(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 09 110 T2** 2006.09.28

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 385 609 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 09 110.1**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US02/05361**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 714 971.5**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2002/072251**
(86) PCT-Anmeldetag: **21.02.2002**
(87) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung: **19.09.2002**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **04.02.2004**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **08.02.2006**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **28.09.2006**

(51) Int Cl.[8]: ***B01F 7/12*** (2006.01)

(30) Unionspriorität:
802037 **07.03.2001** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, TR

(73) Patentinhaber:
Kreido Laboratories, Camarillo, Calif., US

(74) Vertreter:
Dr. Gassner & Partner, 91052 Erlangen

(72) Erfinder:
HOLL, A., Richard, Camarillo, CA 93012, US;
MCGREVY, N., Alan, Camarillo, CA 93012, US

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR MATERIALVERARBEITUNG**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen bzw. Geräte zum Behandeln von Materialien umfassend (eine) chemische und/oder physikalische Wirkung(en) oder Reaktion(en) einer Komponente oder zwischen Komponenten. Beispiele für Prozesse, welche von der Erfindung umfasst werden, sind Heizen, Kühlen, Schütteln, eine Reaktion, Dispergieren, eine Zustandsänderung, einschließlich Lösen und Emulgieren, eine Oxidation, eine Reduktion, ein Vermengen, eine Neutralisation, eine Änderung der Form, der Dichte, des Molekulargewichtes, der Viskosität oder des pH. Weitere Beispiele für noch typischere chemische Reaktionen sind: Halogenierung, Nitrierung, Reduktion, Cyanierung, Hydrolyse, Dehydroxylierung, Epoxilierung, Ozonisierungs-Diazotisierung, Alkylierung, Veresterung, Kondensation, Mannich- und Friedel-Craft-Reaktionen und Polimerisation.

Stand der Technik

[0002] Zur Behandlung von Materialien sind Vorrichtungen bzw. Geräte bekannt, welche aus koaxialen Zylindern bestehen, welche relativ zueinander um eine gemeinsame Achse rotiert werden, wobei die zu bearbeitenden Materialien dem ringförmigen Raum zwischen den Zylindern zugeführt werden. Beispielsweise offenbart die US-A-5370999 Prozesse zur Behandlung einer faserigen Biomasse mit hoher Scherung, indem ein Brei davon in eine in einer "Hochfrequenz-Rotor-Stator-Einrichtung" erzeugte turbulente Couhette-Strömung injiziert wird, wobei diese Einrichtung eine ringförmige Kammer hat, welche einen festen Stator enthält, welcher mit einem koaxialen, gezahnten Ring bestückt ist, welcher mit einem gegenüberliegenden an den Rotor gekoppelten koaxialen gezahnten Ring zusammenwirkt. Die US-A-5340891 offenbart Prozesse zur kontinuierlichen Emulsionspolymerisation, bei welcher eine das polymerisierbare Material enthaltende Lösung dem ringförmigen Raum zwischen koaxialen relativ zueinander rotierbaren Zylindern unter solchen Bedingungen zugeführt wird, dass Taylorwirbel ausgebildet werden, wobei ein erwünschter, vollständig durchmischter Zustand erreicht wird.

[0003] Die US-A-5279463 und US-A-5538191 offenbaren Verfahren und Geräte zur Materialbearbeitung mit hoher Scherung, wobei ein Gerätetyp aus einem in einem Stator rotierenden Rotor besteht, um einen ringförmigen Strömungsdurchlass bereitzustellen, umfassend eine Strombahn mit einem Bearbeitungsbereich mit hoher Scherung, in welchem die Durchlassweite kleiner ist als im restlichen Bereich, um einen ergänzenden Bearbeitungsbereich mit hoher Scherung bereitzustellen, in welchem freie Supra-Kolmogoroff-Wirbel beim Durchgang des Materials durch denselben unterdrückt werden.

[0004] Couette hat ein Gerät zur Messung der Viskosität einer Flüssigkeit entwickelt, bestehend aus einem Zylinder, welcher in die in einem rotierenden zylindrischen Gefäß enthaltene Flüssigkeit eingetaucht ist, wobei die Viskosität gemessen wird, indem das auf diese Weise auf den Zylinder wirkende Drehmoment gemessen wird. Es wurde herausgefunden, dass zwischen der Viskositätsmessung und der Winkelgeschwindigkeit der Rotoroberfläche bis zu einem bestimmten Wert ein linearer Zusammenhang besteht, oberhalb desselben der lineare Zusammenhang zusammenbricht. Dieses Phänomen ist von G. I. Taylor untersucht worden, welcher zeigte, dass die ursprüngliche Schichtströmung in der Ringkammer zwischen den beiden zylindrischen Oberflächen bei Überschreiten einer bestimmten Reynoldszahl instabil wird und Wirbel, sog. Taylorwirbel, auftreten, deren Achsen entlang des Umfangs des Rotors parallel zu dessen Rotationsachse liegen, und welche abwechselnd in entgegengesetzte Richtungen rotieren. Die Bedingungen, dass die Strömung in dieser Art und Weise instabil wird, können mit Hilfe einer charakteristischen Zahl, der sog. Taylorzahl, ausgedrückt werden, welche von der radialen Breite des Ringspalts, dem Radius des Rotors und dessen Umfangsgeschwindigkeit abhängt. Obgleich Nippon Paint fordert, dass Taylorwirbel wegen deren besonderer Zweckmäßigkeit vorhanden sind, habe ich herausgefunden, dass bei einer Verwendung der Geräte für die oben beispielhaft genannten Prozessarten, insbesondere wenn eine gründliche und gleichmäßige Mikrodurchmischung erforderlich ist, das Vorhandensein der Wirbel die gewünschte Wirkung oder Reaktion hemmt, weil das zu behandelnde Material von den Wirbeln mitgerissen und in den Wirbeln teilweise isoliert wird, wodurch eine Durchmischung unvollständig wird und man auf viel langsamere Diffusionsprozesse angewiesen ist.

[0005] Die DE-A-2121022 offenbart eine Einrichtung zum Aufschließen von Gewebezellen, bei welcher die einer Suspension zugeführten Gewebezellen in dem Raum aufgeschlossen werden, welcher zwischen der Seitenfläche eines rotierenden, leicht kegelstumpfförmigen Zylinderelements und der stationären inneren Seitenfläche eines hohlen, leicht kegelstumpfförmigen, koaxialen Zylinderelements definiert ist, wobei der Abstand zwischen den Flächen mittels einer Mikrometerschraube eingestellt werden kann.

Zusammenfassung der Erfindung

[0006] Eine Hauptaufgabe der Erfindung ist es, ein neues Verfahren und ein Gerät zum Behandeln von Materialien bereitzustellen, wobei die Verfahren ausgeführt und das verwendete Gerät betrieben werden

können, ohne dass Taylorwirbel vorhanden sind, so dass eine erforderliche Durchmischung verbessert wird.

[0007] Genauer ist es eine Aufgabe, ein Verfahren und ein Gerät zur Durchführung derjenigen Verfahren bereitzustellen, bei welchen eine Strömung des beteiligten Materials ohne die Erzeugung von Taylorwirbeln und eine sich daraus ergebende Hemmung der Durchmischung erreicht werden kann.

[0008] Diese Aufgaben werden gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Die abhängigen Ansprüche 2 bis 7 offenbaren vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0009] Diese Aufgaben werden auch durch ein Gerät mit den Merkmalen des Anspruchs 8 gelöst. Die abhängigen Ansprüche 9 bis 15 betreffen vorteilhafte Ausgestaltungsformen der Erfindung.

[0010] Die zylindrischen Geräteelemente können um eine gemeinsame Achse oder um jeweilige Achsen rotierbar montiert sein, so dass die Elemente exzentrisch rotieren und der erforderliche Abstand auf die jeweiligen Oberflächenbereiche beschränkt ist.

[0011] Die vorgenannten sowie weitere Aufgaben, Merkmale und Vorteile der Erfindung werden durch die folgende Beschreibung in Zusammensicht mit den anliegenden Zeichnungen offensichtlich.

Beschreibung der Zeichnungen

[0012] Nachfolgend werden besonders bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung beispielhaft mit Bezug zu den anliegenden schematischen Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

[0013] Fig. 1 einen Teilaufriss und Teillängsquerschnitt eines kompletten Materialbehandlungssystems;

[0014] Fig. 2 einen ähnlichen Aufriss und Teillängsschnitt eines weiteren kompletten Materialbehandlungssystems, bei welchem dem System von außen Energie zugeführt werden kann, um die Behandlung zu verbessern und/oder zu fördern;

[0015] Fig. 3 einen Querschnitt durch das in den Fig. 1 und Fig. 2 gezeigte Behandlungsgerät, um die zylindrischen Elemente und deren Beziehung zueinander zu zeigen, wobei die zusammenwirkenden Oberflächen mit einem Katalysator beschichtet sein können, um den Prozess zu verbessern und/oder zu fördern;

[0016] Fig. 4 einen zu Fig. 3 ähnlichen Querschnitt durch ein Gerät, bei welchem die Längsachsen des Stators und Rotors versetzt sind, so dass sich ein Ringdurchlass ergibt, dessen radiale Breite entlang des Umfangs variiert; und

[0017] Fig. 5 einen Längsquerschnitt durch ein Gerät, um die Ausbildung von Taylorwirbeln im Ringdurchlass bei Vorliegen entsprechender Bedingungen zu zeigen.

