

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
11 DE 25 45 013 C 2

51 Int. Cl. 3:  
G 21 C 1/00

21 Aktenzeichen: P 25 45 013.9-33  
22 Anmeldetag: 8. 10. 75  
43 Offenlegungstag: 14. 4. 77  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 29. 3. 84

DE 25 45 013 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

GHT Gesellschaft für  
Hochtemperaturreaktor-Technik mbH, 5060 Bergisch  
Gladbach, DE

72 Erfinder:

Müller-Frank, Ulrich, Dr.-Ing.; Lohnert, Günter,  
Dr.phil., 5060 Bensberg, DE

56 Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene  
Druckschriften nach § 44 PatG:

DE-OS 24 08 926  
DE-OS 23 52 691  
DE-OS 22 41 873  
DE-OS 21 23 894  
DE-OS 15 48 180

54 Kugelhaufenreaktor mit Ein-Zonen-Kern

DE 25 45 013 C 2

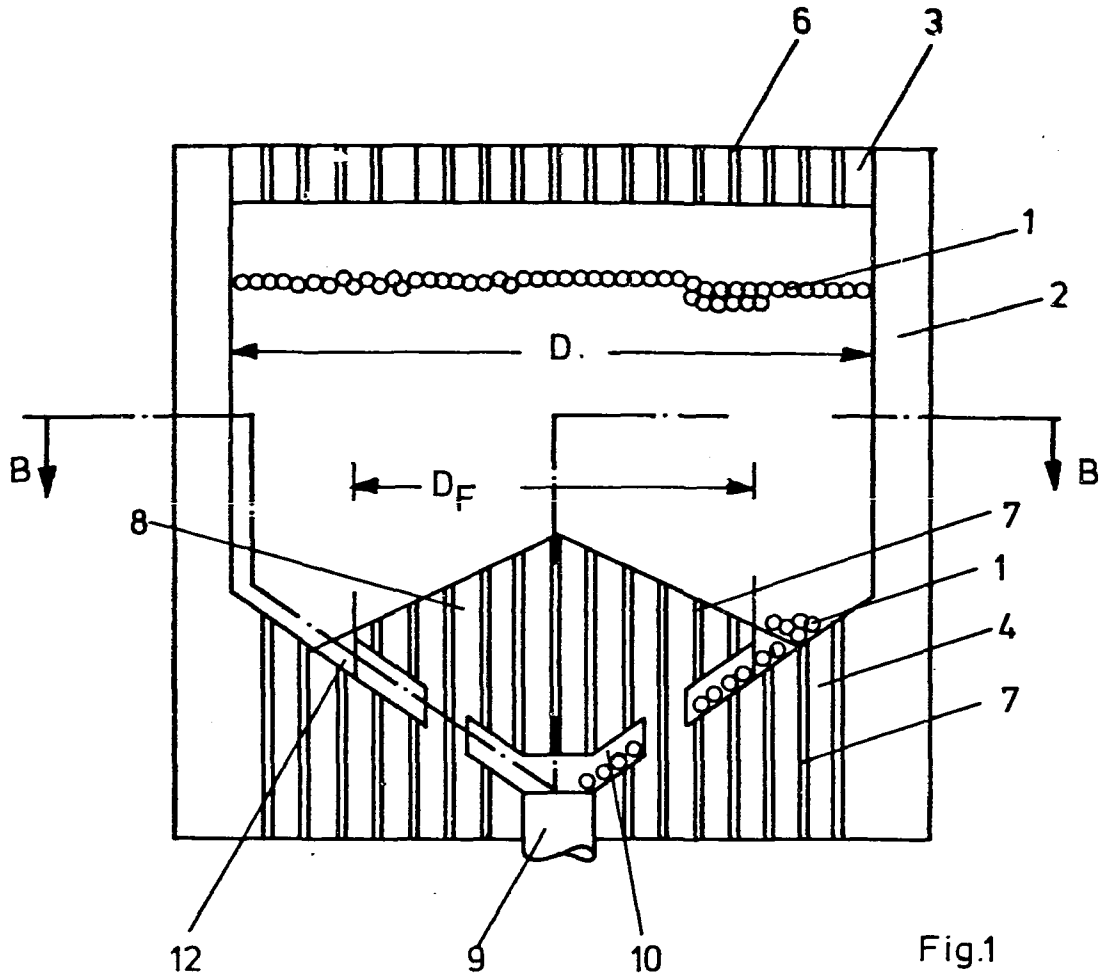


Fig.1

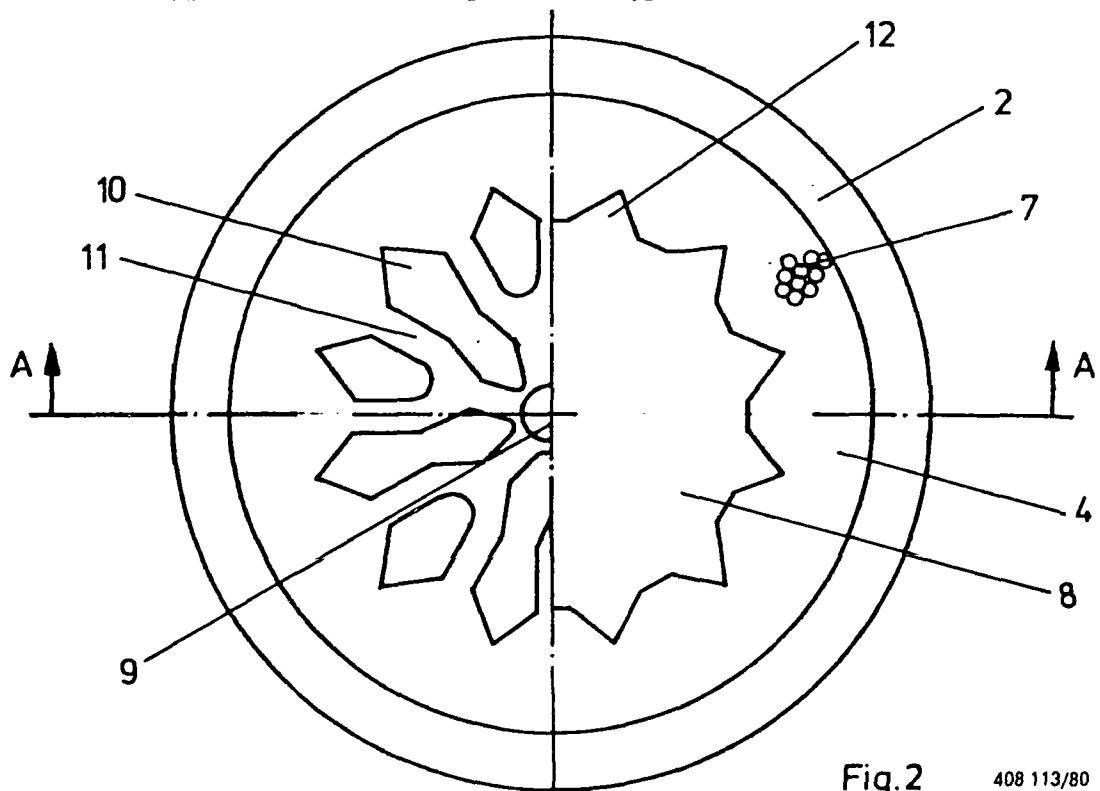


Fig.2

## Patentansprüche:

1. Kugelhaufenreaktor mit einem Kern aus einer in kernphysikalischer Hinsicht annähernd homogenen Schüttung von kugelförmigen Betriebselementen, die den Kern von oben nach unten durchlaufen, dadurch gekennzeichnet, daß die vertikale Geschwindigkeit der Betriebselemente (1) im Randbereich des Kerns größer ist als in der Mitte desselben.
2. Reaktor nach Anspruch 1, wobei der Kern von einem festen Seitenwandreflektor umgeben ist, dadurch gekennzeichnet, daß die vertikale Geschwindigkeit der Betriebselemente im Randbereich des Kerns etwa zweimal so hoch ist wie in der Mitte desselben.
