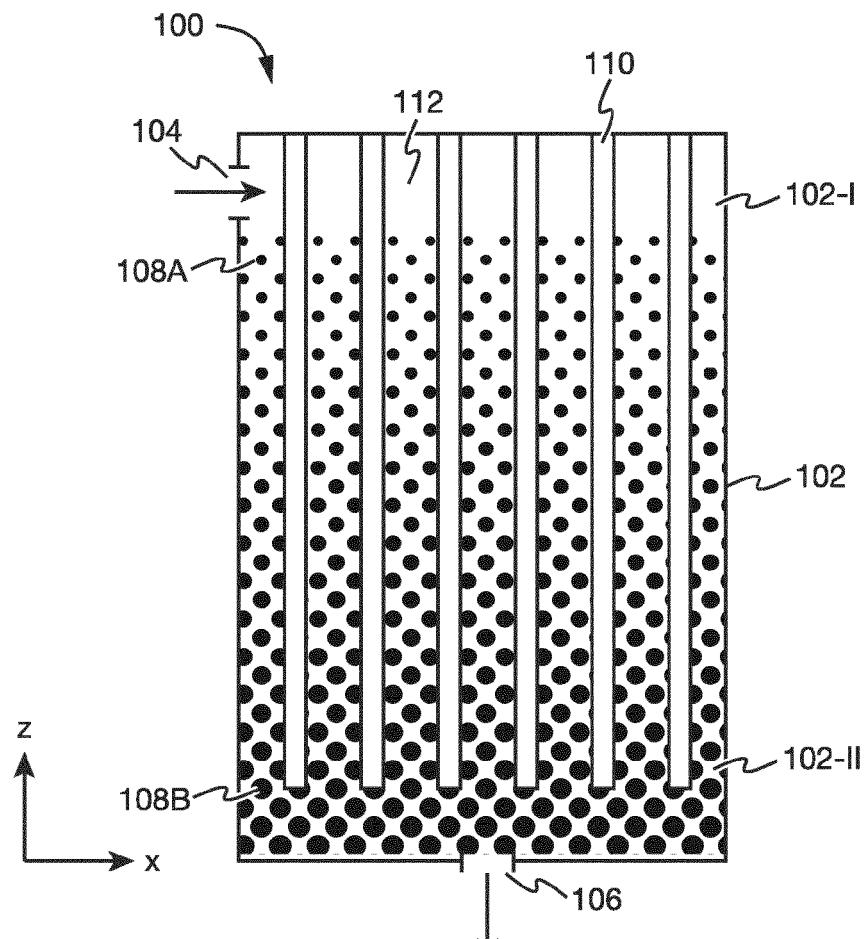


Fig. 1a

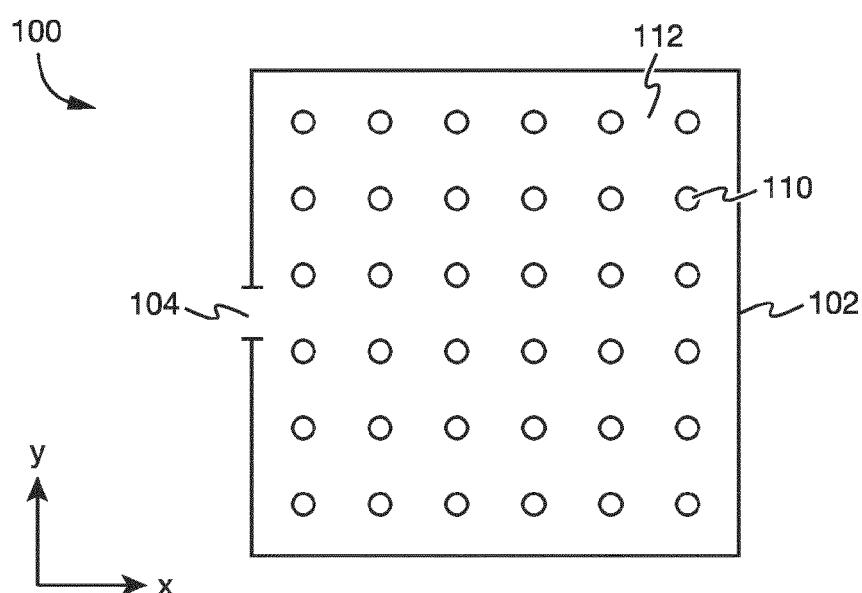


Fig. 1b

