

(19)

(10) **AT 521055 B1 2019-10-15**

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 258/2018
 (22) Anmeldetag: 22.08.2018
 (45) Veröffentlicht am: 15.10.2019

(51) Int. Cl.: **D21D 5/02** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
 Redlinger-Pohn, JD, König, J & Radl, S 2016,
 "Fractionation of Suspension of Elongated
 Particles in a Channel: Influence of Particle
 Concentration and Reynolds Number", San
 Francisco, USA / Vereinigte Staaten, 14/11/16 -
 19/11/16
 WO 8806201 A1 (FONGEN SIGURD [NO])
 25. August 1988 (25.08.1988)

(73) Patentinhaber:
 Technische Universität Graz
 8010 Graz (AT)
 Papierholz Austria GmbH
 9413 St. Gertraud (AT)

(72) Erfinder:
 Schmid Thomas
 8043 Graz (AT)
 Radl Stefan
 8041 Graz (AT)
 Redlinger-Pohn Jakob Dominik
 4802 Ebensee (AT)

(74) Vertreter:
 Cunow Patentanwalts KG
 1180 Wien (AT)

(54) **Vorrichtung und Verfahren zum Fraktionieren von längliche Partikel enthaltenden Suspensionen**

(57) Bei einer Vorrichtung (1) zum Fraktionieren einer längliche Partikel enthaltenden Suspension umfassend eine Mehrzahl von im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen (1) sowie wenigstens einen mit einer Einlauföffnung (5) jeder Fraktionierungseinrichtung (1) verbindbaren Verteiler (12), wobei jede der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen (1) einen rohrförmigen wenigstens über einen Teil seiner Länge von einem ringförmigen Kanal (6) umgebenen Durchflussbereich (4) aufweist, weist ein von einer Einlauföffnung abgewandtes Ende des Durchflussbereichs (4) ein im Wesentlichen konisches Verbindungsstück (5) auf, welches konische Verbindungsstück (5) eine gegenüber seinem Einlassende verjüngte, gegebenenfalls in ein Rohr mit vergrößertem Querschnitt mündende Austrittsöffnung (8) besitzt sowie einen am Verbindungsstück (5) angelenkten in dem ringförmigen Kanal (6) mündenden Austritt, welcher in Strömungsrichtung einen in einem im Wesentlichen spitzen Winkel zwischen dem Durchflussbereich (4) und dem ringförmigen Kanal (6) mündenden Fraktionierungsschlitz (7) aufweist, wobei der ringförmige Kanal (6) in einer Sammelkammer (9) mündet.

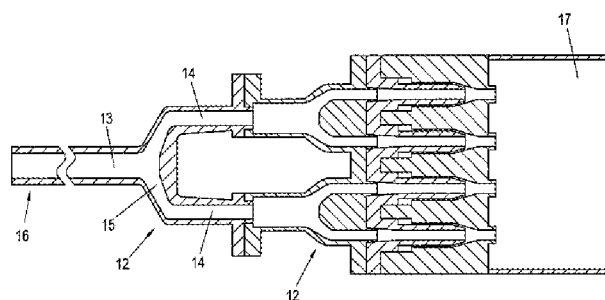


Fig. 2

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zum Fraktionieren einer längliche Partikel enthaltenden Suspension umfassend eine Mehrzahl von im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen sowie wenigstens einen mit einer Einlauföffnung jeder Fraktionierungseinrichtung verbindbaren Verteiler, wobei jede der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen einen rohrförmigen wenigstens über einen Teil seiner Länge von einem ringförmigen Kanal umgebenen Durchflussbereich aufweist sowie ein Verfahren zum Fraktionieren von längliche Partikel enthaltenden Suspensionen, bei welchem die Suspension mittels eines Verteilers in eine im Wesentlichen rohrförmige Fraktionierungseinrichtung eingebracht wird, wobei bei einem Durchströmen des Durchflussbereichs der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung ein Netzwerk der in der Suspension enthaltenen Partikel, die von einem im Wesentlichen ringförmig ausgebildeten Bereich der Suspension mit verringerter Partikelkonzentration umgeben sind, ausgebildet wird, welcher ringförmige Bereich geringerer Partikelkonzentration wenigstens teilweise in einen ringförmigen Kanal abgeleitet wird.

[0002] Fraktionierungsverfahren ebenso wie Vorrichtungen hierfür sind für verschiedene industrielle Produktionen von großer Bedeutung, z.B. für die Herstellung von Baumaterialien oder in der Zellstoff- und Papierindustrie. Insbesondere in der Papierindustrie wird in letzter Zeit immer mehr bereits gebrauchtes Papier rezykliert, um wertvolle Rohstoffe nicht zu verschwenden bzw. native Faserstoffe zu fraktionieren, um deren Eigenschaften zu verändern. Beispielsweise ist Altpapier jedoch von unterschiedlichster Herkunft und je nachdem, wofür das Papier ursprünglich verwendet wurde, ist auch die verwendete Faserfraktion im dem eingesetzten Papier unterschiedlich. Es ist daher erforderlich Fasern verschiedener Längen, die in Papier oder nativen Faserstoffen enthalten sind, entsprechend zu fraktionieren, um sie der jeweils gewünschten Verwertung zuführen zu können.

[0003] Auch bei der Herstellung von Verpackungsmaterialien ist eine Fraktionierung des Einsatzmaterials, welches Partikel, insbesondere Zellulosefasern unterschiedlicher Länge enthält, von wesentlicher Bedeutung, da Verpackungsmaterialien üblicherweise aus mehreren Schichten aus Kraftpapier und Alt-, Druckereipapier oder Schreibpapier bestehen. Auch das Abtrennen von Feinmaterialien bzw. von Fraktionen mit Fasern mit Längen, die kürzer als 200 µm sind, ist von steigender Bedeutung, da insbesondere diese Feinstoffe die Papierherstellung negativ beeinflussen können, da sie die Entwässerungsrate in der Papierherstellung erschweren bzw. verlangsamen.