[0018] Ähnliche oder äquivalente Teile werden, sofern zweckmäßig, in allen Zeichnungen der Figuren mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet.

[0019] Die Abstände zwischen gewissen Oberflächen sind aus Gründen der Klarheit der Darstellung übertrieben dargestellt.

Beschreibung der bevorzugten Ausgestaltungen

[0020] Bei dem in Fig. 1 dargestellten System wird dem Einlass **14** aus einem Vorratstank **10** über eine Dosierpumpe **12** ein erster Reaktionspartner (Reaktionspartner A) zugeführt, während dem gleichen Einlass **14** aus einem Vorratstank **16** über eine Dosierpumpe **18** ein zweiter Reaktionspartner (Reaktionspartner B) zugeführt wird. Falls erforderlich wird dem Einlass **14** aus einem Vorratstank **20** zusätzlich ein Katalysator oder ein Reaktionsgas zugeführt. Falls getrennte Einlässe **14** verwendet werden, müssen diese tangential nahe zusammenliegen. Das Bearbeitungsgerät umfasst eine Grundplatte **22**, auf welcher Rotorlagerböcke **24**, Statorträger **26** und ein elektrischer Antriebsmotor **28** mit variabler Geschwindigkeit befestigt sind. Eine den Stator des Geräts umfassende zylindrische Röhre **30**, ist auf Trägern **24** montiert, und trägt entlang des Hauptabschnitts ihrer Länge wiederum eine weitere zylindrische Röhre **32**, welche das äußere Gehäuse eines Wärmetauschers ausbildet, durch welchen ein Gas oder eine Flüssigkeit geführt werden kann, um die Temperatur in der Behandlungskammer zu kontrollieren. Der Ringdurchlass **34** zwischen den Zylindern **30** und **32** kann mit einem geeigneten Wärmetauschermedium, wie z. B. Drahtgewebe, oder mit den unter der Marke "SphereMatrix" bekannten speziellen Wärmetauscherstrukturen gefüllt sein, wobei das Kühlmittel (oder ggf. Heizfluid) durch die Einlässe **36** eintritt und durch die Auslässe **38** austritt. Zwischen den Trägern **24** erstreckt sich eine von diesen getragene Rotorwelle **40**, wobei ein Ende der Welle mit dem Motor **28** verbunden ist. Die Welle trägt einen zylindrischen Rotor **42**, welcher bei dieser Ausgestaltung massiv ist, und dessen Rotationsachse mit der Längsachse des Statorzylinders **30** zusammenfällt. Eine im Querschnitt ringförmige Behandlungskammer **44** ist zwischen der inneren Zylinderoberfläche **46** des Stators **30**, und der äußeren Zylinderoberfläche **48** des Rotors **42** und des Stirnkörpers **51** ausgebildet, wobei die Enden der Kammer durch die Welle **40** umgebende Enddichtungen **50** gegen ein Auslau-

fen verschlossen sind. Das reagierte Material wird durch einen Auslass **52** entladen.

[0021] Weil das behandelte Material im Behandlungsdurchlass **44** strömt, bildet sich auf jeder der zylindrischen Oberflächen **46** und **48** eine jeweilige Grenzschicht aus, deren Dicke durch die Viskosität und andere Faktoren des behandelten Materials und die relative Strömungsgeschwindigkeit des Materials über die Oberfläche bestimmt wird. Die laminare Grenzschicht für ein Fluid, welches über eine ebene Oberfläche entlang einer Weglänge x strömt, für welche bei der Erfindung eine Umfangsströmungslänge um die Rotoroberfläche verwendet wird, kann mit der Gleichung:

$$\delta = 4{,}91/\sqrt{N_{Rx}}$$

bestimmt werden, wobei N_{Rx} das Produkt aus Länge x und Strömungsgeschwindigkeit dividiert durch die kinematische Viskosität ist.

[0022] Falls beispielsweise der Rotorumfang x = 0,2394 m, die Umdrehungen pro Minute 2.000 und die kinematische Viskosität 0,000001 m/s betragen, ergibt sich für die Dicke einer einzelnen laminaren Grenze δ = 0,85 mm und für die der gesamten laminaren Grenzschicht 2δ = 1,7 mm.

[0023] Der Innendurchmesser der Statoroberfläche **46** und der Außendurchmesser der Rotoroberfläche **48** sind derart, dass die radiale Dimension des Behandlungsdurchlasses **44** ungefähr gleich den kombinierten Dicken der beiden laminaren Grenzschichten ist, so dass zwischen diesen kein Raum für eine zwischenliegende turbulent werdende Bulkschicht ist, welche eine Ausbildung von Taylorwirbeln ermöglichen würde und die in den beiden sich berührenden Grenzschichten stattfindende gründliche und gleichmäßige Mikrodurchmischung stören würde. Wenn sich die Taylorwirbel **57** daher, wie oben erklärt worden und in Fig. 5 grafisch dargestellt ist, ausbilden und die verschiedenen zu durchmischenden Komponenten im zu behandelnden Material in einem teilweise isolierten Zustand halten können, so dass die Möglichkeit für die Durchmischung, insbesondere Mikrodurchmischung, größtenteils oder sogar völlig gehemmt wird, ist der sehr viel langsamere molekulare Diffusionsprozess zur Durchführung der gewünschten Reaktionen erforderlich. In dem obigen speziellen Beispiel mit einem Gerät, bei welchem der Rotor **42** einen Außendurchmesser **48** von 0,0762 m hat, ist im Behandlungsdurchlass **44** ein Spalt von 1,7 mm erforderlich, um sicherzustellen, dass keine Bulkschicht zwischen den Grenzschichten vorhanden ist. Falls der Spalt nur um 5 mm vergrößert wird, zeigt die zwischenliegende Bulkschicht deutlich eine starke Taylorinstabilität (wie z. B. durch Wirbel **57**), mit dem Ergebnis, dass sich bei einer Vergrößerung des Spalts die mit dem kleineren Spalt der Erfindung nahezu sofort durchmischenden unterschiedlichen Ströme aus den in Fig. 1 und Fig. 2 in unterschiedlichen Schraffuren dargestellten Vorratsgefäßen **10**, **16** und **20** in einem inakzeptablen Umfang nicht gleichmäßig durchmischen, was im Bearbeitungsdurchgang **44** als Wirbel **57** mit unterschiedlich gefärbten Schichtungen entlang der Strömung im Behandlungsdurchgang **44** dargestellt ist.

[0024] Messungen von J. Kaye und E. C. Edgar in "Modes of adiabatic diabatic fluid flow in an annulus with inner rotating cylinder" Trans. ASME 80, 753–765 (1958) zeigen, dass es vier Hauptmöglichkeiten für eine Strömung in einem Ringdurchlass zwischen zwei zylindrischen, relativ zueinander rotierenden Oberflächen gibt. Falls sowohl die Reynolds- als auch die Taylorzahl niedrig sind, d. h. falls die Reynoldszahl kleiner als ungefähr 1.700 und die Taylorzahl kleiner als 41,3 sind, ist die Strömung laminar und stromlinienartig. Mit einer geringen bis moderaten Reynoldszahl und einer Taylorzahl zwischen 41,3 und 300 ist die Strömung immer noch laminar, weist jedoch ein System von Taylorwirbeln auf. Bei großen Taylorzahlen über 150 und höherer Reynoldszahl ist die Strömung turbulent mit Wirbeln, ist jedoch immer noch relativ "ordentlich". Mit einer moderaten Taylorzahl unter 150 und einer großen Reynoldszahl über 100 ist die Strömung gänzlich turbulent. Die Werte, bei welchen eine Taylorinstabilität erreicht wird, sind jedoch etwas inkonsistent, was durch einen von F. Schultz-Grunow und H. Hein entwickelten äquivalenten Figurensatz in "Boundary-layer Theory" von Dr. Hermann Schlichting, publiziert von McGraw Hill, Inc., gezeigt wird. Sie zeigen, dass die Strömung bei einer Reynoldszahl von 94,5 und einer Taylorzahl von 41,3 laminar ist, jedoch mit Ansätzen sich ausbildender Wirbel. Bei Reynoldszahlen von 322 bzw. 868 und entsprechenden Taylorzahlen von 141 bzw. 387 war die Strömung immer noch laminar, wies jedoch klar definierte Wirbel auf. Bei einer Reynoldszahl von 3.960 und einer Taylorzahl von 1.715 war die Wirbelströmung hochturbulent. Leider haben die Autoren nicht den Endzustand der jeweiligen Stator- und Rotoroberflächen aufgezeigt. Deshalb sind die oben genannten Beobachtungen ergebnislos und können nicht als Grundlage zur Bestimmung des Zustands verwendet werden, welcher zum Erreichen einer Mikro- und Makrodurchmischung durch eine Beseitigung von Taylorwirbeln erforderlich ist.