3. Reaktor nach den Ansprüchen 1 oder 2, wobei in einem einzigen zentralen trichterförmigen Auslauf am Boden eines Kernbehälters ein innerer kegelähnlicher Körper mit der Spitze nach oben derart angeordnet ist, daß die Betriebselemente unterhalb dieses Körpers abfließen können, dadurch gekennzeichnet, daß dieser innere kegelähnliche Körper (8) einen Durchmesser aufweist, der mehr als die Hälfte des zylindrischen Kerndurchmessers (D) beträgt.
4. Reaktor nach den Ansprüchen 1 oder 2, wobei am Boden eines Kernbehälters mehrere trichterförmige Abzüge für Betriebselemente angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß ein zentraler Abzug (30) vorhanden ist, der von mehreren, insbesondere sechs, gleichmäßig über den Umfang verteilten Abzügen (31) umgeben ist, und in dem die Abzugsgeschwindigkeit der Betriebselemente (1) gegenüber den ihn umgebenden Abzügen (31) verringert ist.

Die Erfindung betrifft einen Kugelhaufenreaktor mit einem Kern aus einer Schüttung von Kugeln, die den Kern von oben nach unten und zwar möglichst nur einmal durchlaufen. Reaktoren dieser Art werden oft mit einem gasförmigen Kühlmittel, beispielsweise Helium, und zwar von oben nach unten durchströmt.