[0004] Es besteht daher ein Bedürfnis nach einem Verfahren und einer Vorrichtung zur Fraktionierung von Suspensionen die Partikel unterschiedlicher Längen enthalten, wobei diese Fraktionierungsverfahren mehrere Anforderungen erfüllen müssen. Einerseits sollten sie energieeffizient sein und andererseits geringe Investitions- und Betriebskosten aufweisen, umweltverträglich sein, technisch zuverlässig sein und eine hohe Flexibilität der Anpassung an verschiedene Betriebsbedingungen besitzen.

[0005] Gegenwärtig werden Hydrozyklone in der Zellstoff- und Papierindustrie neben ihrer Funktion als Reinigungseinrichtungen auch als Fraktionierungseinrichtungen verwendet, wobei in dem Zyklon eine Trennung aufgrund der Unterschiede in der Absetzgeschwindigkeit der Teilchen erreicht wird. Insbesondere werden Zellstofffasern in Hydrozyklonen aufgrund ihrer Zellwandstärke getrennt, d.h. Hydrozyklone werden verwendet, um beispielsweise Frühholz von Spätholz zu trennen. Allerdings ist bei derartigen Verfahren die Fraktionierungseffizienz sehr stark von der Stoffdichte des Eintrags abhängig, wobei eine niedrige Stoffdichte des Eintrags in einer höheren Fraktionierungseffizienz resultiert.

[0006] Eine andere gegenwärtig bekannte Methode ist die Verwendung von sogenannten Drucksortierern, mit welchen das zu fraktionierende Material gesiebt wird, d.h. die Größe der Siebschlitze bzw. -löcher ist von größter Bedeutung. Weiterhin wird bei einem derartigen Verfahren bzw. einer derartigen Vorrichtung ein Druckimpuls, der ein Blockieren der Sieblöcher

verhindern soll, durch einen Rotor aufgebaut. Die Rotorgeschwindigkeit hat bei einem derartigen Verfahren vor allem einen Einfluss auf den Energieverbrauch. Effizient arbeitende Drucksortierer für Fraktionierungszwecke bringen daher bedeutend höhere Energiekosten mit sich als Drucksortierer die für Sortier- oder Reinigungszwecke eingesetzt werden.

[0007] J.D. Redlinger-Pohn et al, Length-selective separation of cellulose fibres by hydrodynamic fractionation, Chem. Eng. Res. Des. 126 (2017) 54-66 haben bereits das Prinzip der spontanen hydrodynamischen Fraktionierung beschrieben. Bei der hydrodynamischen Fraktionierung wird ein Fasernetzwerk im Inneren eines Stromkanals ausgebildet, bei welchem eine Wandschicht des Stromkanals im Wesentlichen frei von länglichen Fasern bzw. Partikeln bleibt. Enthalten in dieser Zone sind höchstens ganz kurze Partikel oder Feinstoffe. Indem nun ein Teil der Suspension, nämlich jener, der sich entlang der Wandschicht ausbildet, aus dem Flusskanal entfernt wird, beispielsweise durch Anordnen eines Seitenkanals bzw. Zweigkanals wird eine Fraktionierung in einen Teil der Suspension, welcher längere Partikel enthält und eine Phase die überwiegend Flüssigkeit und beispielsweise nur Feinstoffe oder ganz kurze Partikel enthält, erreicht. Dieses Prinzip ist ähnlich der hydrodynamischen Filtration, welche insbesondere in Mikrofluidvorrichtungen angewandt wird, um beispielsweise nicht kugelförmige Zellen von kugelförmigen Teilchen abzutrennen. Dieses an sich stabil arbeitende Verfahren hat jedoch einige Nachteile. Das Abziehen des Flüssigkeitsstroms, der sich im Wandbereich des Stromkanals ausbildet, geschieht durch einen rückwärts gerichteten Kanal, bei nicht optimaler Wahl der Geometrie, welche zwischen dem Hauptstromkanal und dem rückwärts gerichteten Kanal ausgebildet ist, es zu einem Verlegen des rückwärts gerichteten Kanals kommt und eine intermittierende Spülung notwendig ist. Überdies wurde festgestellt, dass die Grenzfläche zwischen dem Inneren des Stromkanals gebildeten Netzwerks aus länglichen Partikeln und der Wandschicht sehr stark von der Reynolds-Zahl in dem Stromkanal abhängt. Bei niedrigen Reynolds-Zahlen bis Reynolds 1.500 wird eine scharfe Grenzfläche erreicht. Wenn die Reynolds-Zahl ansteigt wird die Dicke des am Rand des Stroms aus der partikelhaltigen Suspension gebildeten Ringstroms kleiner. Aufgrund der limitierten Reynoldszahl kann das Verfahren nicht wirtschaftlich eingesetzt werden. Ein weiterer Nachteil des bekannten Verfahrens ist, dass es im Wesentlichen für Mikrofluid-Anwendungen gedacht ist. Eine Vergrößerung einer derartigen Vorrichtung bis zu einem industriellen Maßstab, insbesondere eine Vervielfachung der Durchfluss- bzw. Stromkanäle ebenso wie eine Erhöhung des Gehalts an länglichen Partikeln in der Suspension wurde nicht für möglich gehalten, obwohl das Verfahren eine Mehrzahl von Vorteilen gegenüber anderen bekannten Verfahren, wie insbesondere einen extrem niedrigen Energieverbrauch aufweist, da keinerlei rotierende Teile zur Fraktionierung notwendig sind.

[0008] Die vorliegende Erfindung zielt nun darauf ab, das hydrodynamische Fraktionierungsverfahren sowie eine dafür geeignete Vorrichtung soweit zu verbessern, dass sie einerseits industriell anwendbar wird und auch für Ströme mit Reynolds-Zahlen über 10.000 geeignet ist und überdies Suspensionen eingesetzt werden können, welche einen hohen Gehalt an Partikeln unterschiedlicher Länge aufweisen.