[0025] Obwohl bei der bisher beschriebenen Ausgestaltung der Rotor **42** der in der Mitte gelegene Körper ist, was mechanisch die günstigste Ausführung darstellt, ist es theoretisch auch möglich, das äußere Zylinderelement, oder sowohl das in der Mitte gelegene und das äußere Element zu rotieren. Es hat sich als wesentlich herausgestellt, den Rotor zu rotieren oder zwischen dem Rotor und dem Stator eine minimale Umfangsgeschwindigkeit zu erzeugen, um die Grenzschichten aufrechtzuerhalten. Bei der vor-

liegend dargestellten bevorzugten Ausgestaltung sollte diese tangentiale Differenzgeschwindigkeit nicht kleiner als 1,2 m/s, vorzugsweise größer als 2,0 m/s sein. Es hat sich unerwarteterweise herausgestellt, das die Ebenheit der Oberflächen **46** und **48** einen entscheidenden Faktor bei der Verhinderung einer Ausbildung von Taylorwirbeln mit deren Instabilität und Fähigkeit zur Trennung der zu durchmischenden Komponenten darstellt. Die normale Fertigung der zylindrischen Oberflächen mit den für die oben genannten Parameter (z. B. einem radialen Spalt von 1 bis 1,5 mm für einen Rotordurchmesser von 7,5 cm) erforderlichen Toleranzen ist nicht ausreichend, und die sich ergebende Oberflächenrauigkeit, welche normalerweise nicht als "Rauigkeit" angesehen wird, reicht immer noch zur Erzeugung von Taylorwirbeln aus. Für die vorliegende bevorzugte Ausgestaltung hat es sich deswegen als notwendig herausgestellt, den weiteren unerwarteten Schritt eines Polierens dieser Oberflächen bis zu einem sogenannten Spiegelfinish oder besser durchzuführen. Die einzige Erklärung zum jetzigen Zeitpunkt ist, obwohl ich dadurch nicht gebunden sein will, dass die Ungenauigkeiten in der Oberflächenebenheit, welche durch eine normale Fertigung trotz hoher Qualität erzeugt wird, ausreicht, um den Beginn einer als Taylorwirbel in Erscheinung tretenden Instabilität zu verursachen. Das Standartfinish von ungefähr 40 Mikrozoll (ungefähr 1 µm) ist zu rau, und es hat sich herausgestellt, dass ein gehohntes Finish besser als 5 Mikrozoll (0,127 µm) die Ausbildung einer Strömungsinstabiliät verhindert. Zum jetzigen Zeitpunkt wird angenommen, dass eine obere Grenze von 10 Mikrozoll (0,254 µm) erforderlich ist, falls eine Taylorinstabilität vermieden werden soll. Jedoch sind diese Zahlen in Abhängigkeit der beteiligten physikalischen Faktoren modifizierbar.

[0026] Die Ausgestaltung der Fig. 2 ist ähnlich zu der der Fig. 1. Hier sind entlang der Länge des Rotors **30** eine Reihe von Wandlern **54** vorgesehen, und das Material, aus welchem der Rotor hergestellt ist, oder zumindest der Abschnitt desselben zwischen den Wandlern und dem Rotor ist für die von den Wandlern abgegebene Energie so durchlässig wie möglich. In der Zeichnung sind die Wandler als Magnetrons oder Klystrons dargestellt, welche selbstverständlich eine elektromagnetische Strahlung mit einer sehr kurzen Wellenlänge (z. B. 2 mm bis 50 cm) erzeugen. Eine andere Möglichkeit ist, dass es sich dabei um Lichtquellen mit einer für den Prozess geeigneten beliebigen Wellenlänge (Farbe), Röntgenstrahlenquellen, Gammastrahlenquellen, oder um Wandler handelt, welche Longitudinalschwingungen, meist mit Ultraschallfrequenzen, erzeugen.

[0027] Fig. 3 zeigt einen Querschnitt durch die Stator- und Rotoranordnung der Fig. 1. Die zusammenwirkenden Oberflächen **46** und **48** der Fig. 3 sind mit einem Katalysator beschichtet, um eine den Prozessschritt ausbildende chemische Reaktion zu fördern. Die verwendeten Beschichtungen müssen die erfindungsgemäßen Kriterien betreffend die Ebenheit erfüllen, um die bestmögliche Durchmischung zu erreichen. Die Ausgestaltung der Fig. 4 ist für einen Fermentierungsprozess vorgesehen, und die Rotationsachse des Rotors **42** fällt nicht mehr mit der entsprechenden Längsachse des Stators **30** zusammen, so dass sich die Abmessung des radialen Spalts **44** des Behandlungsraums umlaufend um den Rotor verändert. Es ist eine Wärmetauscherstruktur vorgesehen, welche ein äußeres Gehäuse **32** und ein Wärmetauschermaterial **34** hat, weil solche Prozesse normalerweise exotherm sind und eine überschüssige Energie für optimale Betriebsbedingungen für die Mikroorganismen abgeführt werden muss. Eine Reihe von Sauerstoffzufuhreinlässen **14** sind entlang der Länge des Stators angeordnet und der darüber zugeführte Sauerstoff wird unverzüglich im Medium emulgiert, indem gleichmäßig dispergierte mikrofeine Luftblasen anstelle von eingeblasenen millimetergroßen Luftblasen mit einer nicht gleichmäßigen Verteilung wie bei herkömmlichen Fermentierungssystemen bereitgestellt werden. Das erzeugte Kohlendioxid entweicht im oberen Teil des Behandlungsdurchlasses durch eine Öffnung **56**. Der Fermenter gemäß Fig. 4 ist für einen kontinuierlichen Betrieb bestimmt und stellt eine kontinuierliche und gleichmäßige Abfuhr von CO, entlang des oberen Abschnitts des Rotors sicher, welcher ständig mit einer dünnen Schicht eines Mediums einer einheitlichen Mischung aller Inhaltsstoffe benetzt wird.

[0028] Das erfindungsgemäße Gerät ist im allgemeinen ein Reaktor, und ein Reaktor besteht aus den Gefäßen, welche zur Herstellung der gewünschten Produkte mittels physikalischer oder chemischer Mittel verwendet werden, und stellt oftmals das Herz einer kommerziellen Behandlungsanlage dar. Deren Konfigurationen, Betriebseigenschaften und zu Grunde liegenden Konstruktionsprinzipien machen die Reaktortechnologie aus. Neben Stöchiometrie und Kinetik umfasst die Reaktortechnologie Erfordernisse für ein Einführen und Entfernen von Reaktionspartnern und -produkten, ein Zuführen und Abführen von Wärme, ein Anpassen von Phasenänderungen und Materialtransfer, was ein effizientes Inkontaktkommen der Reaktionspartner gewährleistet, und eine Sicherstellung eines Nachfüllens oder Regenerierens eines Katalysators. Diese Sachverhalte werden berücksichtigt, wenn Reaktionskinetiken und Daten im Labormaßstab in die Auslegung und Fertigung der eigentlichen Pilotanlagen übersetzt, solche Anlagen danach zu größerdimensionierten Einheiten vergrößert und schließlich kommerzielle Anlagen ausgelegt und betrieben werden.

Kommerzielle Reaktorauslegung und Verwendung

[0029] Die meisten Reaktoren haben sich aus inten-

siven, auf einen Reaktortyp gerichtete Bemühungen entwickelt. Einige Prozesse sind aus Parallelentwicklungen entstanden, bei welchen deutlich unterschiedliche Reaktortypen verwendet worden sind. In den meisten Fällen ist der für Laborstudien ausgewählte Reaktor der kommerziell verwendete Reaktortyp geworden. Weitere Entwicklungen bevorzugen normalerweise einen Ausbau dieser Technologie. Beschreibungen einiger industrieller wichtiger petrochemischer Prozesse und deren Reaktoren sind in einigen kürzlich erschienenen Texten verfügbar. Es folgen veranschaulichende Beispiele für Reaktorverwendungen, welche nach Reaktortyp klassifiziert sind.

Chargenreaktoren

[0030] Der Chargenreaktor ist die zur Herstellung von Plastikharzen bevorzugte Konfiguration. Solche Reaktoren sind im allgemeinen 6 bis 40 m^3 (ca. 200–1.400 ft^3) große, Prallflächen aufweisende Tanks, in welchen zur Durchmischung Mischlamellen oder Flügelräder vorgesehen sind, welche von oben mittels langen Motorwellen angetrieben werden. Wärme wird auf und von den Komponenten entweder über doppelwandige Wände oder innere Spulen übertragen. An Stelle von Prallflächen auf der gesamten Länge werden fingerförmige Prallflächen nahe dem oberen Ende verwendet. Alle Harze, einschließlich Polyester, Phenolharzen, Alkydharzen, Harnstoff-Formaldehyden, Acrylen und Furanen können im wesentlichen in gleicher Art und Weise hergestellt werden. Die Rohmaterialien werden für z. B. ungefähr 12 Stunden auf Temperaturen von bis zu 275°C gehalten, bis die polymerisierte Flüssigkeit ausreichend viskos ist. Eine Anlage zur Herstellung von 200 unterschiedlichen Arten und Graden synthetischer Harze in drei 18 m^3 (ca. 640 ft^3) Reaktoren ausgelegt worden. Die Kostenersparnisse bei großtechnischen Abläufen sind für Chargenpolymerisationen möglich. Die weltweite Produktionskapazität von Polyvinylchlorid (PVC) ist größer als $15 \cdot 10^6$ t/Jahr, jedoch ist bis bislang kein kontinuierlicher Prozessreaktor zur PVC-Herstellung entwickelt worden. Allerdings sind kommerzielle PVC-Polymerisations-Chargenreaktoren vom Suspensionstyp mit einem Volumen von 200 m^3 (ca. 7.060 ft^3), einem Durchmesser von 5,5 m und einer Höhe von 10 m entwickelt worden.

[0031] Einige Beispiele für Reaktionsprozesse, welche unter Anwendung der vorliegenden Erfindung verwendet werden können, sind diejenigen, welche mit organometallischer Chemie, Reaktionen in flüssigem Ammoniak, Halogenierungen, Nitrierungen, Friedel-Craft-Reaktionen, Reduktionen, Hochtemperaturreaktionen (bis zu 260°C), Cyanisierungsreaktionen, Hydrolysen, Dehydrierungen, Epoxitationen, Diazotisierung, Alkylierungen, Veresterung, Kondensationsreaktionen, Mannich-Reaktionen und Benzolchemie zu tun haben.