In der DE-OS 21 23 894 wird ein gasgekühlter Kugelhaufenreaktor beschrieben, der kontinuierlich mit Betriebselementen beschickt wird, die bereits nach einmaligem Durchlaufen des Reaktors den gewünschten Endabbrand erreichen sollen. Die Beschickung wird dort zeitlich so durchgeführt, daß die axiale Leistungsdichteverteilung im oberen Teil ein Maximum hat. Diese hohe Leistungsdichte begrenzt aber besonders im oberen Bereich die Lebensdauer des aus Graphit hergestellten Seitenwandreflektors. Eine konstante radiale Leistungsdichteverteilung soll dort erreicht werden wie bei anderen Reaktortypen auch durch mehrere konzentrisch angeordnete zylinderförmige Brennstoffzonen, die mit unterschiedlicher Brennstoffkonzentration beschickt werden, wobei die inneren Brennstoffzonen gegenüber den äußeren Brennstoffzonen eine niedrigere Brennstoffkonzentration haben sollen. Diese unterschiedlichen Brennstoffzonen bedingen nicht nur einen zusätzlichen Aufwand bei der Herstellung und Wiederaufbereitung der Betriebselemente, sondern auch bei der für die verschiedenen Zonen unterschiedliche Zugabevorrichtung.

Auch in der DE-OS 22 41 873 wird ein gasgekühlter Kugelhaufenreaktor vorgeschlagen, der in Abhängigkeit

von radialen Zonen mit unterschiedlich ausgelegten Brenn- und/oder Brutelementtypen beschickt wird. Dadurch soll erreicht werden, daß das im oberen Bereich der Schüttung vorhandene Maximum der Leistungsdichte reduziert wird.