[0009] Zur Lösung dieser Aufgabe ist die erfindungsgemäße Vorrichtung im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass ein von einer Einlauföffnung abgewandtes Ende des Durchflussbereichs ein im Wesentlichen konisches Verbindungsstück aufweist, welches konische Verbindungsstück eine gegenüber seinem Einlassende verjüngte, gegebenenfalls in ein Rohr mit vergrößertem Querschnitt mündende Austrittsöffnung besitzt sowie einen am Verbindungsstück angelenkten in dem ringförmigen Kanal mündenden Austritt, welcher in Strömungsrichtung einen in einem im Wesentlichen spitzen Winkel zwischen dem Durchflussbereich und dem ringförmigen Kanal mündenden Fraktionierungsschlitz aufweist, wobei der ringförmige Kanal in einer Sammelkammer mündet, dass gegebenenfalls an einer Austrittsöffnung von jedem Verteiler eine Fraktionierungseinrichtung oder ein weiterer Verteiler angelenkt ist und dass gegebenenfalls an der Austrittsöffnung von jeder Fraktionierungseinrichtung wenigstens eine weitere Fraktionierungseinrichtung gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines mit einer Spülöffnung versehen Zwischenstücks angeschlossen ist. Indem die Vorrichtung so ausgebildet ist, dass ein von einer Einlauföffnung abgewandtes Ende des Durchflussbereichs ein im Wesentli-

chen konisches Verbindungsstück aufweist, wird eine Fraktionierungsvorrichtung geschaffen, welche im Vergleich zu herkömmlichen Fraktionierungseinrichtungen keine scharfen Ecken bzw. Kanten aufweist, so dass ein Hängenbleiben bzw. Ansammeln von länglichen Partikeln bzw. Fasern, beispielsweise Zellulosefasern, an den Kanten nicht bzw. nur sehr schwer erfolgen kann und somit ein Verlegen des Eingangsbereichs in den ringförmigen Kanal hintangehalten werden kann. Indem, wie dies einer Weiterbildung der vorliegenden Erfindung entspricht, weiterhin das konische Verbindungsstück ein gegenüber seinem Einlassende verjüngte, gegebenenfalls mit einem Rohr mit vergrößertem Querschnitt mündende Austrittsöffnung aufweist, gelingt ein kurzzeitiges Aufbrechen des in der Suspension enthaltenen Fasernetzwerks, wodurch möglicherweise im Fasernetzwerk eingeschlossene Feinstoffe und Kurzfasern durch einen Durchmischungsprozess in den Randbereich des konischen Verbindungsstücks gelangen. Indem der Austrittsbereich so gestaltet ist, dass der ringförmige Kanal im Wesentlichen in einem spitzen Winkel zu dem Durchflussbereich der Fraktionierungseinrichtung angeordnet ist und durch die spezielle Konstruktion des Verbindungsstücks wird ein zuverlässiger Abtransport des Ringstroms, der nur eine geringe Menge an länglichen Partikeln bzw. keinerlei größeren Partikel darin aufweist, mit Sicherheit gewährleistet.

[0010] Indem weiterhin der ringförmige Kanal in einer Sammelkammer mündet, wird ein zuverlässiger Abtransport der Flüssigkeitscharge, welche lediglich Feinstoffe, d.h. längliche Partikel oder beliebig geformte Partikel mit einer Faserlänge von weniger als 200 µm und/oder der oben definierten Kurzfaserfraktion angehörige längliche Partikel, wie z.B. Partikel mit einer vorab definierten Faserlänge von z.B. weniger als 400 µm, 800 µm oder 1000 µm oder kürzer, welche auch als Feinstoffe bezeichnet werden, enthält, gewährleistet.

[0011] Unter länglichen Partikeln wird im vorliegenden Fall jedes Feststoffteilchen gemeint, das eine größere Längs- als Quererstreckung aufweist, wie z.B. Zellulosefasern, Kunststofffasern oder dgl.

[0012] Für eine industrielle Anwendung einer derartigen Vorrichtung ist es erforderlich, dass eine Mehrzahl von derartigen Fraktionierungseinrichtungen hintereinander angeordnet ist, in welchem Fall die Austrittsöffnung von jeder Fraktionierungseinrichtung mit wenigstens einer weiteren Fraktionierungseinrichtung, gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines mit einer Spülöffnung versehenen Zwischenstücks verbunden ist. Bei einer derartigen Ausbildung ist insbesondere die Spülöffnung dahingehend von Bedeutung, dass gegebenenfalls trotz der speziellen Geometrie der Vorrichtung zum Fraktionierung ausgebildete Klumpen aus länglichen Partikeln bzw. hängengebliebene längliche Partikel rasch durch Verdünnen der Suspension aus der Vorrichtung herausgespült werden und einer weiteren Fraktionierung zugeführt werden können. Zudem kann durch die Spülöffnung die Partikelkonzentration eingestellt werden, so dass optimale Bedingungen in allen auch hintereinander angeordneten Fraktioniereinrichtungen garantiert werden können.

[0013] Insbesondere um einen Eintrittsstrom in die Fraktionierungseinrichtung zu richten und insbesondere eine möglichst große Anzahl von Fraktionierungseinrichtungen parallel schalten zu können, ist vor jeder Fraktionierungseinrichtung wenigstens ein Verteiler angeordnet, der, wie dies einer Weiterbildung der Erfindung entspricht, als ein im Wesentlichen wenigstens zweizinkiger gabelförmiger Stromverteiler ausgebildet ist. Mit einem derartigen Stromverteiler gelingt es, den Zufuhrstrom in zwei Fraktionierungseinrichtungen gleichmäßig aufzuteilen, ohne dass eine unerwünschte Ansammlung von länglichen Partikeln in dem Verteiler, insbesondere an dem Gabelungspunkt des Verteilers ausgebildet wird.