[0032] In einer Veröffentlichung von G. I. Taylor von 1923 mit dem Titel "Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders" wurde zum ersten Mal ein direkter Vergleich zwischen einem Laborexperiment und einer Vorhersage für die Ausbildung eines in der Praxis auftretenden Instabilitätsmusters durchgeführt. Die Taylor'sche Analyse der Strömung zwischen konzentrischen Zylindern ergab einen wohldefinierten kritischen Wert für einen dimensionslosen Kontrollparameter, welcher jetzt "Taylorzahl" genannt wird, bei welchem die Grundströmung in Form kleiner Störungen instabil wird, welche zu "Taylorwirbeln" führen, welche den inneren Zylinder umgeben und in axialer Richtung geschichtet sind. Taylor führte sorgfältige Experimente aus, welche im Rahmen einiger Prozente für einen weiten Parameterbereich mit seiner Theorie übereinstimmten, und zeigte so, dass mit linearen Stabilitätsanalysen quantitative Mustervorhersagen gemacht werden können. Weitere Phänomene der Musterausbildung, zu welchen Taylor Pionierarbeiten leistete, umfassen: Taylorsäulen in schnell rotierenden Fluiden (welche gemäß dem Taylor-Proudman Theorem zweidimensional sind), die Rayleigh-Taylor-Instabilität einer Grenzfläche zwischen zwei Fluiden, welche in die Richtung des dichteren Fluids beschleunigt wird, die Saffman-Taylor-Berührungsinstabiliät einer Fluidgrenzfläche, welche sich in Richtung des dichteren Fluids bewegt, und Gasblasen in einem Fluid mit elektrischem Feld. Der enorme Einfluss der Beiträge von Taylor für das Verständnis von Mustern hat sich in diesen Gebieten mittlerweile gut etabliert.

[0033] Wie oben erwähnt worden ist, besteht die Anwendung der vorliegenden Erfindung bei Prozessen im Allgemeinen im Heizen, Kühlen, Schütteln, Reagieren, in einer Zustandsänderung, einer Oxidation, einer Reduktion, einem Vermengen, einer Neutralisation, einer Formänderung, einer Dichteänderung, einer Molekulargewichtsänderung, einer Dispergierung, einer Viskositätsänderung, einer pH-Änderung oder einer Veränderung einer beliebigen Eigenschaft einer Substanz in einem Gefäß, und solche Prozesse können als chemische Reaktortechnologie bezeichnet werden. Es gibt ständige Bemühungen, neue Technologien bereitzustellen, mit welchen Produkte effizienter produziert werden können. Beispielsweise können durch Verbesserungen der Heiz- und Kühlzyklen Produktionszeiten unabhängig davon verringert werden, ob kontinuierliche Prozesse oder Chargenprozesse gefahren werden. Die Materialien zum Bau und Herangehensweisen bei der Herstellung haben sich verändert und tragen wesentlich zum Verständnis der Reaktorauslegung und Reaktortechnologie des Stands der Technik bei. Die Erfindung betrifft insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, Prozesse und Geräte, welche Materialien oder Zusammensetzungen in Lösung oder Suspension durch die Einwirkung einer Durchmischung und/oder einer chemischen Reaktion modifizieren, dessen

Rate durch Zuführen oder Abführen von Energie in Form von Wärme, sichtbarem, ultraviolettem oder infrarotem Licht sowie längsgerichteten Druckoszillationen, Mikrowellen, Röntgen- und Gammabestrahlungen kontrolliert werden kann.

[0034] Viele chemische Reaktionsprozesse, bei welchen eine eine Flüssigkeit/Flüssigkeit, Flüssigkeit/Feststoff, Flüssigkeit/Gas oder Flüssigkeit/Feststoff/Gas-Durchmischung beteiligt ist, werden durch die anhaltenden Probleme mit einer inhomogenen Temperaturverteilung, einer inhomogenen Verteilung von Reaktionspartnern und durch eine Erzeugung unerwünschter Nebenprodukte als Folge der Inhomogenitäten beeinträchtigt. Bei solchen chemischen Reaktionsprozessen sind typischerweise eine Kristallisation, Fällung, eine Emulsionspolymerisation, eine metallozenkatalysierte Polymerisation, Polymerisations-Enzymreaktionen und eine Sol-Gel-Herstellung beteiligt. Solche Inhomogenitätsprobleme herrschen in Rührtankreaktoren, Röhrenreaktoren, Gasflüssigkeitskontaktoren usw. vor. Ein weiteres Problem bei den oben genannten Reaktorprozessen ist, dass diese Chargenprozesse sind, und für eine Hochskalierung von Labortests bis zur kommerziellen Herstellung eine beträchtliche Zeit in Anspruch nehmen, welche zwischen zwei bis fünf Jahren liegen kann, und folglich mit beträchtlichen Kosten und dem Risiko verbunden sind, dass Marktchancen verpasst werden, welche zum Zeitpunkt des Beginns der ersten Experimente bestanden haben und nach vielen Jahren der Hochskalierung des neuen Prozesses nicht mehr bestehen.

[0035] Ein spezielles Beispiel einer Anwendung der Erfindung ist der sogenannte Sol-Gel-Prozess. Dieser Ansatz geht von geeigneten molekularen Startmaterialien aus, welche in einer Lösung einfach durchmischt werden. Polymerisationsreaktionen zwischen den Precursorn führen dann zu einer festen Matrix. Beispielsweise können Metallalkoxide durch Hydrolyse und Kondensation in Oxide umgewandelt werden. Diese Materialien gewinnen zunehmend an Bedeutung und finden sich technologisch in Komponenten von Kathoden elektrischer Batterien zur Verwendung bei Elektroautos, Herzschrittmachern und Heimstereogeräten und dgl., sowie bei bestimmten Typen von Sensoreinrichtungen wieder. Eine der momentanen Hauptverwendungen ist jedoch eine Verbesserung der optischen Eigenschaften von Glasfenstern, indem eine Antireflektionsbeschichtung aus SiO_2-TiO_2 abgeschieden wird. Dieser Ansatz bietet mehrere Vorteile, welche zu einer zunehmenden und erfolgreichen Anwendung in den Materialwissenschaften geführt hat. Die Grundlegendste ist, dass diese im Vergleich zu Standard-Festphasensynthetseverfahren energetisch wirtschaftlich ist. Hitzebeständige Oxidmaterialien können relativ einfach bei ziemlich niedrigen Temperaturen hergestellt werden. Es hat den zusätzlichen Vorteil, dass ein Feststoff aus Lösungen hergestellt werden kann und keine umständlichen und zeitintensiven Pulverreaktionen erforderlich sind. Sowohl Gläser als auch Keramiken können auf diese Weise direkt aus einer Lösung hergestellt werden. Weil bei diesem Ansatz Lösungen erforderlich sind, war es Wissenschaftlern der Industrie möglich, Anwendungen zu entwickeln, welche das zur Beschichtung anderer Materialien mit funktionellen Filmen ausnützen, welche trotz ihrer molekularen Herkunft selbst oberhalb von 400°C thermisch stabil sind. Es eignet sich ideal zur Herstellung von Hybridmaterialien, welche sowohl organische als auch anorganische Spezies enthalten. Solche Zusammensetzungen gehören zu einer Kategorie zwischen Gläsern und Polymeren und haben einige verblüffende Eigenschaften. Einige werden bereits kommerziell verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften von Hybriden betreffen die "Sol-Gel-Optik". Sie können z. B. verwendet werden, um organische Farbstoffe in Sol-Gel-Quarzen einzuschließen, um die optischen Eigenschaften der Farbstoffe für Laseranwendungen, nichtlineare optische Einrichtungen und fotochrome Anwendungen zu verbessern. Der Sol-Gel-Ansatz eröffnet neue Aussichten auf eine Synthese, mit welcher Produkte mit kombinierten Eigenschaften wie nie zuvor hergestellt werden können. Corriu und Kollegen haben über die Herstellung von Mischkeramiken, wie z. B. sich gegenseitig durchdringende Netzwerke aus Siliziumkarbid, berichtet. Stanley Whittingham, ein Wissenschaftler der State University of New York in Binghamton und sein Team haben Oxidkeramiken aus wässrigen Lösungen (hydrothermale Prozessführung) bei Temperaturen (100–300°C) hergestellt, welche normalerweise bei herkömmlichen Synthesen und nicht in der Festkörperchemie verwendet werden, was wiederum den Vorteil eines milderen Ansatzes hervorhebt.

[0036] Sol-Gel-Verfahren können auch im Grenzbereich zur Biologie verwendet werden, in welchem Enzyme und lebende Zellen in einem Material, wie z. B. Sol-Gel-Silizium, eingeschlossen und in einem bioaktiven Zustand gehalten werden können. Die unmittelbaren Anwendungen für eine beliebige Technologie, mit welcher ein Enzym oder lebende Zellen unterstützt werden können, sind wahrscheinlich Biosensoren und Bioreaktoren, bei welchen das Material dazu beiträgt, eine schützende oder unterstützende Umgebung für die aktive Komponente bereitzustellen, seien es Enzyme, eine lebende Zelle oder andere Spezies. Die ersten kommerziellen Anwendungen von Biogelen sind die Verkapselung von Lipasen (Enzymen) mittels Fluka zur Herstellung von Bioreaktoren, in welchen Produktprofile sorgfältig kontrolliert werden können. Es ist auch über Biosensoren berichtet worden, welche auf einer in einem Sol-Gel-Silizium eingeschlossenen Glucoseoxidase beruhen, jedoch sind diese bis jetzt noch nicht kommerzialisiert worden.