In der DE-OS 23 52 691 soll bei einem gasgekühlten Kugelhaufenreaktor der Seitenwandreflektor vor einer zu hohen Dosis an schnellen Neutronen geschützt werden, indem die an den Seitenwandreflektor angrenzende Randzone der Schüttung einen niedrigeren Spaltstoffgehalt aufweist als die innere Zone der Schüttung. Dieser niedrigere Spaltstoffgehalt soll erreicht werden entweder, indem am Rande besondere Kugeln mit einem niedrigeren Spaltstoffgehalt oder ein Gemisch aus den üblichen Kugeln mit Kugeln ohne Spaltstoff zugegeben wird. Dadurch wird aber am Rande die Leistungsdichte und auch die Kühlmittelaustrittstemperatur herabgesetzt. Um nun die Austrittstemperatur des Gases aus dem Reaktorkern wieder zu vergleichmäßigen, wird vorgeschlagen, im Randbereich des den Reaktorkern nach unten abschließenden Bodens Einrichtungen zur Drosselung des Kühlgasstromes vorzusehen. Eine solche Drosselung läßt sich aber sicher nicht für alle Betriebszustände optimal einstellen. Bei blockförmigen Betriebselementen mit axialen und voneinander getrennten Kühlkanälen ist eine solche Drosselung möglich, bei kugelförmigen Betriebselementen findet aber auch noch eine Querbewegung des Kühlgases statt, so daß die Wirkung einer solchen Drosselung nicht exakt berechenbar ist.

In der DE-OS 24 08 926 wird vorgeschlagen, im trichterförmigen Auslauf am Core-Boden eines gasgekühlten Kugelhaufenreaktors einen kegelähnlichen Körper mit der Spitze nach oben anzuordnen, mit dem die vertikale Geschwindigkeit der Kugeln und damit auch der Abbrand in radialer Richtung annähernd konstant gehalten werden soll.

Die vorliegende Erfindung geht aus von dem Gedanken, daß die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Kernreaktors nicht nur von einem über den Radius konstanten Abbrand bestimmt wird. Nach neueren Untersuchungen ist das Kostenoptimum eines gasgekühlten Kugelhaufenreaktors innerhalb vernünftiger Grenzen, also beispielsweise von 60 000 bis 110 000 Mwd/t (Megawatt-Tage pro Tonne Schwermetall) nur sehr wenig vom Abbrand abhängig. Wenn man also innerhalb dieser Grenzen bleibt, verliert man etwas am maximal möglichen Abbrand und gewinnt eventuell erhebliche Vorteile in anderen Bereichen. Wichtiger als ein über den Radius konstanter Abbrand erscheint aber eine über den Radius konstante Kühlmittelaustrittstemperatur. Die konstante Kühlmittelaustrittstemperatur bestimmt den Wirkungsgrad der anschließenden Wärmetauscher. Der maximale Neutronenfluß am Rande eines Kerns bestimmt die Lebensdauer der Seitenwand, beispielsweise des Graphitreflektors. Temperatur- und Neutronenflußverteilung werden aber durch die örtliche Leistungsdichte bestimmt.

Die Erfindung geht weiterhin von dem Gedanken aus, daß die örtliche Leistungsdichte in einem Kern abhängig ist vom örtlichen Spaltstoffgehalt und dieser wiederum eine Funktion ist der Anreicherung und der Verweilzeit des Betriebselementes. Daher kann man also, wenn man aus Gründen der einfacheren Herstellung den Spaltstoffgehalt in allen frischen Betriebselementen konstant halten will, die am Rande eines Kernreaktors naturgemäß geringere Leistungsdichte dort durch eine höhere vertikale Geschwindigkeit der Betriebselemente anheben.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist ein Kugelhaufen-

fenreaktor hoher Wirtschaftlichkeit und langer Lebensdauer mit einer am Kernaustritt radial weitgehend konstanten Kühlmittelaustrittstemperatur. Eine spezielle Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, diesen Kugelhaufenreaktor zu verwirklichen mit radial einheitlichen Betriebselementen, so daß bei der Beschickung keine radial unterschiedlichen Zonen berücksichtigt werden müssen.