[0014] Wenn, wie dies einer Weiterbildung der vorliegenden Erfindung entspricht, die erfindungsgemäße Vorrichtung dahingehend weitergebildet ist, dass ein einem Zulaufrohr des Stromverteilers im Wesentlichen gegenüberliegender und zwischen den Auslaufrohren angeordneter Bodenbereich des Verteilers abgerundet ausgebildet ist, wird eine Anlagerung von länglichen Partikeln aufgrund der Geometrie des Verteilers, insbesondere im Gabelungsbereich mit Sicherheit hintangehalten, so dass Verluste bzw. ein unerwünschtes Verlegen der Vorrichtung ebenfalls vermieden werden. Weiterhin gelingt es mit einer derartigen Ausbildung eines

Verteilers in der Suspension enthaltene Teilchenagglomerate aufzubrechen und somit eine gleichmäßige Verteilung der in der Suspension enthaltenen Partikel in beide Auslaufrohre des Verteilers gleichmäßig zu verteilen. Schließlich gelingt es durch Vorsehen einer Verengung im Bereich der Anlenkung der Auslaufrohre an dem Zulaufrohr eine Beschleunigung der Suspension in diesem Bereich und somit eine Dehnströmung zu erreichen, mit welcher ein neuerliches Agglomerieren der in der Suspension enthaltenen länglichen Partikel mit Sicherheit hintangehalten werden kann.

[0015] Für eine industrielle Ausführung einer derartigen Vorrichtung kann, wie dies einer Weiterbildung der Erfindung entspricht, eine Kaskade von Stromverteilern hintereinander angeordnet sein. Bei einer derartigen Ausbildung ist es selbstverständlich möglich, dass der Querschnitt jedes einzelnen Verteilers sich von dem Querschnitt des vorhergehenden Verteilers dahingehend unterscheidet, dass der Querschnitt des Zulaufrohrs des ersten Verteilers größer bzw. mit größerem Durchmesser ausgebildet ist als jener des jeweils nachfolgenden Verteilers.

[0016] Durch eine derartige Kaskade von Stromverteilern ist es möglich, mehrere 100 bzw. 1.000de Auslauföffnungen auszubilden, welche jeweils mit einer Fraktionierungseinrichtung verbunden sind.

[0017] Um eine möglichst effiziente Abtrennung des im Inneren des Durchflussbereichs ausgebildeten, ringförmigen Flüssigkeitsstroms zu erreichen, ist die Erfindung dahingehend weitergebildet, dass ein Verhältnis von einem Innendurchmesser des Durchflussbereichs zu einer charakteristischen Länge der länglichen Partikel zwischen 1 und 5, vorzugsweise zwischen 2 und 3 gewählt ist. Durch Wahl des Verhältnisses zwischen Innendurchmesser des Durchflussbereichs zur mittleren Faserlänge der länglichen Partikel, wird sichergestellt, dass eine charakteristische Druckverlustkennlinie erreicht wird, die im Wesentlichen kongruent zu jener von Wasser ist.

[0018] Unter charakteristischer Länge der länglichen Partikel wird die längen-gewichtete mittlere Länge, ohne Berücksichtigung der möglicherweise in der Suspension enthaltenen Feinstofffraktion, verstanden, welche typischerweise durch eine Partikellänge von weniger als 200 µm bestimmt ist.

[0019] So hat beispielsweise die Sammelkammer, wie dies einer Weiterbildung der Erfindung entspricht, ein Vielfaches des Volumens des ringförmigen Kanals. Insbesondere ist die Vorrichtung hierbei so ausgebildet, dass die Sammelkammer beispielsweise als ringförmige Sammelkammer an dem ringförmigen Kanal angelenkt ist. Vorzugsweise weist die Sammelkammer eine in Bezug auf einen Gesamtquerschnitt des Durchflussbereichs vergrößerten Querschnittsbereich auf.

[0020] Wie dies einer Weiterbildung der Erfindung entspricht, ist der Fraktionierungsschlitz als nicht unterbrochener Ringspalt ausgebildet, um wiederum ein Hängenbleiben von länglichen Partikeln an in das Innere der Fraktionierungsvorrichtung vorragenden Teilen mit Sicherheit hintanzuhalten. Vorzugsweise ist der Fraktionierungsschlitz hierbei so dimensioniert, dass seine Öffnung zwischen 0,6 mm und 2,6 mm, vorzugsweise etwa 0,6 mm beträgt. Bei einer derartigen Dimensionierung des Fraktionierungsschlitzes kann sichergestellt werden dass der volle Umfang des Durchflussbereichs zu Fraktionierung genutzt werden kann und dieser nicht in nachteiliger Weise verengt wird. Insbesondere kleine Schlitzweiten von 0,6 mm oder größer haben sich in Bezug auf das Trennungsverhalten als besonders bevorzugt erwiesen, da es damit gelingt längliche Partikel, die eine mittlere Partikellänge von 2 bis 3 mm, insbesondere 2,2 mm aufweisen ohne irgendeine Verstopfung bzw. ein Verlegen des ringförmigen Kanals aus der Suspension abzutrennen.

[0021] Um insbesondere den Energieaufwand für die Fraktionierung niedrig zu halten, ist die Vorrichtung so ausgebildet ist, dass ein Verhältnis des Innendurchmessers des Durchflussbereichs zu einer charakteristischen Länge der länglichen Partikel zwischen 1 und 5, vorzugsweise 3 beträgt. Dies entspricht bei einer herkömmlichen Zellstoffsuspension einem Innendurchmesser eines Durchflussbereichs der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung

zwischen 3 mm und 12 mm, vorzugsweise zwischen 4 mm und 10 mm und insbesondere zwischen 6 mm und 8 mm. Ein derartiger Innendurchmesser wird in Übereinstimmung mit dem Flüssigkeitsstrom gewählt, wobei sich ein Druckabfall der längliche Partikel enthaltenden Suspension mit einem Druckabfall von Wasser unter gleichen Prozessbedingungen übereinstimmend einstellt.

[0022] Mit einer derartigen Geometrie der Vorrichtung ist es nun überraschenderweise gelungen, ein Verlegen eines im Wesentlichen konischen Verbindungsstücks zu vermeiden, wie dies im Stand der Technik beschrieben wurde, wo stattdessen vorgeschlagen wurde, anstelle eines konischen Verbindungsstücks T-Stücke zu verwenden.