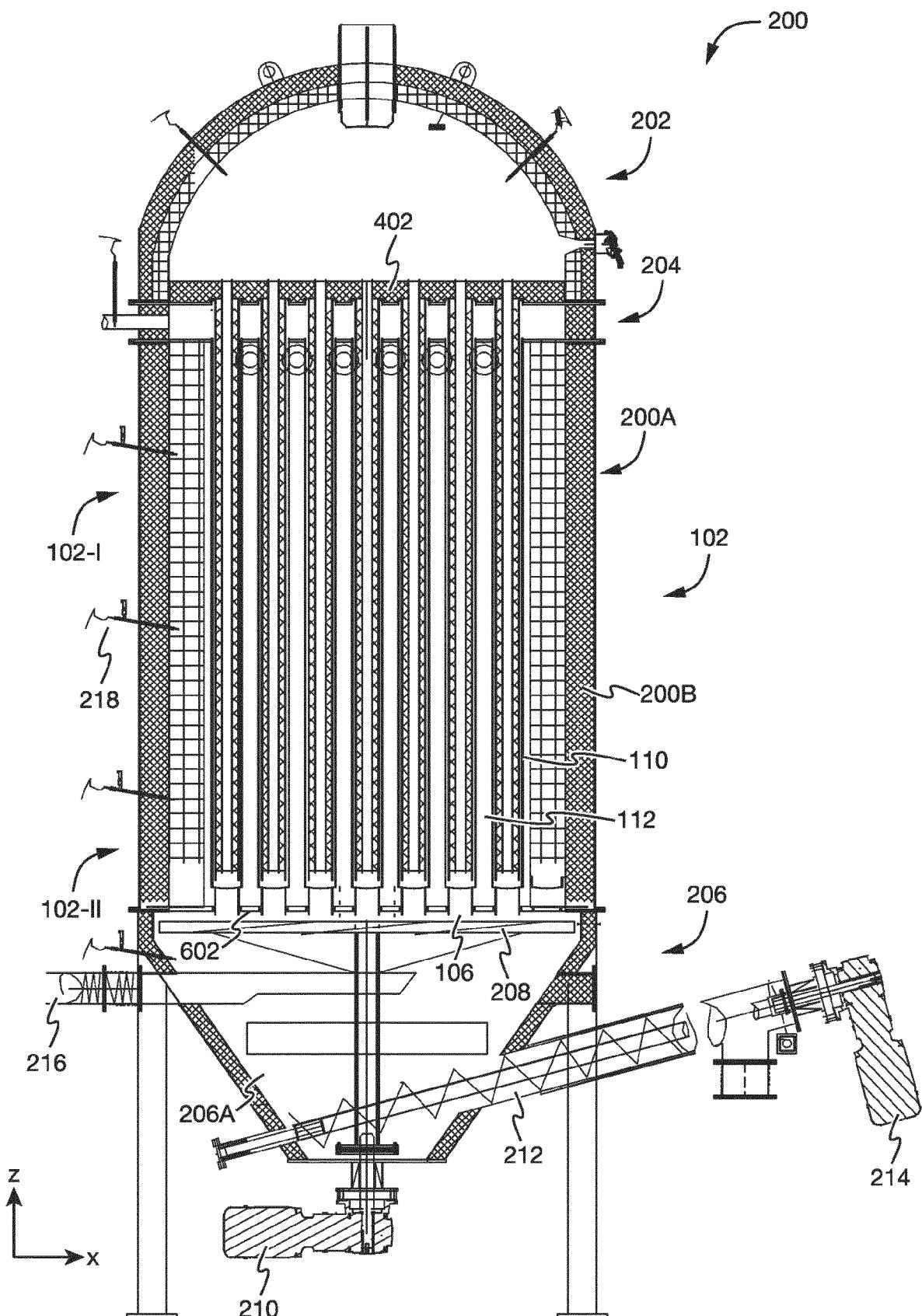


Fig. 2a

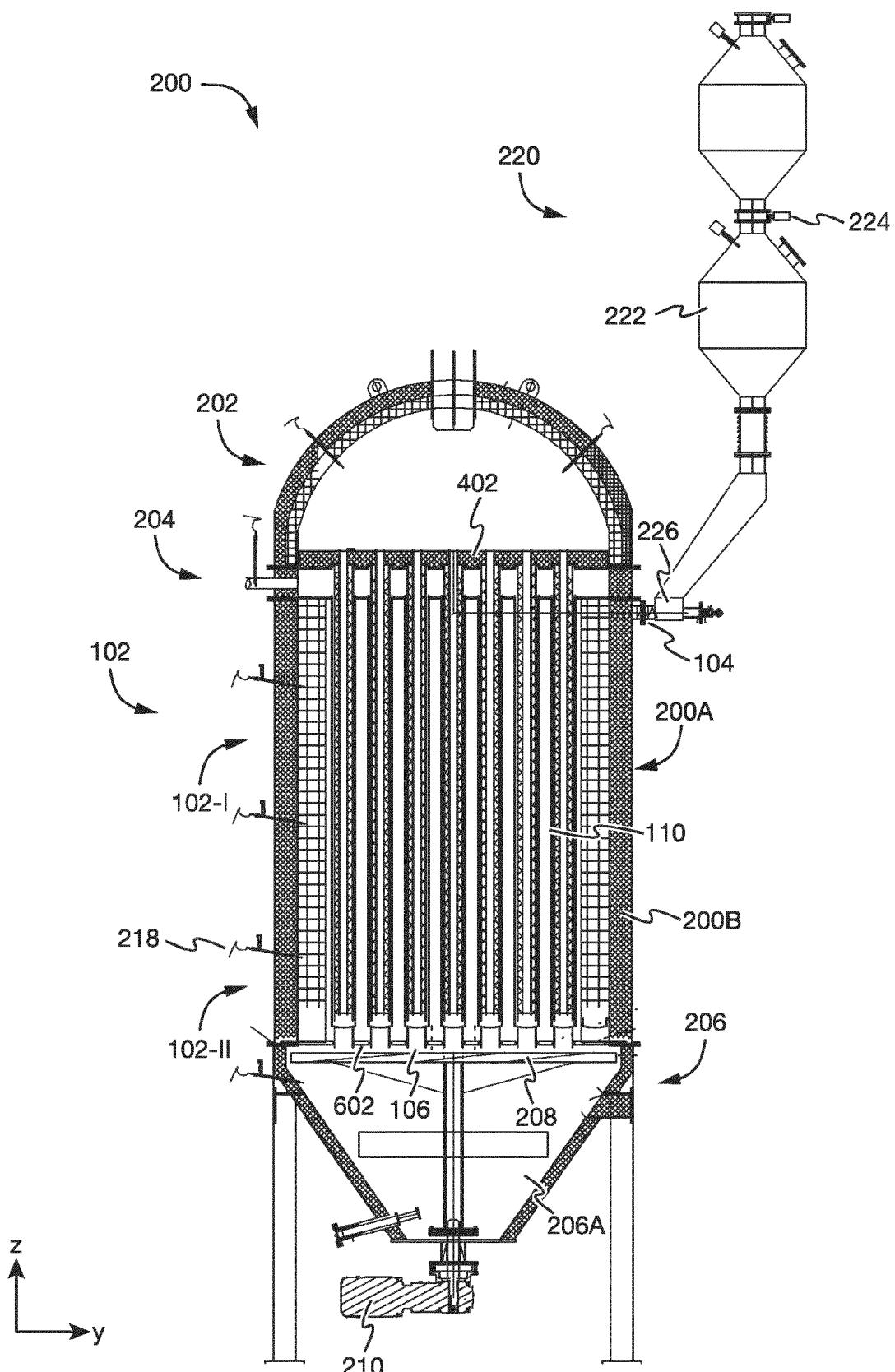


Fig. 2b