Zur Lösung dieser Aufgabe wird ein Kugelhaufenreaktor mit einem Kern aus einer in kernphysikalischer Hinsicht annähernd homogenen Schüttung von kugelförmigen Betriebselementen, die den Kern von oben nach unten durchlaufen, vorgeschlagen, bei dem die vertikale Geschwindigkeit der Betriebselemente im Randbereich des Kerns größer ist als in der Mitte. Mit dieser höheren Geschwindigkeit wird im Randbereich trotz einheitlicher Betriebselemente ein höherer Spaltstoffgehalt erreicht, und damit die am Rande eines Kernreaktors naturgemäß geringere Leistungsdichte angehoben. In axialer Richtung wird dadurch die Leistungsdichte der Randzone oben verringert und dafür im mittleren und unteren Bereich angehoben, integral jedoch konstant gehalten. Dadurch wird die im oberen Drittel des Reaktors bisher aufgrund der höheren Leistungsdichte und des damit verbundenen höheren Neutronenflusses zu erwartende geringere Lebensdauer des Seitenwandreflektors verlängert, während der in der Mitte und im unteren Drittel des Seitenwandreflektors jetzt zu erwartende höhere Neutronenfluß immer noch in zulässigen Grenzen gehalten werden kann.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung, wobei in einem einzigen zentralen trichterförmigen Auslauf am Boden eines Kernbehälters ein innerer kegelähnlicher Körper mit der Spitze nach oben derart angeordnet ist, daß die Betriebselemente unterhalb dieses Körpers abfließen können, wird vorgeschlagen, daß dieser innere kegelähnliche Körper einen Durchmesser  $DF$  aufweist, der etwas mehr als die Hälfte des zylindrischen Kerndurchmessers  $D$  beträgt. Versuche haben gezeigt, daß bei dieser Anordnung die Vertikalgeschwindigkeit der Betriebselemente außen größer ist als in der Mitte. Nach einem durchgeführten Modellversuch sollte  $DF$  etwa  $0,6$  bis  $0,65 \times D$  sein.

In alternativer Ausgestaltung der Erfindung, wobei am Boden eines Kernbehälters mehrere trichterförmige Abzüge für Betriebselemente angeordnet sind, wird vorgeschlagen, daß ein zentraler Abzug vorhanden ist, der von mehreren, insbesondere sechs, gleichmäßig über den Umfang verteilten Abzügen umgeben ist und in dem die Abzugsgeschwindigkeit der Betriebselemente gegenüber den ihn umgebenden Abzügen verringert ist. Mit dieser, allerdings in bezug auf die Zahl der Abzüge aufwendigen Anordnung, läßt sich innerhalb vernünftiger Grenzen jedes gewünschte Verhältnis der Vertikalgeschwindigkeit zwischen Innen und außen einstellen. Da die abgebrannten Betriebselemente ohnehin druckdicht und mittels einer geeigneten Zähl- oder Volumenmeßvorrichtung aus dem Reaktor ausgeschleust werden müssen, ist der zusätzliche Aufwand für eine Verringerung der Abzugsgeschwindigkeit im mittleren Abzug gering.

Ein gasgekühlter Kugelhaufenreaktor gemäß dieser Erfindung hat folgende Vorteile:

Aufgrund der einheitlichen Betriebselemente ist die Herstellung dieser Elemente wesentlich rationeller und die Beschickung einfacher.

Aufgrund des in axialer Richtung ausgeglichenen Neutronenflusses ist die Lebensdauer des Seitenwandreflektors größer.

Aufgrund der in radialer Richtung ausgeglichenen Leistungsdichte ist auch die Kühlmittelaustrittstemperatur in radialer Richtung ausgeglichen.