[0023] Eine weitere Verringerung der Tendenz, das im Wesentlichen konische Verbindungsstück durch hängengebliebene längliche Partikel zu verlegen, könnte dadurch erzielt werden, dass die Vorrichtung dahingehend weitergebildet ist, dass das im Wesentlichen konische Verbindungsstück einen einen Radius aufweisenden Kegelmantel aufweist. Indem das im Wesentlichen konische Verbindungsstück eine Krümmung bzw. einen Radius aufweist, insbesondere eine Krümmung des Kegelmantels nach innen, wird eine Ausbildung geschaffen, welche keinerlei scharfe Ecken oder Kanten aufweist, so dass ein Verlegen und insbesondere ein Hängengeblieben von länglichen Partikeln, beispielsweise Zellulosefasern, im Inneren der Vorrichtung nahezu unmöglich wird und somit ein stabiler und energiesparender Betrieb der Vorrichtung erreicht werden kann.

[0024] Ein sicheres Abgleiten von mitgerissenen länglichen Partikeln von den Wänden der Vorrichtung wird gemäß einer Weiterbildung der Erfindung dadurch erreicht, dass die Verbindungen des im Wesentlichen konischen Verbindungsstücks mit den benachbarten Elementen der Fraktionierungseinrichtung, insbesondere dem Durchflussbereich, dem ringförmigen Kanal und dem Zwischenstück abgerundet ausgebildet sind. Durch die abgerundete Ausbildung von sämtlichen Verbindungsteilen bzw. auch des spitzen Winkels der Anlenkung des ringförmigen Kanals an das konische Verbindungsstück wird ein Gleiten der länglichen Partikel an den einzelnen Teilen der Vorrichtung gewährleistet und ein Verlegen der Vorrichtung durch hängengebliebene Partikel nahezu unmöglich gemacht. Selbstverständlich wird aufgrund der gewählten geometrischen Ausgestaltung der Vorrichtung auch eine Ablagerung von anderen gegebenenfalls in der längliche Partikel enthaltenden Suspension enthaltenen Teilchen mit Sicherheit hintangehalten.

[0025] Überraschenderweise konnte gezeigt werden, dass durch die Wahl der Prozessbedingungen, wie die hohe im Durchflussbereich vorliegende Reynoldszahl, d.h. der hohen im Durchflussbereich vorliegenden Strömungsgeschwindigkeit und insbesondere der Geometrie der Vorrichtung, wie die Anordnung des nach rückwärts gerichteten ringförmigen Kanals und der Geometrie des Fraktionierungsschlitzes ein Verlegen des konischen Verbindungsstücks aufgrund der Ausbildung eines sehr hohen Geschwindigkeitsgradienten an der Wand des Durchflussbereichs, durch welchen die länglichen Partikel sicher in Strömungsrichtung mitgerissen werden, mit Sicherheit hintangehalten werden kann.

[0026] Mit einer derartigen Fraktionierungseinrichtung gelingt es nun überraschenderweise, eine präzise Fraktionierung eines längliche Partikel enthaltenden Flüssigkeitsstroms zu erreichen, mit welcher auch Suspensionen, die eine höhere Konzentration an länglichen Partikeln aufweisen, sicher getrennt werden können.

[0027] Darüber hinaus wird durch eine höhere Reynoldszahl eine höhere Flussgeschwindigkeit bewirkt, was es ermöglicht, den Durchsatz der eingebrachten länglichen Partikel enthaltenden Suspension zu erhöhen, wodurch es gelingt, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, die bei kompakten Abmessungen extrem energieeffizient arbeiten.

[0028] Die Erfindung zielt weiterhin darauf ab, ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, mit welchem es gelingt, Suspensionen derart zu verarbeiten, dass auch aus Strömen mit einer Reynoldszahl von größer 10.000 die enthaltenen länglichen Partikel abgetrennt werden können.

[0029] Ein Verfahren zum Fraktionieren einer längliche Partikel enthaltenden Suspension ist

hierbei im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass die im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung mit einer Reynolds-Zahl von über 10.000 betrieben wird, und dass ein mit länglichen Partikeln angereicherter Strom der Suspension durch eine Austrittsöffnung entweder ausgetragen wird oder gegebenenfalls in wenigstens eine weitere Fraktionierungseinrichtung, gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines mit einer Spülöffnung versehen Zwischenstücks, eingebracht wird.

[0030] Mit einer derartigen Verfahrensführung gelingt es, die Blockierungstendenz im Inneren der Vorrichtung so weit wie möglich abzusenken, dass nur im Inneren eines Durchflussbereichs eine hohe Konzentration der länglichen Partikel erreicht wird, was eine Tendenz zum Blockieren der Vorrichtung weiter herabsetzt. Gleichzeitig wird ein Ringstrom im Inneren des Durchflussbereichs generiert. Hierbei gelingt es selbst bei den hohen Reynoldszahlen von über 10.000, dass ein dünner wandnaher Flüssigkeitsfilm bzw. ein ausgedünnter Randbereich erhalten bleibt, so dass eine sichere Abtrennung von feinem Material aus der Suspension ohne gleichzeitig eine übermäßige Abtrennung von länglichen Partikeln aus dem Durchflussbereich zu generieren, gewährleistet werden kann. Wenn überdies das im Wesentlichen konische Verbindungsstück nur eine geringe Reduktionsrate, d.h. einen geringen Konus aufweist, wird die Tendenz zum Verlegen desselben weiter herabgesetzt.

[0031] Hierbei ist eine Verfahrensführung, bei welcher Strömungsverhältnisse in der Durchflusseinrichtung ausgebildet werden, mit welcher innerhalb des Betriebs Reynoldszahlen von über 10.000 aufrechterhalten werden können, extrem überraschend, da der Stand der Technik mit ähnlich konzipierten Vorrichtungen lediglich Reynoldszahlen im Bereich von maximal 4.000 handhaben konnte. Bei höheren Reynolds-Zahlen wurde im Stand der Technik der ringförmige Strom derart zerstört, dass eine Abtrennung von Flüssigkeit mit darin enthaltenem feinem Material nicht mehr möglich war. Lediglich durch die Modifikation der Vorrichtung, in welcher lediglich abgerundete Verbindungen vorliegenden und durch gezielte Wahl des Durchmesser zur mittleren Partikellänge gelingt es überraschenderweise, auch Suspensionen mit höheren Feststoffgehalten zu verarbeiten und somit im Inneren der Vorrichtung Strömungen mit Reynolds-Zahlen von über 10.000 sicher und zuverlässig zu verarbeiten.