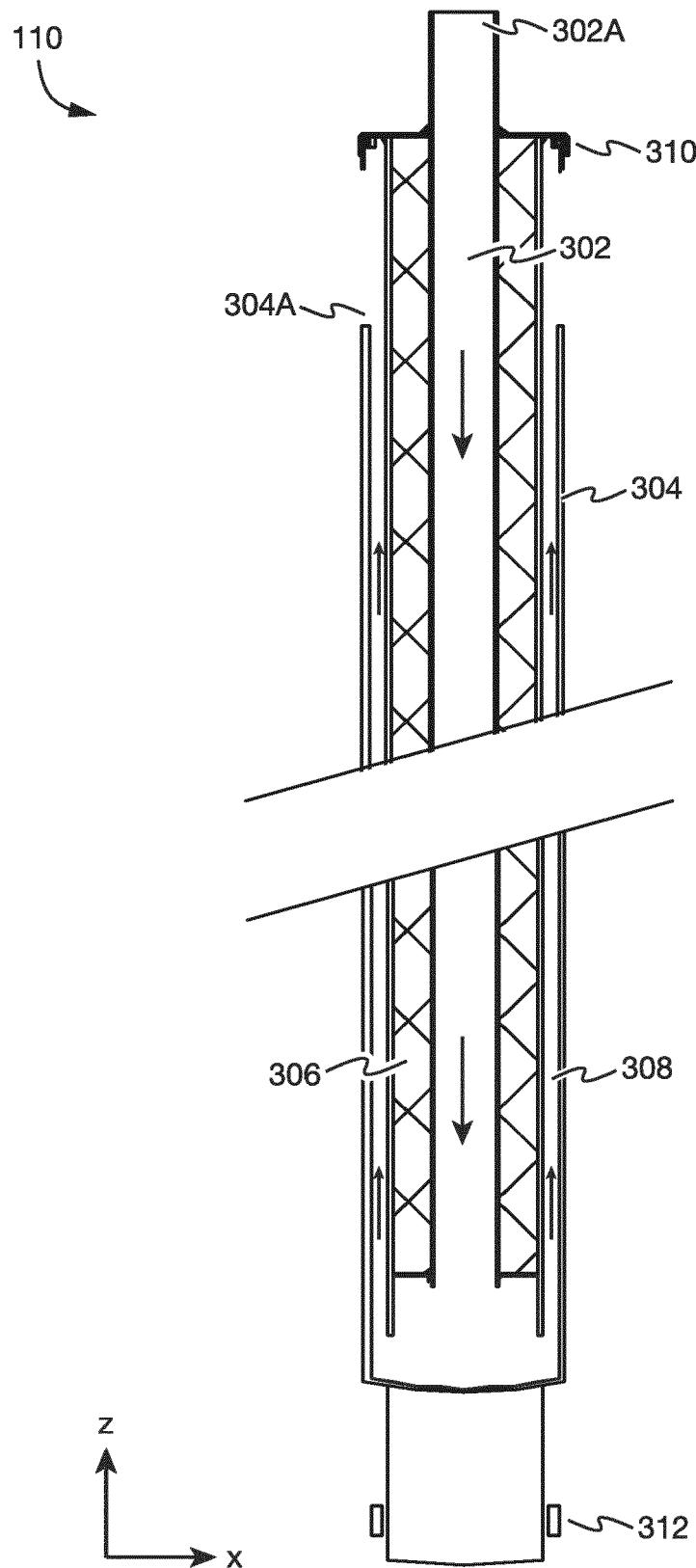


Fig. 3

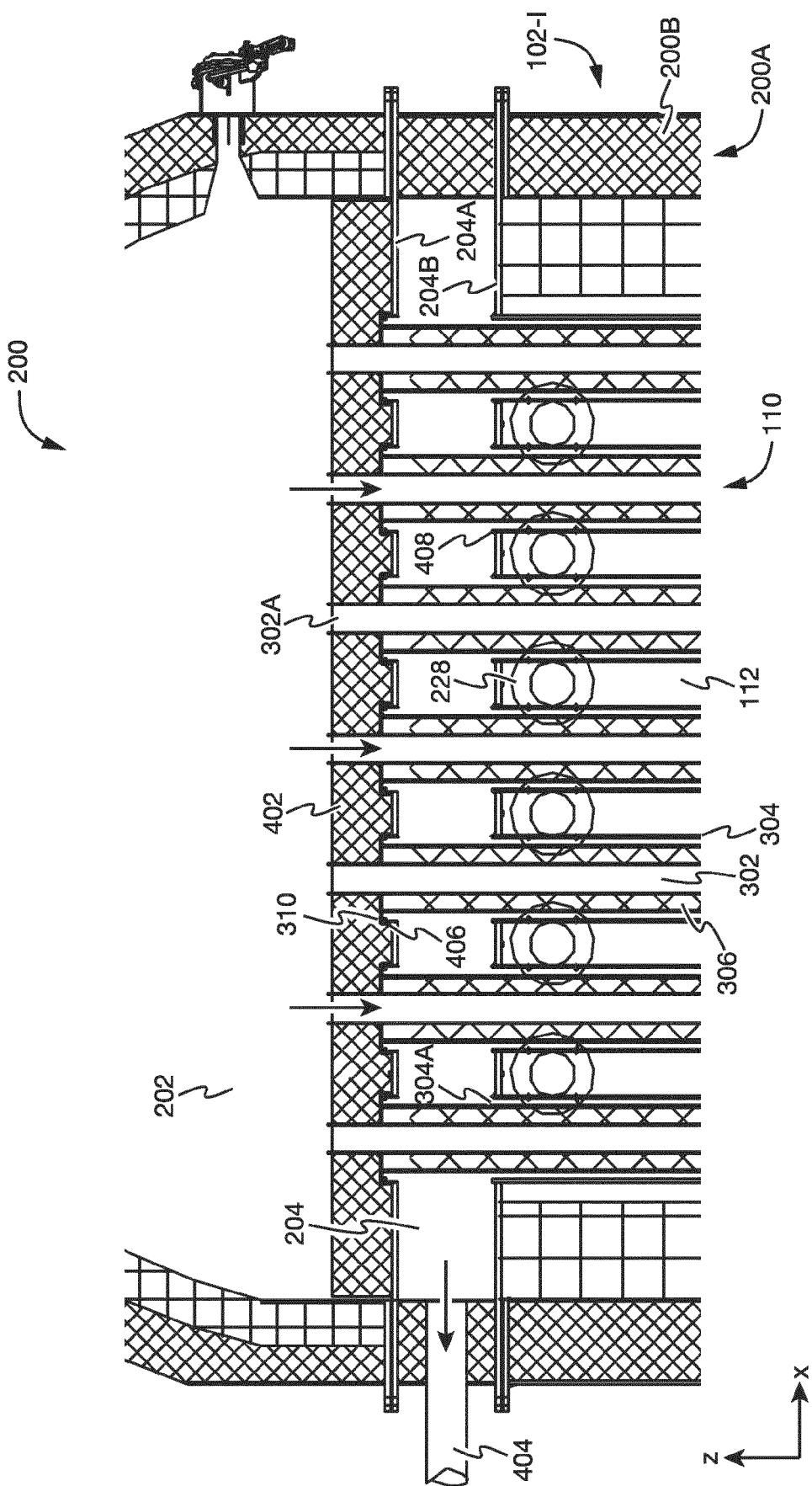


Fig. 4