Die Fig. 1 bis 4 zeigen zwei alternative Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand eines gasgekühlten Kugelhaufenreaktors von 3000 MW (thermisch), dessen Kern aus einer homogenen Kugelschüttung besteht, die einen Durchmesser von ca. 11 Metern und eine Höhe von 5,5 Metern aufweist und die von einem Graphit-Reflektor umgeben ist. Die Betriebselemente bestehen aus Graphitkugeln von ca. 6 cm Außendurchmesser, die einen geeigneten Spalt- und/oder Brutstoff enthalten. Diese Betriebselemente werden über mehrere über den Querschnitt des Reaktors verteilte Öffnungen in der Decke des Reaktorbehälters zugegeben und nach einmaligem Durchlauf durch den Reaktorbehälter am Boden abgezogen und einer Wiederaufbereitungsanlage zugeführt. Als Kühlmedium wird Helium benutzt, das am oberen Ende des Reaktorbehälters zugeführt und am Boden des Reaktorbehälters durch zahlreiche Bohrungen abgeführt wird.

Aufgrund theoretischer Überlegungen ergibt sich für einen solchen Ein-Zonen-Reaktor bei konstanter Fließgeschwindigkeit ein Verhältnis der in axialer Richtung integrierten Leistung  $N_1$  in der Mitte zur Leistung  $N_2$  am Rande von etwa:

$$N_1/N_2 = 1/0,7$$

Die in axialer Richtung integrierte Leistung bei einem solchen Reaktor ist direkt proportional zur Wurzel der vertikalen Durchlaufgeschwindigkeit  $V_1$  bzw.  $V_2$  der Betriebselemente

$$N_1/N_2 = (V_1/V_2)^{0,5}$$

Wenn also die in axialer Richtung integrierten Leistungen  $N_1$  in der Mitte und  $N_2$  am Rande gleich sein sollen, dann gilt für die vertikale Durchlaufgeschwindigkeit  $V_2$  am Rande

$$V_2 = (1/0,7)^2 \times V_1 = 2,04 \times V_1$$

Die Fig. 1 zeigt einen senkrechten Längsschnitt durch einen erfindungsgemäßen Kugelhaufenreaktor gemäß Schnitt A-A in Fig. 2.

Fig. 2 zeigt einen waagerechten Querschnitt gemäß Schnitt B-B in Fig. 1.

Fig. 3 zeigt ebenfalls einen senkrechten Längsschnitt durch einen anderen erfindungsgemäßen Kugelhaufenreaktor mit mehreren, über den Querschnitt verteilten Abzügen am Boden des Reaktorbehälters gemäß Schnitt C-C durch Fig. 4.

Fig. 4 zeigt einen waagerechten Querschnitt gemäß Schnitt D-D in Fig. 3.

In den Fig. 1 und 2 sind die kugelförmigen Betriebselemente 1 in homogener Schüttung in einem zylindrischen Reaktorbehälter 2 angeordnet, der an seinem oberen Ende mit der Reaktordecke 3 und an seinem unteren Ende mit dem trichterförmigen Reaktorboden 4 verschlossen ist. In der Reaktordecke 3 sind zahlreiche über den Querschnitt verteilte Öffnungen 6 vorgesehen, die zur Beschickung mit kugelförmigen Betriebselementen 1 dienen. Die Zufuhr des Reaktorkühlmittels am oberen Ende des Reaktorbehälters 2 wird nicht näher dargestellt, die Abfuhr des Reaktorkühlmittels erfolgt durch zahlreiche Bohrungen 7 im Boden 4. In dem einzigen zentralen trichterförmigen Auslauf 4 am Boden des Reaktors ist ein innerer kegelähnlicher Körper 8 mit der Spitze nach oben derart angeordnet, daß die Betriebselemente 1 unterhalb dieses Körpers 8 zu einem senkrechten Schacht