[0032] Wenn im Inneren der Vorrichtung die Reynoldszahl der Suspension in der Fraktionierungseinrichtung zwischen 15.000 und 25.000 gewählt wird, wie dies einer Weiterbildung der Erfindung entspricht, gelingt es nicht nur, Suspensionen mit einer höheren Partikelkonzentration in dem erfindungsgemäßen Verfahren zu fraktionieren sondern insbesondere den Durchsatz durch die Vorrichtung so weit zu erhöhen, dass die Vorrichtung und das Verfahren im industriellen Maßstab eingesetzt werden können.

[0033] Gemäß einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dieses hierbei so gewählt, dass die längliche Partikel enthaltende Suspension für typische Fasern mit einer Konzentration der länglichen Partikel in der Flüssigkeit zwischen 0,5 % und 2 %, insbesondere etwa 1 % in den Durchflussbereich eingebracht wird. Mit einer derartigen Verfahrensführung, in welcher der Durchmesser, insbesondere wird unter Durchmesser hier der Innendurchmesser verstanden, des Durchflussbereichs, wie oben beschrieben, gewählt wird, gelingt es, den Bereich der offenen Oberfläche gegenüber herkömmlichen Vorrichtungen drastisch zu reduzieren, insbesondere beispielsweise von um einen Faktor von etwa 300. Gleichzeitig kann mit einer derartigen Verfahrensführung im industriellen Maßstab eine bedeutend geringere Anzahl von Fraktionierungseinrichtungen eingesetzt werden als dies im Stand der Technik beschrieben wurde. Dies gelingt insbesondere durch die Wahl eines geeigneten Rohrdurchmessers in Relation zur Faserlänge sowie einer Erhöhung der Konzentration der mit dem Verfahren und der Vorrichtung gemäß der Erfindung getrennten Suspension auf sogar mehr als 1 % und durch Erhöhung der Reynolds-Zahl in der in der Vorrichtung aufrecht erhaltenen Strömung auf Werte von über 10.000, wenn nicht sogar auf über 100.000. Die Reynolds-Zahl wird mit der Formel $Re = vL/\nu$ berechnet, wobei v die Strömungsgeschwindigkeit, L die charakteristische Länge des Systems, d.h. des Durchflussbereichs der rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung ist, und ν die kinematische Viskosität der strömenden Flüssigkeit bedeutet. Mit einer derartigen Verfahrensführung gelingt es, das Strömungsregime unabhängig von der Reynoldszahl stabil zu halten.

[0034] Weiterhin gelingt es mit einer derartigen Verfahrensführung, eine im Wesentlichen laminare Strömung der länglichen Partikel enthaltenden Suspension im Inneren des Systems aufrecht zu erhalten, wodurch die Tendenz eines Verlegens der Vorrichtung mit einer Ansammlung von länglichen Partikeln weiter herabgesetzt wird und insbesondere der Energiebedarf für das Durchleiten weiter verringert werden kann.

[0035] Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung wird das Verfahren so ausgebildet, dass die Suspension durch eine Mehrzahl, insbesondere eine Kaskade von Verteilern in eine einer Zahl der Austragsöffnungen der Verteiler entsprechende Mehrzahl von Fraktionierungseinrichtungen eingebracht wird. Mit einer derartigen Verfahrensführung gelingt die großtechnische Trennung von Suspensionen, die längliche Partikel enthalten, rasch und unkompliziert und insbesondere unter geringstmöglichem Energieaufwand.

[0036] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. In diesen zeigen

[0037] Fig. 1 einen Schnitt durch eine schematische Darstellung einer im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung gemäß der Erfindung,

[0038] Fig. 2 einen Schnitt durch ein Mehrkanalmodul mit Verteilern um vier im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen gemäß der Erfindung.

[0039] In Fig. 1 ist ein Schnitt durch eine im Wesentlichen rohrförmige Fraktionierungseinrichtung 1 von längliche Partikel enthaltenden Suspensionen dargestellt, in welcher eine Suspension bei 2 mit der Strömungsrichtung entsprechend dem Pfeil 3 in einen Durchflussbereich 4 eingetragen wird. Ein Durchmesser bzw. Innendurchmesser des Durchflussbereichs 4 der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung 1 weist vorzugsweise ein Verhältnis des Innendurchmessers des Durchflussbereichs 4 zu mittlerer Partikellänge zwischen 1 und 5, vorzugsweise 3 auf. Ein derartiges Verhältnis entspricht bei einer herkömmlichen Zellstoffsuspension einem Innendurchmesser des Durchflussbereichs 4 zwischen 3 mm und 12 mm, vorzugsweise zwischen 4 mm und 10 mm und insbesondere zwischen 6 mm und 8 mm. Am Austritts-ende des Durchflussbereichs 4 ist ein im Wesentlichen konisches Verbindungsstück 5 angeordnet, von welchem konischen Verbindungsstück 5 ein ringförmiger Kanal 6 abzweigt. Der ringförmige Kanal 6 schließt hierbei einen spitzen Winkel mit dem Durchflussbereich 4 ein, wobei das konische Verbindungsstück 5 so ausgebildet ist, dass die Innenwände desselben geringfügig gekrümmt ausgebildet sind, um ein Hängenbleiben von in der Suspension enthaltenen länglichen Partikeln jedenfalls hintanzuhalten.