[0037] Mit der Erfindung können die obigen Probleme gelöst werden, indem ein kontinuierliches Verfahren bereitgestellt wird, bei welchem die Reaktionspartner, von welchen einer eine Flüssigkeit ist, durch einen temperatur- und druckkontrollierten Reaktor durchgeführt werden, in welchem ein ergänzender Bearbeitungsbereich **44** mit höherer Scherung zwischen den nahe beabstandeten Durchlassoberflächen den gesamten Ringraum umfasst, welcher zwischen den Oberflächen des Rotors **42** und Stators **30** vorgesehen ist. Es können auch Hochskalierungsprobleme gelöst werden. Des weiteren kann eine außergewöhnliche Temperaturkontrolle durch eine direkt aufeinanderfolgende Grenzschichtströmung, kombiniert mit einem adiabatischen Rotorbetrieb unter Verwendung dünnwandiger Röhren bereitgestellt werden. Eine verbesserte Wärmekontrolle kann durch außergewöhnlich hohe U-Werte mit ausbalancierten Wärmeübergangswiderständen erreicht werden, was durch eine ausbalancierte Grenzschichtdickenkontrolle, eine Verwendung einer mittels Sphere-Matrix (Markenzeichen) verbesserten Kühlung der äußeren Oberfläche des Stators und direkt aufeinanderfolgenden Grenzschichtströmungen mit hoher Scherung an der inneren Oberfläche des Stators erreicht werden kann. Ferner kann durch Emulgieren von Gas in direkt aufeinanderfolgenden Grenzschichtströmungen eine verbesserte Gas-Flüssigkeits-Reaktion erreicht werden. Die Prozesse nach dem Stand der Technik verwenden Rührtankreaktoren, Stoßreaktoren, Reihenreaktoren mit statischer Durchmischung usw., was oben genau beschrieben worden ist, welche eine ungleichmäßige Durchmischung der Reaktionspartner und ein ungleichmäßiges Zuführen und Abführen von Wärme zeigen.

[0038] Überraschenderweise und im Gegensatz zu der bei großen Spaltgrößen entstehenden Situation, bei welcher zwischen den Grenzschichten eine Bulkschicht vorliegen kann, wird mit den Verfahren und dem Gerät der Erfindung ab dem Eintrittspunkt der vermischten Komponenten eine nahezu sofortige, gleichmäßige und konstante Durchmischung erhalten, wenn der Ringspalt ausschließlich direkt aufeinanderfolgende Grenzschichten unter Auschluss einer zwischenliegenden Bulkschicht zulässt. Eine minimale Tangentialgeschwindigkeit von etwa 1,2 m/s ist notwendig, um diesen unerwarteten vollkommenen Grad an Durchmischung zwischen Einlass und Auslass zu erreichen, welche bei dem Gerät typischerweise ungefähr 24 Zoll (609,6 mm) voneinander beabstandet sind. Wenn in einem Versuchsexperiment der Ringspalt beispielsweise auf ungefähr 5 mm eingestellt worden ist, was die Existenz einer Bulkschicht zwischen den laminaren Grenzschichten ermöglicht, haben die sich im Spalt nach unten bewegenden zu durchmischenden Komponenten deutlich sichtbare gezeigt. Taylorwirbel und deren Trennungseffekt für zu durchmischende Komponenten können jetzt oberhalb kritischer Taylorzahlen, bei welchen solche schädlichen Wirbel entstehen würden, vermieden werden, was eine ideale Pfropfenströmungsdurchmischung auf der Sub-Kolmogoroff-Skala ermöglicht. Die Ringspaltoberflächen können mit einer Katalysatorschicht beschichtet sein, und können für elektromagnetische Wellen reflektierend ausgeführt sein. Temperaturgradienten werden in den sehr dünnen Ringspalten im Wesentlichen vermieden. Deutlich reduzierte Oberflächenablagerungen und Verzunderungen führen bei der Erfindung zu einer genauen thermischen Kontrolle.

[0039] Die Erfindung eignet sich besonders für Bioreaktorsysteme, bei welchen eine ausreichende Durchmischung einer Bakterienkultur für eine Fermentierung in vielerlei Hinsicht entscheidend ist, was eine ausreichende Zufuhr von Nährstoffen zu den Zellen und ein Abführen beliebiger toxischer Materialien aus deren Umgebung einschließt. Eine Durchmischung beeinflusst auch die Zufuhr von Sauerstoff, indem große Luftblasen in kleinere aufgebrochen werden und diese gleichmäßig in der Flüssigkeit dispergiert werden, so dass deren Verweilzeit im Reaktor erhöht wird, wodurch für einen Sauerstofftransfer ein größerer Gasstau-Zwischenbereich erzeugt wird. Für eine genaue Temperaturkontrolle und einen effizienten Wärmetransfer ist auch eine gute Durchmischung erforderlich. Eine gute Durchmischung ist notwendig, um eine homogene Kultur aufrecht zu erhalten, in welcher die Konzentrationen bestimmter Stoffwechselprodukte genau beobachtet werden können. Ein Durchmischen ist auch wichtig, um die schnelle Dispergierung beliebiger zugefügter Lösungen, wie z. B. Säuren, Basen oder Nährstoffe, sicherzustellen, so dass sich keine lokal hohen Konzentrationen ausbilden.

[0040] Eine Durchmischung in Bioreaktoren ist sehr komplex und war Gegenstand umfangreicher Untersuchungen und Diskussionen. Eine gute Flüssigkeitsphasendurchmischung und ein guter Gas-Flüssigkeitsmassentransfer ist bei der Versorgung einer Bakterienkultur mit einer ausreichenden Sauerstoffmenge sicherlich am notwendigsten. Jedoch verursacht eine mechanische Durchmischung Turbulenzen und Wirbel im Fermentermedium, welche etwa 50–300 μm groß sind. Der Transfer gelöster Substanzen zu den etwa 1–2 μm langen Zellen in diesen Wirbeln ist durch einen von der Viskosität des Mediums abhängigen Prozess durch Diffusion beschränkt. Als Folge dieser Beschränkungen würde es als ideal erscheinen, die Kultur so viel wie möglich zu durchmischen. Jedoch verursacht eine erhöhte Durchmischung eine damit einhergehende Erhöhung des hydromechanischen Stresses (was gewöhnlich der Scherung zugeschrieben wird), was die Entwicklungsfähigkeit der Mikroorganismen schwerwiegend beeinträchtigen kann. Dieses Phänomen wird Turbohypobiose genannt. Die theologischen Eigenschaften des Mediums wirken sich auch auf das Durchmi-

schen aus, weil mit zunehmender Viskosität der für den gleichen Durchmischungsgrad erforderliche Energieeintrag steigt. Das sind tatsächlich mechanische und finanzielle Einschränkungen für die Größe und Struktur des Bioreaktors. Für alle praktischen Zwecke bestehen diese Beschränkungen jedoch nicht bei kleinen Bioreaktoren, so dass Bioreaktoren normalerweise klein (1–2 L) sind, wobei die Größe des Durchmischermotors bis zu 25 der Gefäßgröße beträgt. Dadurch wird eine effektive Durchmischung erreicht, welche in größeren Bioreaktoren nicht wirtschaftlich verwirklicht werden kann. Insgesamt ist es für eine effektive Hochskalierung notwendig, die endgültige Fermentierung im Forschungs- und Pilotstadium so genau wie möglich anzunähern.

[0041] Bei einer gegebenen Bioreaktorauslegung legen die Viskosität und Energiezufuhr die Strömungsmuster fest, welche die Leistungsfähigkeit des Reaktors sowohl auf mikroskopischer als auch auf makroskopischer Skala beeinflussen. Eine Scherung tritt als eine der Erscheinungsformen der Erstgenannten auf und beeinflusst direkt einen Wärme- und Massetransfer. Alle Transferphänomene sind letztendlich in die Kinetiken des Prozesses integriert, aus welchem das Biomassewachstum und die Produktbildung hervorgehen. Große Gefäße weisen nicht im gesamten Volumen gleichmäßige hydrodynamische Eigenschaften auf, und manchmal ist es sinnvoll darin Bereiche gemäß der Geschwindigkeit und Turbulenz zu definieren. Jeder dieser Bereiche bildet eine unterschiedliche Umgebung, welche unterschiedliche Substrat- und Produktkonzentrationen, unterschiedliche pH-Werte, unterschiedliche Zellkonzentrationen, unterschiedliche Temperaturen und unterschiedliche Scherbedingungen aufweisen kann. Sobald das definiert ist, können die das System darstellenden Gleichungen aufgestellt werden, weil die Reaktionskinetiken und Transferraten von diesen Variablen abhängen.