9 abfließen können. Wenn der Durchmesser  $D_F$  dieses kegelähnlichen Körpers 8 größer ist als der halbe innere Durchmesser  $D$  des Reaktorbehälters 2, dann fließen die Betriebselemente 1 am Rande des Reaktorbehälters 2 schneller als in der Mitte. Durch entsprechende Modellversuche mit Kugeln aus unglasiertem Ton, die sich ähnlich verhalten, wie die eigentlichen Graphitkugeln, läßt sich das zweckmäßigste Durchmesserverhältnis  $D_F/D$  genauer bestimmen und einem gewünschten Geschwindigkeitsverhältnis  $V_1/V_2$  von der Mitte zum Rand anpassen. Der Körper 8 wird getragen von mehreren radialen Stegen 10, zwischen denen radiale Kanäle 11 die Betriebselemente vom Umfang des Körpers 10 zu dem senkrechten Schacht 9 leiten. Zwischen den Öffnungen dieser Kanäle 11 sind jeweils dachförmige Körper 12 angeordnet, die die Betriebselemente 1 in die Kanäle 11 leiten und die dafür sorgen, daß in dem Winkel zwischen dem Reaktorboden 4 und dem Körper 8 keine Betriebsele-

mente 1 oder Bruchstücke davon liegen bleiben. Der Körper 8 ist genauso wie der trichterförmige Auslauf 4 von zahlreichen senkrechten Kanälen 7 für das Kühlmittel durchzogen.

In den Fig. 3 und 4 wird mit denselben Bezeichnungen wie in den Fig. 1 und 2 ein ähnlicher Reaktor dargestellt. Der Reaktorboden 5 besteht aus sieben einander durchdringenden Trichtern, wobei der Trichter 30 in der Mitte des Reaktorbodens 5 angeordnet ist und die ihn umgebenden Trichter 31 derart angeordnet sind, daß ihre Mitten ein regelmäßiges Sechseck bilden. Unter jedem Trichter 30 ist eine Kugelzähl- oder Volumenmeßeinrichtung 32 angeordnet. Durch Variation der Volumenströme durch die Kugelabzugsrohre kann das Verhältnis der vertikalen Geschwindigkeiten  $V_1/V_2$  zwischen Mitte und Rand in gewünschter Weise eingestellt werden. Eine solche Vorrichtung ist beispielsweise in der DE-OS 15 48 180 beschrieben.