[0040] An der Mündung des ringförmigen Kanals 6 wird ein Fraktionierungsschlitz 7 ausgebildet, dessen Schlitzweite so gewählt ist, dass sie durch die in der Suspension enthaltenen länglichen Partikel im Wesentlichen nicht verlegt wird, jedoch so gering ist, um ein übermäßiges Mitreißen von länglichen Partikeln mit Sicherheit hintanzuhalten. Vorzugsweise ist eine Schlitzweite zwischen 0,6 und 2,6 mm gewählt, wobei Schlitzweiten von etwa 0,6 mm bevorzugt sind. Eine Austragsöffnung 8 des Durchflussbereichs 4 mündet in einer Sammelkammer 9, welche Sammelkammer 9 beispielsweise als Trog ausgebildet sein kann. Anstelle einer Sammelkammer 9 kann die Vorrichtung jedoch auch so ausgebildet sein, dass die Sammelkammer 9 als Zwischenstück ausgebildet ist, an welchem Zwischenstück ein weiterer Durchflussbereich 4 angelenkt ist. Um in diesem Durchflussbereich der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung 1 ein Hängenbleiben von im Wesentlichen länglichen Partikeln mit Sicherheit hintanzuhalten oder die Suspension auf die für sie optimale Konzentration zur Fraktionierung zu verdünnen, kann, wie dies in Fig. 1 dargestellt ist, eine Spülöffnung bzw. ein Spülventil 10 vorgesehen sein.

[0041] Der ringförmige Kanal 6, mit welchem der in dem Durchflussbereich 4 ausgebildete Ringstrom aus im Wesentlichen keine der vorab definierten Langfaserfraktion zugehörigen Partikeln enthaltenden Flüssigkeit abgeleitet wird, mündet seinerseits in einer Sammelkammer 11, welche Sammelkammer 11 einen Querschnitt aufweist, der einen in Bezug auf einen Gesamtquerschnitt des Durchflussbereichs 4 vergrößert ist, wodurch ein laminares bzw. span-

nungsfreies Einströmen der abgezogenen Flüssigkeit in die Sammelkammer 11 gewährleistet wird und über den gesamten Umfang des ringförmigen Kanals 6 ein gleichmäßiges Abziehen der Flüssigkeit sichergestellt werden kann.

[0042] Die Sammelkammer 11 weist ein Volumen auf, welches jenes des ringförmigen Kanals 6 um ein Vielfaches übersteigt.

[0043] Bei Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird nun eine Suspension bei 2 in den Durchflussbereich 4 eingetragen. In dessen Inneren bildet sich nun ein Ringstrom aus, dessen an der Rohrwandung des Durchflussbereichs 4 fließende Flüssigkeit nahezu keine Fasern bzw. länglichen Partikel enthält oder höchstens Feinstoffe mit extrem kleiner Länge und in dessen Zentrum im Wesentlichen ein mit Partikeln angereicherter Strom ausgebildet wird, wobei die Konzentration der Partikel im Inneren bzw. im Mittelbereich des Durchflussbereichs 4 bedeutend höher ist als im Bereich seiner Rohrwandung. Dieser gering konzentrierte Suspensionsstrom wird an dem Austragsende aus dem Durchflussbereich 4 in das konische Verbindungsstück 5 eingetragen, in welchem aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser der einzelnen Kanäle und den in der Vorrichtungen herrschenden Druck- bzw. Sogverhältnissen der ringförmige Flüssigkeitsstrom nahezu quantitativ und ohne Rückvermischung in den ringförmigen Kanal 6 abgezogen bzw. austragen wird und in der Folge in die Sammelkammer 11 eingebracht wird. Gleichzeitig wird der Strom, welcher eine erhöhte Konzentration an längeren Teilchen aufweist, bei der Austrittsöffnung 8 entweder in einen Sammler 17 eingebracht oder aber einer weiteren Fraktionierungseinrichtung zugeführt.

[0044] Um nunmehr diese kleinbauende Vorrichtung für industrielle Anwendungen geeignet zu machen, ist gemäß der vorliegenden Erfindung jede Fraktionierungseinrichtung 1 mit einem im Wesentlichen wenigstens zweizinkigen gabelförmigen Verteiler 12, insbesondere Stromverteiler 12 verbunden, wie dies in Fig. 2 gezeigt ist. In einem derartigen Stromverteiler 12 ist ein einem Zulaufrohr 13 gegenüberliegender, zwischen den Auslaufrohren 14 angeordneter Bodenbereich 15 des Verteilers 12 abgerundet ausgebildet. Durch eine derartige abgerundete Ausbildung des Bodenbereichs 15 des Verteilers 12 wird auch im Verteiler 12 sichergestellt, dass dieser sich nicht durch hängengebliebene längliche Partikel bzw. Partikelklumpen verlegt und insbesondere ein gleichmäßiger Zustrom und eine gleichmäßige Verteilung der Suspension in beide Auslaufrohre 14 gewährleistet wird. Wie dies weiterhin in Fig. 2 ersichtlich ist, ist für einen Einsatz im Industriemaßstab eine Kaskade von Verteilern 12 hintereinander angeordnet, um eine Vervielfältigung der Anzahl der Fraktionierungseinrichtungen 1, welche durch ein und denselben Zulauf gespeist werden, zu erreichen. Der Zulauf ist in Fig. 2 schematisch mit 16 dargestellt.

[0045] Bei der Darstellung von Fig. 2 sind Fraktionierungseinrichtungen 1 im Wesentlichen wie in Fig. 1 abgebildet, ausgebildet, wobei ein weiteres Eingehen auf diese Fraktionierungseinrichtungen 1 hier nicht erforderlich erscheint. Bei der Darstellung in Fig. 2 sind die vier Fraktionierungseinrichtungen 1 mit einem gemeinsamen Sammelbecken 17 verbunden, in welches die mit länglichen Partikeln angereicherte Suspension ausgetragen wird. Wenn eine weitere Vergleichmäßigung der Teilchengröße der in der Suspension enthaltenen Teilchen gewünscht wird, kann eine weitere Reihe von im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen an der ersten Reihe von Fraktionierungseinrichtungen 1 angelenkt sein und so weitere Chargen an kleinen Teilchen bzw. Feinstoffen aus der Suspension ausgetragen werden.