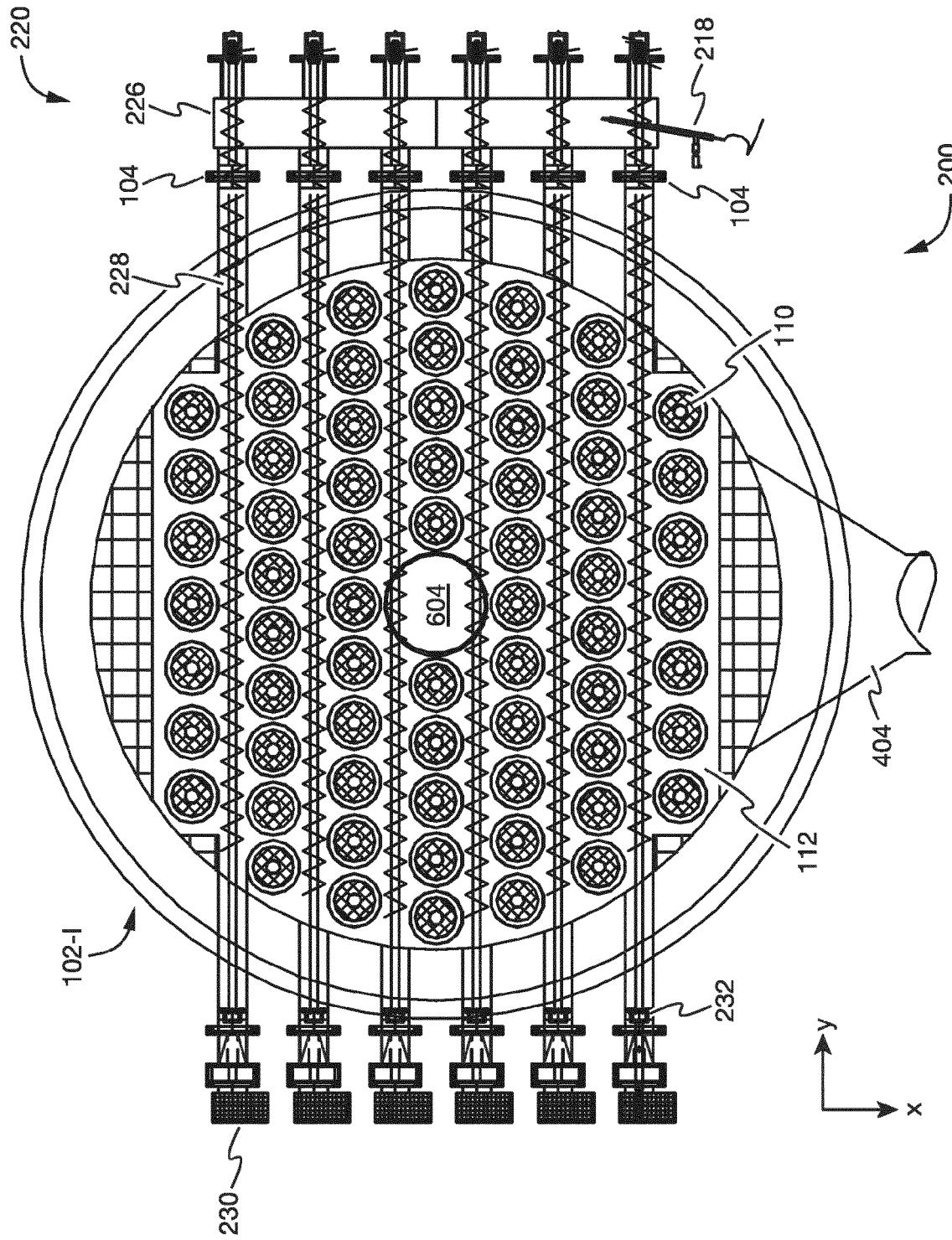


Fig. 5

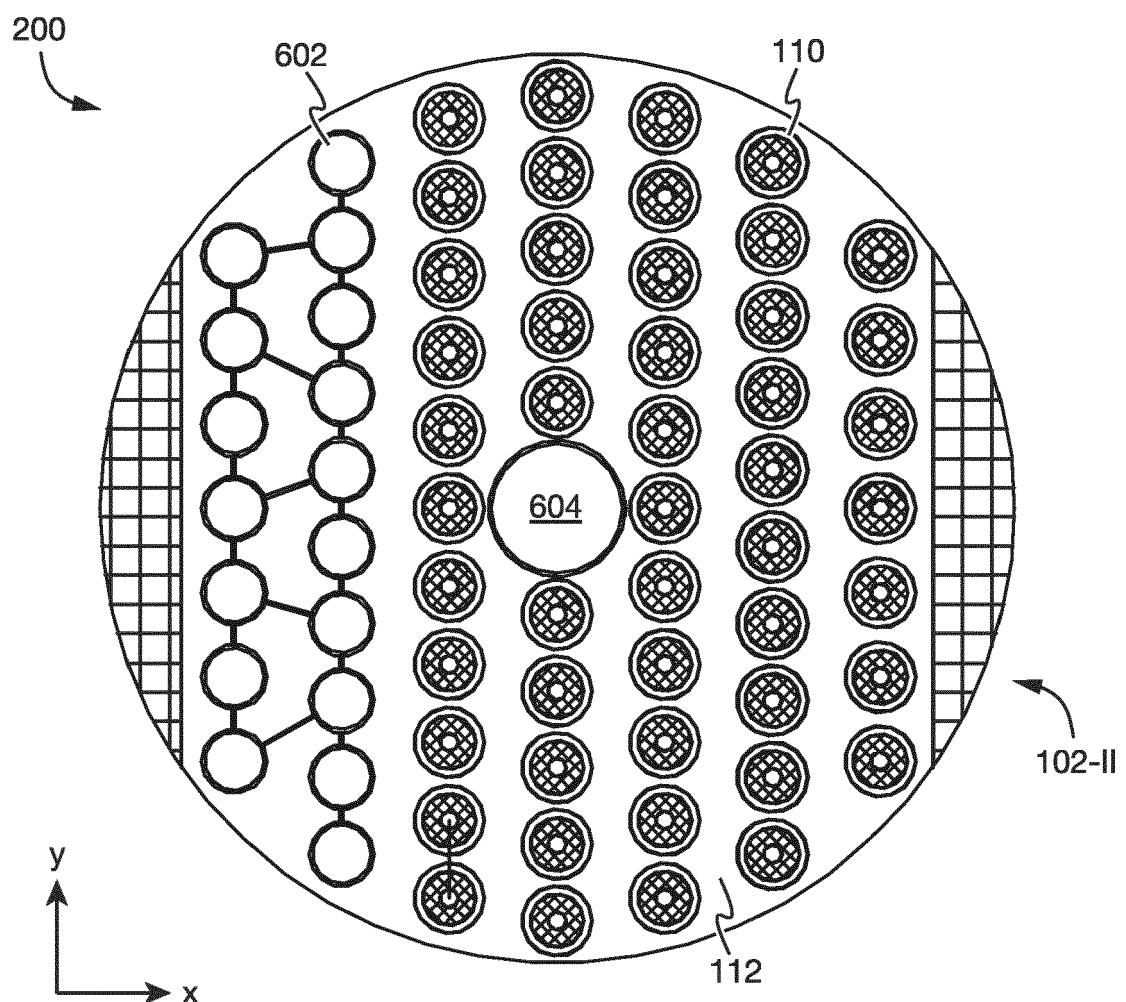