[0042] Der Rührtankfermenter ist der wichtigste Bioreaktortyp für industrielle Produktionsprozesse. Das oder die Rührwerke ist/sind für einer Reihe von Aufgaben erforderlich: ausreichender Bewegungsenergie, Wärme- und Massentransfer und Durchmischung, sowie Homogenisierung von Suspensionen. Eine Optimierung der individuellen Aufgaben würde zu unterschiedlichen Flügelradausführungen führen. Weil alle diese Anforderungen gleichzeitig erfüllt werden müssen, stellen die in der Praxis verwendeten Rührwerke stets Kompromisse dar. Herkömmliche, in Fermentern verwendete Flügelräder werden typischerweise in Axial- und Radialströmungsflügelräder klassifiziert. Bei der Standardkonfiguration wird von den vielen Flügelradgeometrien das sechslamellige Scheibenflügelrad mit Gasinjektion unter dem Flügelrad am häufigsten verwendet. Jedoch sind durch ein Interesse an einer Verwendung starker Strömungen Rührwerke mit geringer Leistungszahl, beispielsweise die unter den Marken Intermig; Lightnin A315; Prochem Maxflow T und Scaba 6SRGT verkauften, entwickelt worden, und es ist eine verbesserte Durchführung von Fermentierungsprozessen mit solchen alternativen Ausführungen berichtet worden. Wegen der relativ geringen Sauerstofftransfereffektivität von Rührtankreaktoren hinsichtlich der Leistungsaufnahme, ist eine ziemlich hohe spezifische Leistungsaufnahme für eine ausreichende Sauerstofftransferrate notwendig, welche unabhängig von der Größe des Reaktors ist. Das hohe Maß an Wärme, welche durch das Rühren in großen (> 500 m^3) Rührtankreaktoren erzeugt wird, kann deshalb schwerlich oder unmöglich im Reaktor verringert werden. Ferner sind bei geringen Rührgeschwindigkeiten die Gasdispersion und Durchmischungseffizienz von Rührern extrem gering. Deshalb ist es technisch und ökonomisch nicht zweckmäßig Rührreaktoren für Prozesse mit geringem Durchsatz (z. B. biologische Schmutzwasserbehandlung) zu verwenden, welche in großen Reaktoren mit einer geringen spezifischen Leistungsaufnahme ausgeführt werden. Manchmal erfordern biologische Faktoren (z. B. eine Scherempfindlichkeit von Zellen) andere als Rührtankreaktoren.

[0043] Einige Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Verwendung dieser Reaktoren bei der Produktion primärer und sekundärer Stoffwechselprodukte mittels Bakterien (z. B. Streptomyces), Hefen oder Pilzen in hochviskosen Kulturmedien, wobei sich die Rheologie des Mediums wegen der Veränderung der Viskosität des Mediums und Zellmorphologie während der Produktion verändert. Mit zunehmender Viskosität und zunehmendem Reaktorvolumen überwiegt in den Reaktoren allmählich die Inhomogenität der Zusammensetzung des Mediums. Es ist nicht mehr möglich, Modelle für räumlich verteilte Parameter oder für eine axiale Dispersion der flüssigen Phase zu verwenden, es sind strukturierte Reaktormodelle erforderlich. Wegen fehlender experimenteller Daten existieren gegenwärtig jedoch keine strukturierten Reaktormodelle zur Beschreibung von Kultivierungsprozessen in großen Reaktoren. Deshalb können in diesem Bericht nur Modelle mit räumlich verteilten Parametern und einfacher axialer Dispersion betrachtet werden. Es sind viele unterschiedliche Typen vorgeschlagen worden. Mechanisch durchmischte Fermenter stellen einen Typ dar. Sie können von außen beleuchtet werden, um Licht zur Förderung der Reaktion bereitzustellen. Alternativ kann eine Ummantelung (Ringkammer) zum Abführen von Wärme vorgesehen sein, wobei Licht über eine Hohlwelle oder einen eingesetzten Finger bereitgestellt wird. Es gibt mehrere kommerzielle Bioreaktoren mit Innenbeleuchtung. Der zweite Typ ist eine Ringausführung mit einer inneren Geometrie, welche zur Entstehung von Taylorwirbeln führt. Verglichen mit einer turbulenten Durchmischung ist für diese Art einer geordneten Durchmischung eine gesteigerte Photosynthese beobachtet worden. Zum

Einsetzen in einen rechteckförmigen Tank sind Lichthohlleiter mit Leuchtstoffröhren vorgeschlagen worden. Gewöhnlich ist bei rechteckförmigen Tanks eine Beleuchtung von einer Seite vorgesehen. Eine solche Geometrie kann quantitativ in der Tat am einfachsten behandelt werden. Ein spezieller Typ eines Ringreaktors ist der von Algatron (Markenzeichen). Bei diesem Reaktor wird ein dünner Algenfilm mittels Zentrifugalkraft an der inneren Wand eines rotierenden Zylinders gehalten. Die Lichtquelle kann sowohl innerhalb als auch außerhalb der Kulturringkammer angeordnet sein. Außerdem ist ein Senkschicht-Photobioreaktor vorgeschlagen worden. Algen können in einer dünnen Schicht durch eine gewellte Platte absinken und werden schließlich wiederaufbereitet.

[0044] Genau wie bei industriellen chemischen Prozessen zieht die Entwicklung von Herstellungsprozessen, bei welchen Materialien mit biologischer Herkunft eingesetzt oder mikrobiologische Stämme zur Durchführung von Biokonversionen verwendet werden, mehrere Schritte nach sich. Auf den Anfang im Labor mit einer Ausrüstung mit wenigen Millimetern an Volumen folgt eine Hochskalierung auf industrielle Skalen mit Kapazitäten von hunderten oder tausenden Kubikmetern. Eine Hochskalierung der Auslegung zwischen jedem Schritt ist wichtig, jedoch ist im Allgemeinen nur der letzte Schritt zur größten Einheit kritisch. Das ist so, weil es in den meisten Fällen Rationalisierungseffekte gibt, und Anlagen würden größer und größer werden, falls es keine Auslegungsbeschränkungen geben würde, welche von mehreren Faktoren abhängen, von welchen der wichtigste das Volumen/Oberflächenverhältnis ist.

[0045] Mit dem erfindungsgemäßen Reaktor wird ein Verfahren bereitgestellt, welches eine größtmögliche Vielfalt an kontinuierlichen Reaktionen ermöglicht, indem eine Grenzschichtscherung als fluiddynamisches Prinzip für eine gleichmäßige Makro- und Mikrodurchmischung verwendet wird, indem eine Verschlechterung durch Wirbel unterbunden wird, indem radiale Temperaturgradienten unterbunden werden, indem eine Hoch- oder Herunterskalierung des Systems außerordentlich vereinfacht wird, weil lediglich eine grundlegende Geometrie notwendig ist (ein sich in einem röhrenförmigen Stator drehender röhrenförminger Rotor), wobei beträchtliche Energieeinsparungen möglich sind, weil es nicht erforderlich ist, Flüssigkeitsbulkschichten in Tanks zu rezirkulieren oder den übermäßigen Strömungswiderstand statischer Rührwerke zu überwinden. Beispielsweise begünstigt eine sorgfältige Mikrodurchmischung in Kombination mit einer axial in Zonen aufgeteilten Temperaturkontrolle die Beseitigung unerwünschter Nebenreaktionen außerordentlich oder ermöglicht bei Polymerisationsreaktionen die Herstellung sehr schmaler Molekulargewichtsverteilungen. Eine weitere unerwartete Eigenschaft der Erfindung ist, dass Ablagerungen an den Prozessoberflächen ausbleiben. Gleichermaßen einfach ist die Reinigung des Reaktorinneren, was durch eine schnelle Säuberung des feinen Ringspalts mit einem geeigneten Lösungsmittel erreicht wird, und normalerweise weniger als 10 Sekunden in Anspruch nimmt. Die erfindungsgemäße Strömungseigenschaft ist die einer ideal durchmischten Pfropfenströmung mit minimaler Entmischung und keinen Kanaleffekten.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Behandeln von Materialien in einer Strombahn, wobei das Verfahren umfasst:
– Bereitstellen eines Geräts zum Behandeln der Materialien umfassend zumindest einen Einlass (**14**) für das zu behandelnde Material und zumindest einen Auslass (**52**) für das behandelte Material, wobei der Einlass (**14**) bzw. der Auslass (**16**) korrespondierend zu den entgegengesetzten Enden zweier zylindrischer Geräteelemente (**30**, **42**) angeordnet ist, welche relativ zueinander rotierbar montiert sind, wobei die Elemente (**30**, **42**) zwei nahe beabstandete ebene Oberflächen (**46**, **48**) definieren, welche einen die Strombahn für das Material vom Einlass (**14**) zum Auslass (**52**) ausbildenden ringförmigen Behandlungsdurchlass (**44**) bereitstellen;
– Durchführen des zu behandelnden Materials durch den ringförmigen Behandlungsdurchlass (**44**), wobei das behandelte Material im Behandlungsdurchlass (**4**) strömt und sich an jeder der nahe beabstandeten ebenen Oberflächen (**46**, **48**) jeweils eine laminare Grenzschicht ausbildet, wobei die Dicke (**6**) der Grenzschicht durch die Gleichung

$$\delta = \frac{4,91}{\sqrt{N_{Rx}}}$$

bestimmt ist,
– wobei N_{Rx} das Produkt aus Länge x des Wegs und der Strömungsgeschwindigkeit dividiert durch die kinematische Viskosität des zu behandelnden Materials ist,
– wobei der radiale Abstand zwischen den beiden Oberflächen (**46**, **48**) gleich oder kleiner ist als die gesamte radiale Dikke der beiden Grenzschichten, und
– wobei die Ebenheit der Oberflächen (**46**, **48**) kleiner als 0,254 Mikrometer ist, so dass eine Ausbildung von Taylor Wirbeln im Behandlungsdurchlass (**44**) gehemmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die zylindrischen Geräteelemente (**30**, **42**) relativ zueinander um jeweilige Längsachsen rotieren, welche zueinander koaxial sind, so dass der radiale Abstand der beiden Oberflächen (**46**, **48**) in Umfangsrichtung derselben konstant ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Geräteelemente (**30**, **42**) bewegt werden, so dass zwischen deren wirksamen Oberflächen eine Relativ-

geschwindigkeit von zumindest 1,2 Meter pro Sekunde erzeugt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Ebenheit der Oberflächen (**46**, **48**) 0,127 Mikrometer oder weniger beträgt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, des Weiteren umfassend ein Zuführen von Behandlungsenergie zum Behandlungsdurchlass (**44**) durch die Wand des äußeren der beiden Elemente (**30**, **42**).