---

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

---

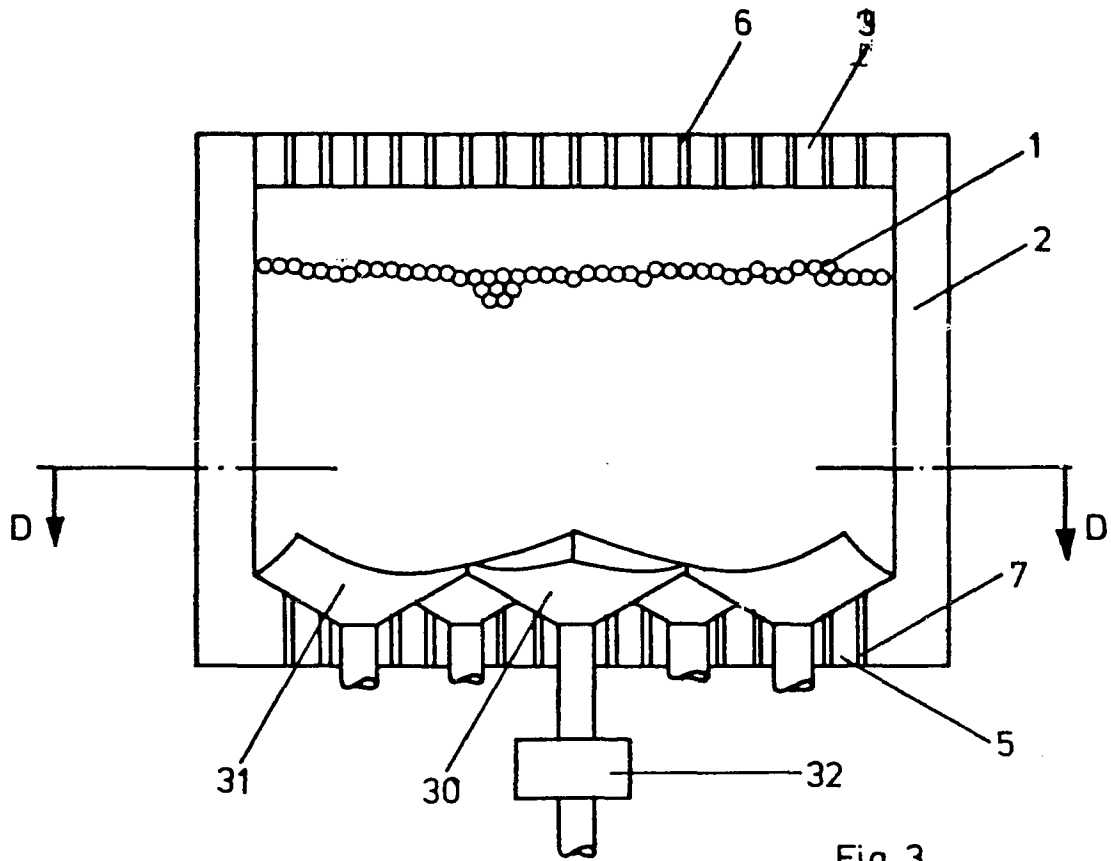


Fig. 3

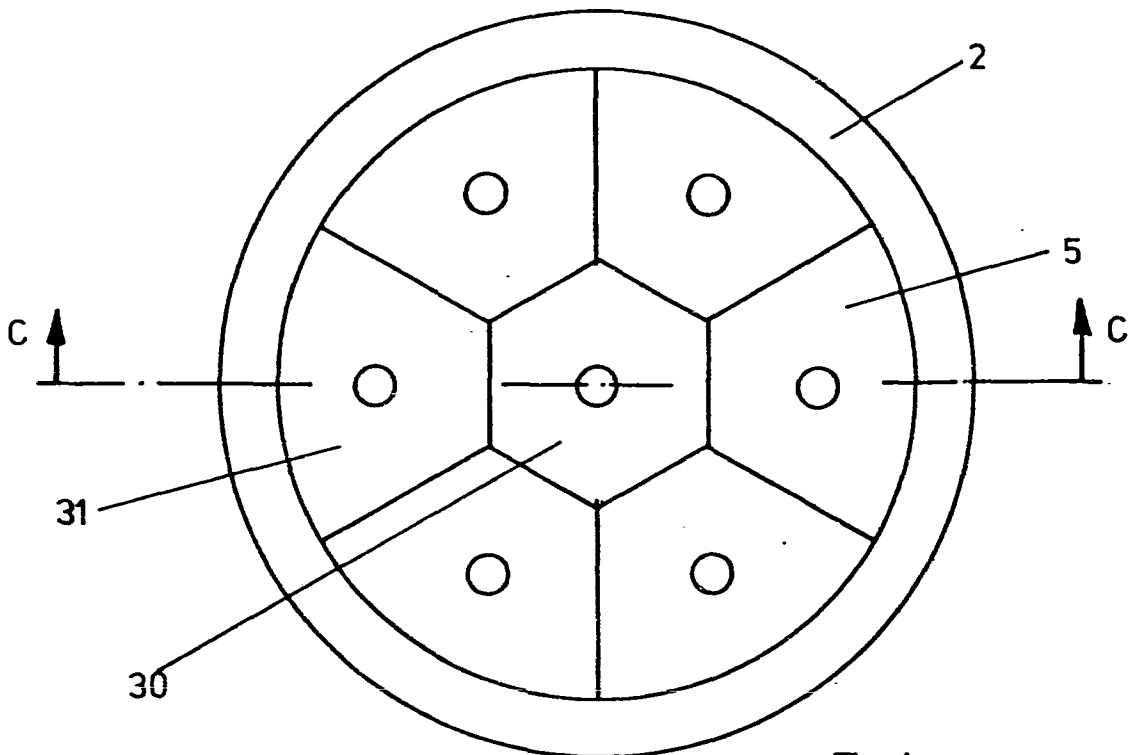


Fig. 4