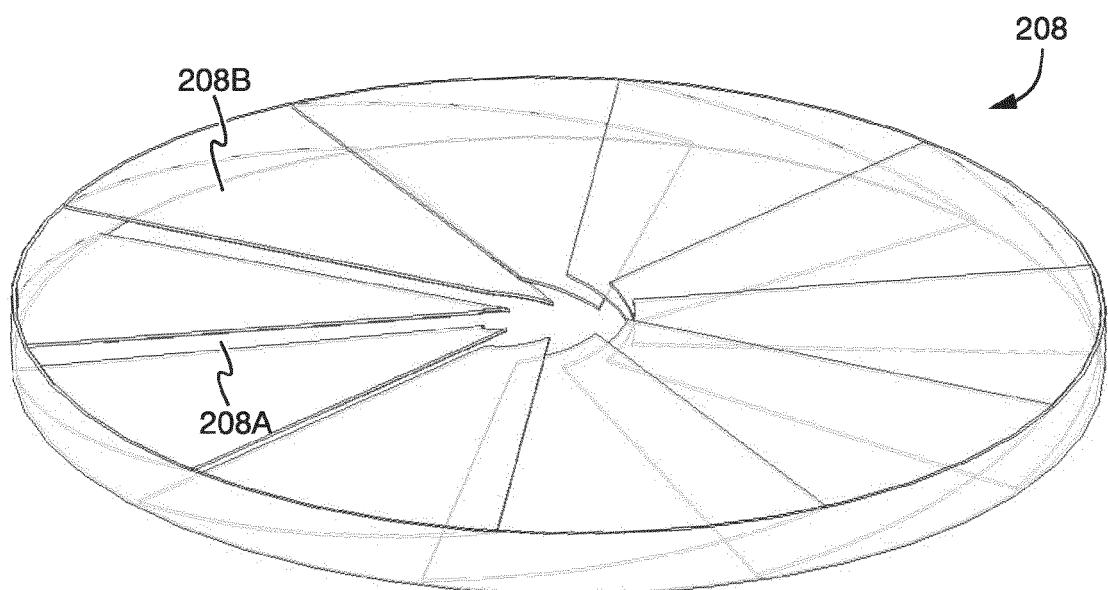
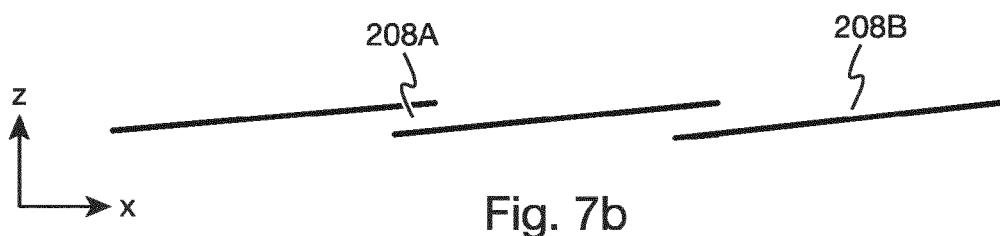
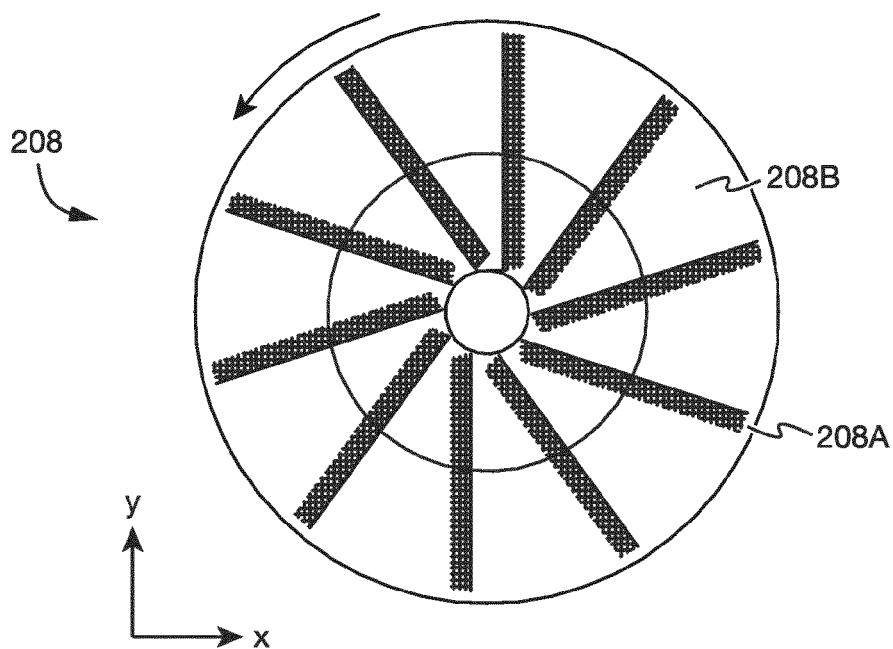