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die zum Behandlungsdurchlass zugeführte Energie aus folgender Gruppe ausgewählt ist:
elektromagnetische Energie einer Mikrowellenfrequenz, Licht, Röntgenstrahlung, Gammastrahlung, longitudinale Ultraschallschwingungen.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine oder beide der Flächen (**46**, **48**) mit einem katalytischen Material beschichtet ist/sind, welches zumindest eine chemische, biochemische und/oder biozide Reaktion im Behandlungsdurchlass (**44**) verstärkt.

8. Gerät zum Behandeln von Materialien in einer Strombahn, umfassend:
– zumindest einen Einlass (**14**) für das zu behandelnde Material und zumindest einen Auslass (**52**) für das behandelte Material, wobei der Einlass (**14**) bzw. der Auslass (**16**) korrespondierend zu den entgegengesetzten Enden zweier zylindrischer Geräteelemente (**30**, **42**) angeordnet ist, welche relativ zueinander rotierbar montiert sind, wobei die Elemente (**30**, **42**) zwei nahe beabstandete ebene Oberflächen (**46**, **48**) definieren, welche einen die Strombahn für das Material vom Einlass (**14**) zum Auslass (**52**) ausbildenden ringförmigen Behandlungsdurchlass (**44**) bereitstellen;
– wobei im Betrieb das behandelte Material im Behandlungsdurchlass (**44**) strömt und sich an jeder der nahe beabstandeten ebenen Oberflächen (**46**, **48**) jeweils eine laminate Grenzschicht ausbildet, wobei die Dicke (**6**) der Grenzschicht durch die Gleichung

$$\delta = \frac{4,91}{\sqrt{N_{Rx}}}$$

bestimmt ist,
– wobei N_{Rx} das Produkt aus Länge x des Wegs und der Strömungsgeschwindigkeit dividiert durch die kinematische Viskosität des zu behandelnden Materials ist,
– dadurch gekennzeichnet, dass der radiale Abstand zwischen den beiden Oberflächen (**46**, **48**) gleich oder kleiner als die gesamte radiale Dicke der beiden laminaren Grenzschichten des durch den Behandlungsdurchlass (**44**) durchzuführenden Materials an den beiden Oberflächen (**46**, **48**) ist,
– und dass die Ebenheit der Oberflächen (**46**, **48**) kleiner als 0,254 Mikrometer ist, wobei die Ausbildung von Taylor Wirbeln im Behandlungsdurchlass (**44**) gehemmt wird.

9. Gerät nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die zylindrischen Geräteelemente (**30**, **42**) relativ zueinander um jeweilige Längsachsen, welche zueinander koaxial sind, rotierbar montiert sind, so dass der radiale Abstand der beiden Oberflächen (**46**, **48**) in Umfangsrichtung derselben konstant ist.

10. Gerät nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Geräteelemente (**30**, **42**) bewegt werden, so dass zwischen deren wirksamen Oberflächen eine Relativgeschwindigkeit von zumindest 1,2 Meter pro Sekunde erzeugt wird.

11. Gerät nach einem der Ansprüche 8 bis 10, wobei die Ebenheit der Oberflächen (**46**, **48**) 0,127 Mikrometer oder weniger beträgt.

12. Gerät nach einem der Ansprüche 8 bis 11, wobei die Geräteelemente (**30**, **42**) koaxial zueinander montiert sind und zumindest eines relativ zum anderen rotiert.

13. Gerät nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass diese des weiteren Mittel zum Zuführen von Behandlungsenergie zum Behandlungsdurchlass (**44**) durch die Wand des äußeren der beiden Elemente (**30**, **42**) umfasst.

14. Gerät nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die zum Behandlungsdurchlass zugeführte Energie aus folgender Gruppe ausgewählt ist: elektromagnetische Energie einer Mikrowellenfrequenz, Licht, Röntgenstrahlung, Gammastrahlung, longitudinale Ultraschallschwingungen.

15. Gerät nach einem der Ansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass eine oder beide der Flächen (**46**, **48**) mit einem katalytischen Material beschichtet ist/sind, welches zumindest eine chemische, biochemische und/oder biozide Reaktion im Behandlungsdurchlass (**44**) verstärkt.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