Fig. 6



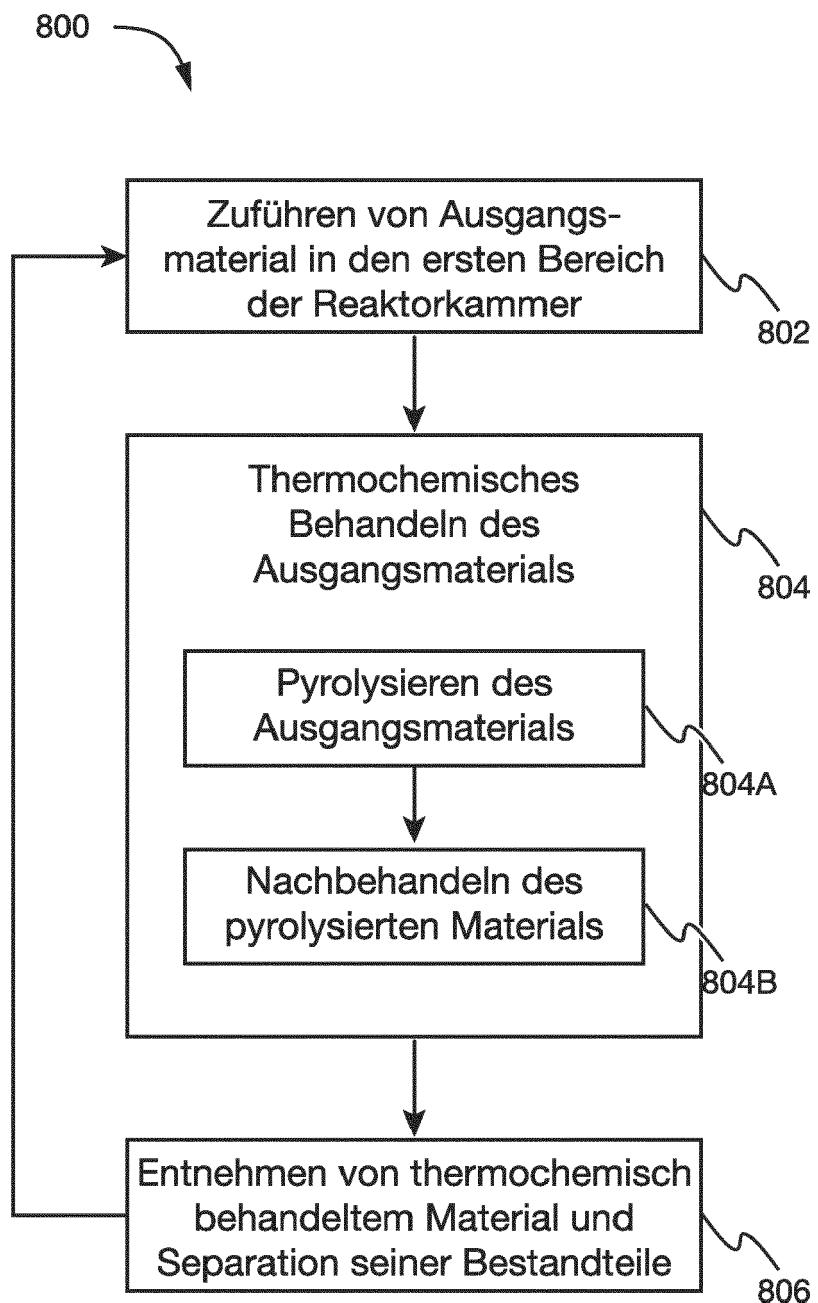


Fig. 8

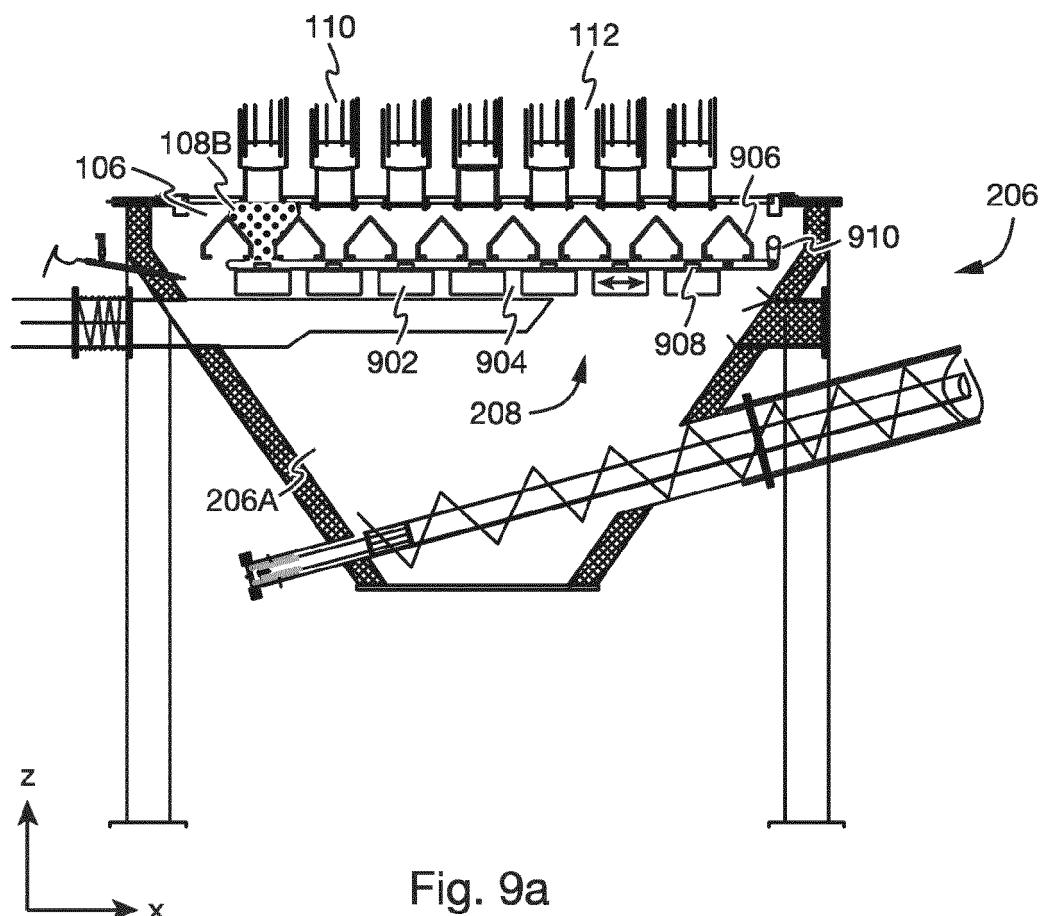


Fig. 9a

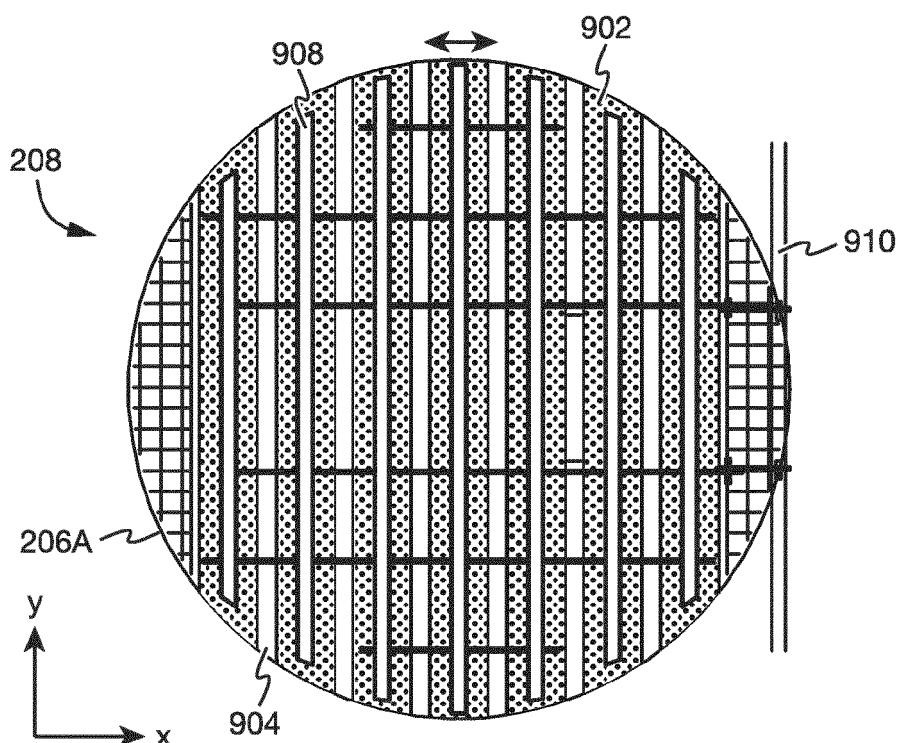


Fig. 9b

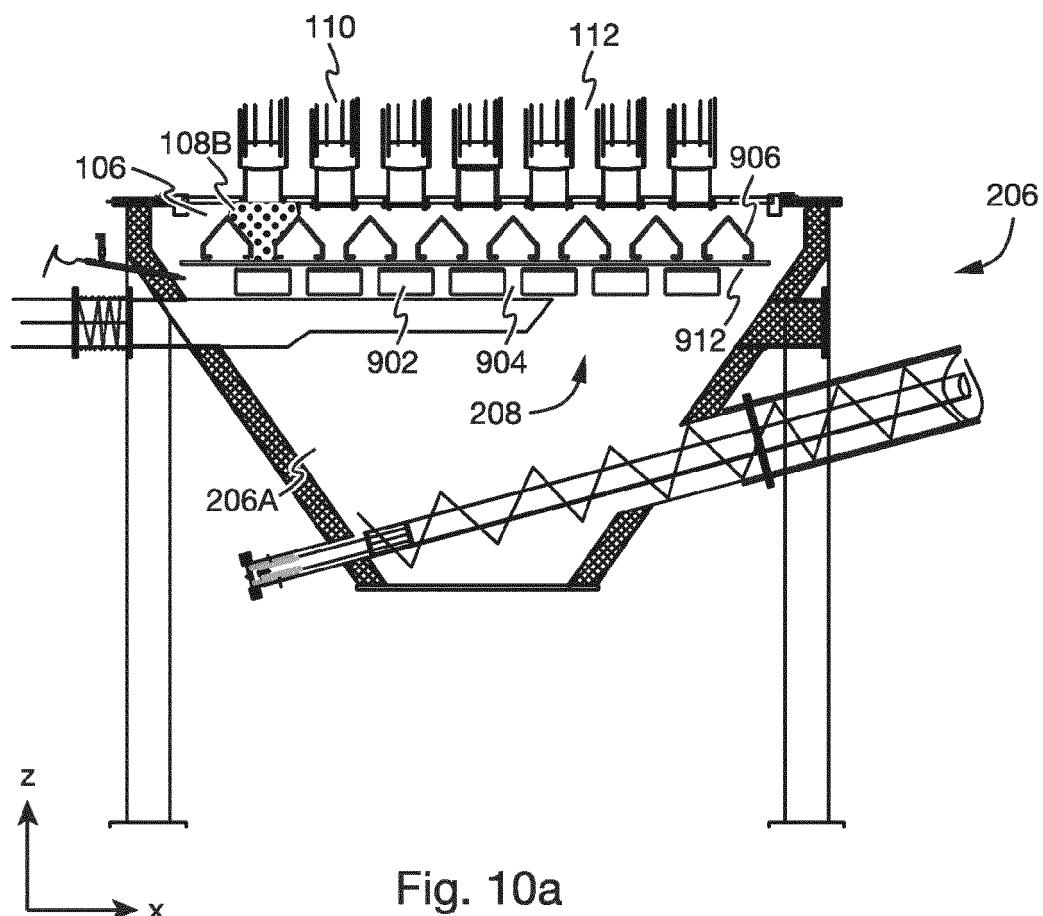


Fig. 10a

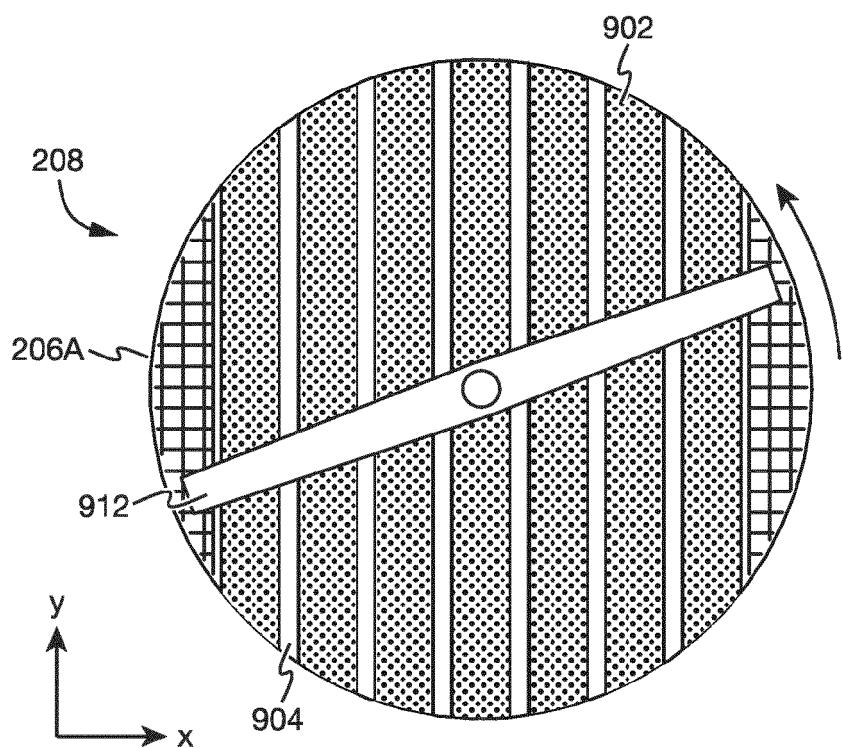


Fig. 10b



## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 22 20 1673

5

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
10	X CN 113 004 917 A (SHANDONG SUNSHINE POWER CO LTD) 22. Juni 2021 (2021-06-22) Y * Ansprüche 1-10 * * Absätze [0031], [0039]; Abbildungen 1,2,4 *	1-6, 8-14 15	INV. C10B47/18 C10B53/00 C10B53/02
15	X WO 2014/146520 A1 (HE JIANXIANG [CN]) 25. September 2014 (2014-09-25) Y * Absätze [0021] - [0024]; Abbildung 2 * * Zusammenfassung; Ansprüche *	1-3, 7, 8, 10-14 15	
20	A US 2016/312124 A1 (LI CHUN-ZHU [AU] ET AL) 27. Oktober 2016 (2016-10-27) * Absätze [0047] - [0049]; Ansprüche; Abbildung 1 *	4-6	
25	A US 5 725 738 A (BRIONI OSVALDO [IT] ET AL) 10. März 1998 (1998-03-10) * Ansprüche; Abbildungen *	1-15	
30			RECHERCHIERTE SACHGEBiete (IPC)
			C10B F28D
35			
40			
45			
50	1 Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt		
55	Recherchenort <b>Den Haag</b>	Abschlußdatum der Recherche <b>15. März 2023</b>	Prüfer <b>Bertin, Séverine</b>
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			
T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldeatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument ..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 22 20 1673

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patendokumente angegeben.  
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

15-03-2023

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patendokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	CN 113004917 A	22-06-2021	KEINE	
15	WO 2014146520 A1	25-09-2014	CA 2907624 A1 CN 103160301 A WO 2014146520 A1	25-09-2014 19-06-2013 25-09-2014
20	US 2016312124 A1	27-10-2016	AU 2014366887 A1 CA 2929977 A1 CN 105874038 A EP 3083886 A1 ES 2869342 T3 US 2016312124 A1 WO 2015089556 A1	30-06-2016 25-06-2015 17-08-2016 26-10-2016 25-10-2021 27-10-2016 25-06-2015
25	US 5725738 A	10-03-1998	IT MI952324 A1 US 5725738 A	10-05-1997 10-03-1998
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 102014105340 A1 [0002]
- DE 102015108552 A1 [0002]
- DE 102016115700 A1 [0002]