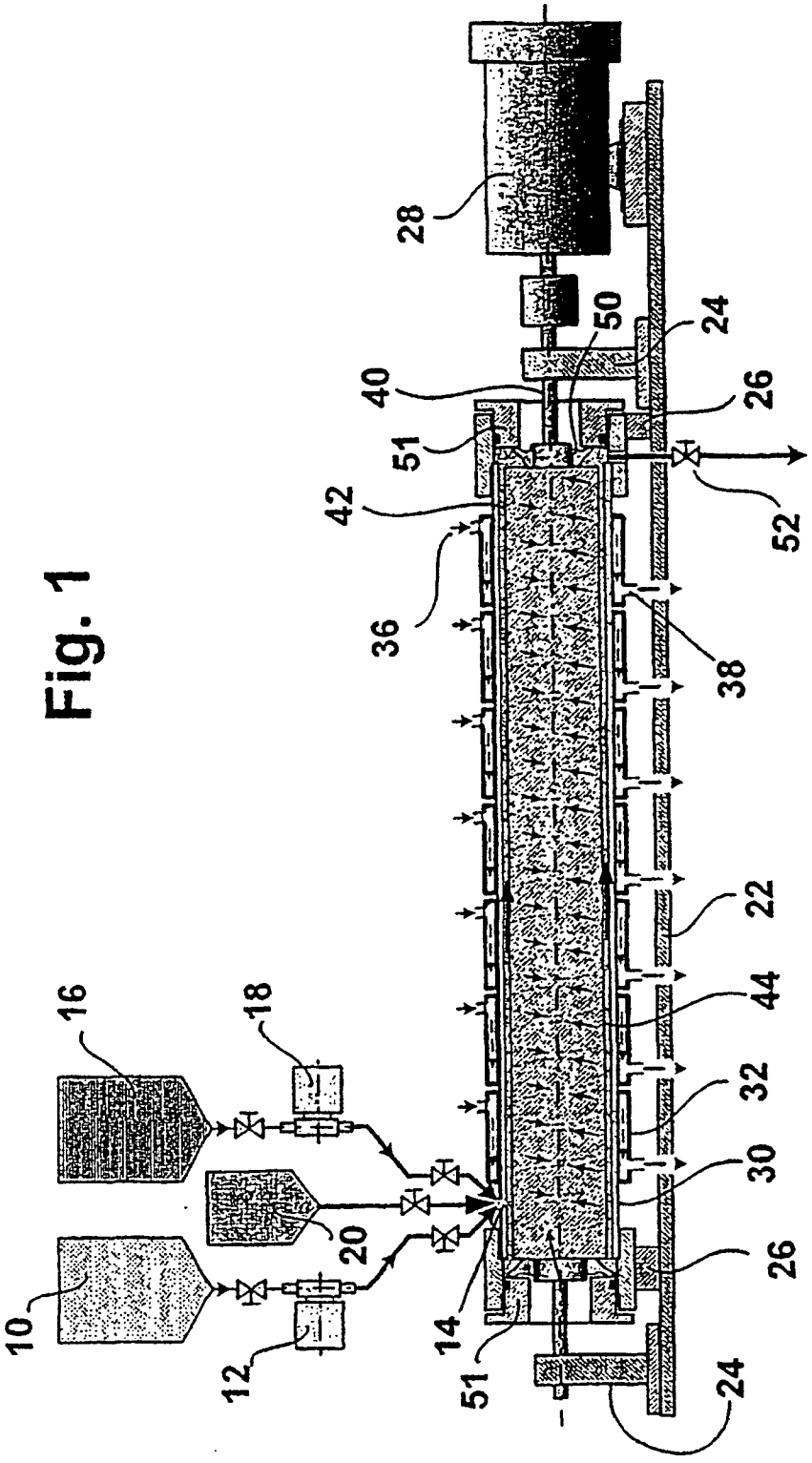


Fig. 2

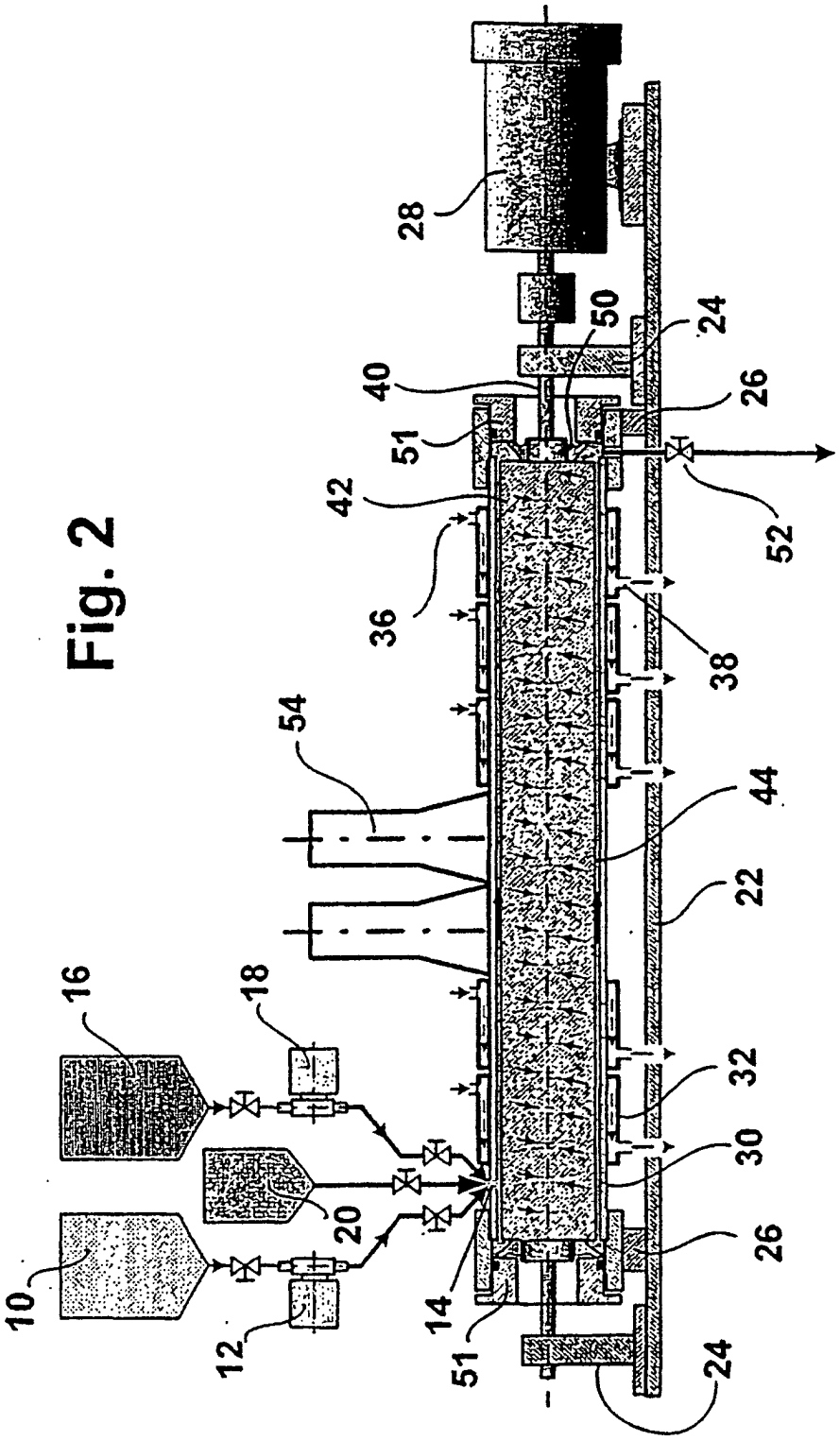


Fig. 3

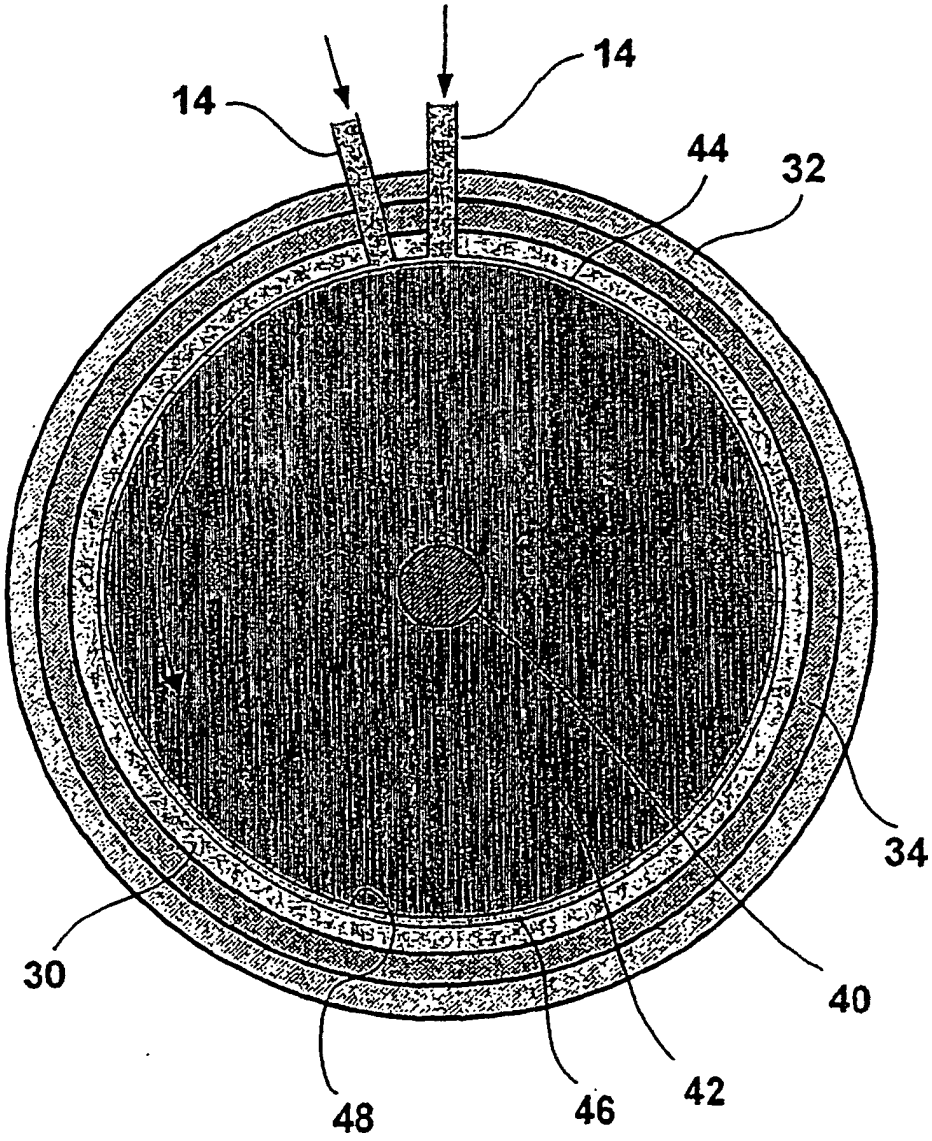


Fig. 4

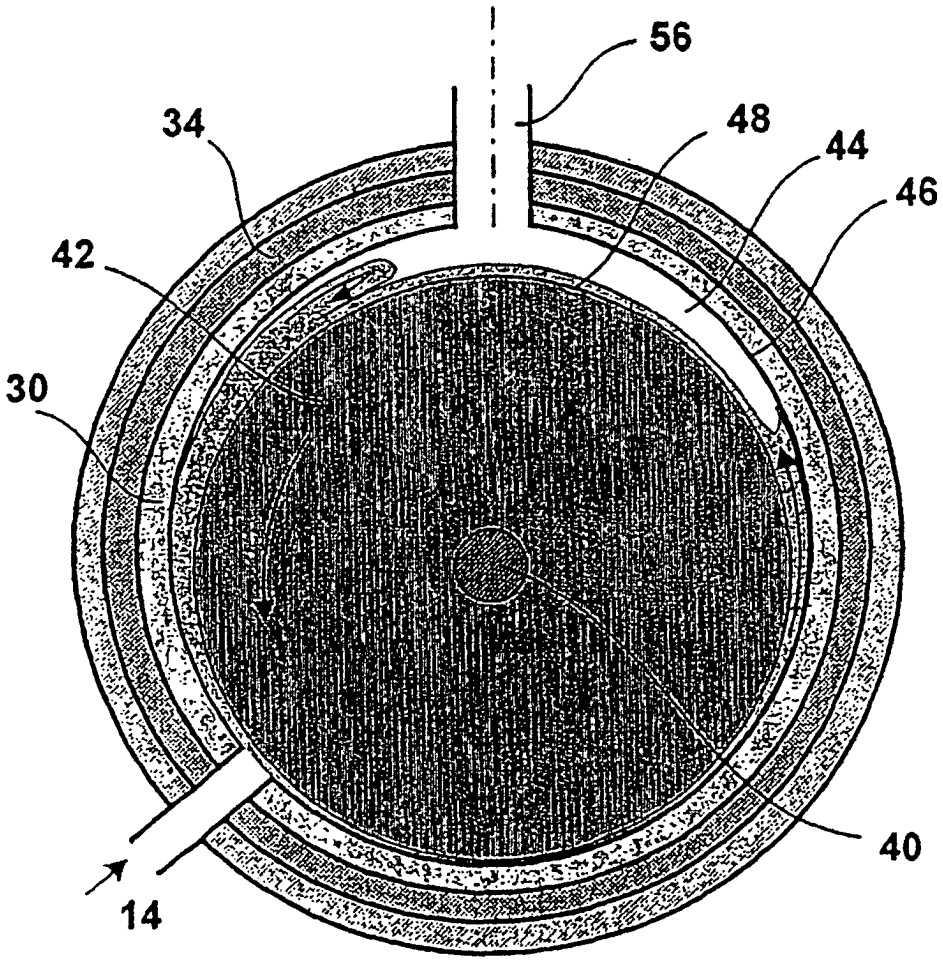


Fig. 5