[0046] In dem industriellen Einsatz kann eine derartige Vorrichtung mehr als 1.000 einzelne Fraktionierungseinrichtungen 1 aufweisen bzw. beliebig vergrößert werden.

[0047] Mit einer derartigen Vorrichtung und einem derartigen Verfahren ist insbesondere die Abtrennung von einer in Bezug auf die Partikelgröße homogenen Charge von beispielsweise Zellulosefasern aus einer Zellulosefasern unterschiedlicher Länge enthaltenden Suspension, beispielsweise aus Altpapier industriell ohne Einsatz von übermäßig viel Energie, wie beispielsweise bei Drucksortierern nahezu ohne Materialverlust möglich.

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zum Fraktionieren einer längliche Partikel enthaltenden Suspension umfassend eine Mehrzahl von im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen (1) sowie wenigstens einen mit einer Einlauföffnung (5) jeder Fraktionierungseinrichtung (1) verbindbaren Verteiler (12), wobei jede der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtungen (1) einen rohrförmigen wenigstens über einen Teil seiner Länge von einem ringförmigen Kanal (6) umgebenen Durchflussbereich (4) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein von einer Einlauföffnung abgewandtes Ende des Durchflussbereichs (4) ein im Wesentlichen konisches Verbindungsstück (5) aufweist, welches konische Verbindungsstück (5) eine gegenüber seinem Einlassende verjüngte, gegebenenfalls in ein Rohr mit vergrößertem Querschnitt mündende Austrittsöffnung (8) besitzt sowie einen am Verbindungsstück (5) angelenkten in dem ringförmigen Kanal (6) mündenden Austritt, welcher in Strömungsrichtung einen in einem im Wesentlichen spitzen Winkel zwischen dem Durchflussbereich (4) und dem ringförmigen Kanal (6) mündenden Fraktionierungsschlitz (7) aufweist, wobei der ringförmige Kanal (6) in einer Sammelkammer (9) mündet, dass gegebenenfalls an einer Austrittsöffnung von jedem Verteiler (12) eine Fraktionierungseinrichtung (1) oder ein weiterer Verteiler (12) angelenkt ist und dass gegebenenfalls an der Austrittsöffnung von jeder Fraktionierungseinrichtung (1) wenigstens eine weitere Fraktionierungseinrichtung (1) gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines mit einer Spülöffnung (10) versehen Zwischenstücks angeschlossen ist.
2. Vorrichtung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Verteiler (12) als ein im Wesentlichen wenigstens zweizinkiger gabelförmiger Stromverteiler (12) ausgebildet ist.
3. Vorrichtung (1) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein einem Zulaufrohr (13) des Stromverteilers (12) im Wesentlichen gegenüberliegender und zwischen den Auslaufrohren (14) angeordneter Bodenbereich (15) des Verteilers abgerundet ausgebildet ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Verengung im Bereich einer Anlenkung der Auslaufrohre (14) an dem Zulaufrohr (13) ausgebildet ist.
5. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Kaskade von Stromverteilern (12) hintereinander angeordnet ist.
6. Vorrichtung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Verhältnis von einem Innendurchmesser des Durchflussbereichs (4) zu einer charakteristischen Länge der länglichen Partikel zwischen 1 und 5, vorzugsweise zwischen 2 und 3 gewählt ist.
7. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Fraktionierungsschlitz (7) als nicht unterbrochener Ringspalt ausgebildet ist.
8. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sammelkammer (9) an dem ringförmigen Kanal (6) angelenkt ist und dass ein Volumen der Sammelkammer (9) ein Vielfaches eines Volumens des ringförmigen Kanals (6) beträgt.
9. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das im Wesentlichen konische Verbindungsstück (5) einen einen Radius aufweisenden Kegelmantel aufweist.
10. Vorrichtung (1) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verbindungsbereiche des im Wesentlichen konischen Verbindungsstücks (5) mit den benachbarten Elementen der Fraktionierungseinrichtung (1), insbesondere dem Durchflussbereich (4), dem ringförmigen Kanal (6) und dem Zwischenstück abgerundet ausgebildet sind.
11. Verfahren zum Fraktionieren von längliche Partikel enthaltenden Suspensionen, bei welchem die Suspension mittels eines Verteilers (12) in eine im Wesentlichen rohrförmige Fraktionierungseinrichtung (1) eingebracht wird, wobei bei einem Durchströmen des Durchflussbereichs (4) der im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung (1) ein Netzwerk der in der Suspension enthaltenen Partikel, die von einem im Wesentlichen ring-

förmig ausgebildeten Bereich der Suspension mit mit verringerter Partikelkonzentration umgeben sind, ausgebildet wird, welcher Bereich der Suspension mit verringerter Partikelkonzentration wenigstens teilweise in einen ringförmigen Kanal (6) abgeleitet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass die im Wesentlichen rohrförmigen Fraktionierungseinrichtung (1) mit Reynolds-Zahl von über 10.000 betrieben wird, und dass ein mit länglichen Partikeln angereicherter Strom der Suspension durch eine Austrittsöffnung entweder ausgetragen wird oder gegebenenfalls in wenigstens eine weitere Fraktionierungseinrichtung (4) gegebenenfalls unter Zwischenschaltung eines mit einer Spülöffnung (10) versehen Zwischenstücks eingebracht wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die längliche Partikel enthaltende Suspension mit einer Konzentration der länglichen Partikel in der Flüssigkeit zwischen 0,5 % und 2 %, insbesondere etwa 1 % eingebracht wird.
13. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Reynoldszahl der Suspension in der Fraktionierungseinrichtung (4) zwischen 15.000 und 25.000 gewählt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Inneren von jeder Fraktionierungseinrichtung (4) eine im Wesentlichen laminare Strömung ausgebildet wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Suspension durch eine Mehrzahl, insbesondere eine Kaskade von Verteilern in eine einer Zahl der Austragsöffnungen der Verteiler entsprechende Mehrzahl von Fraktionierungseinrichtungen (4) eingebracht wird.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

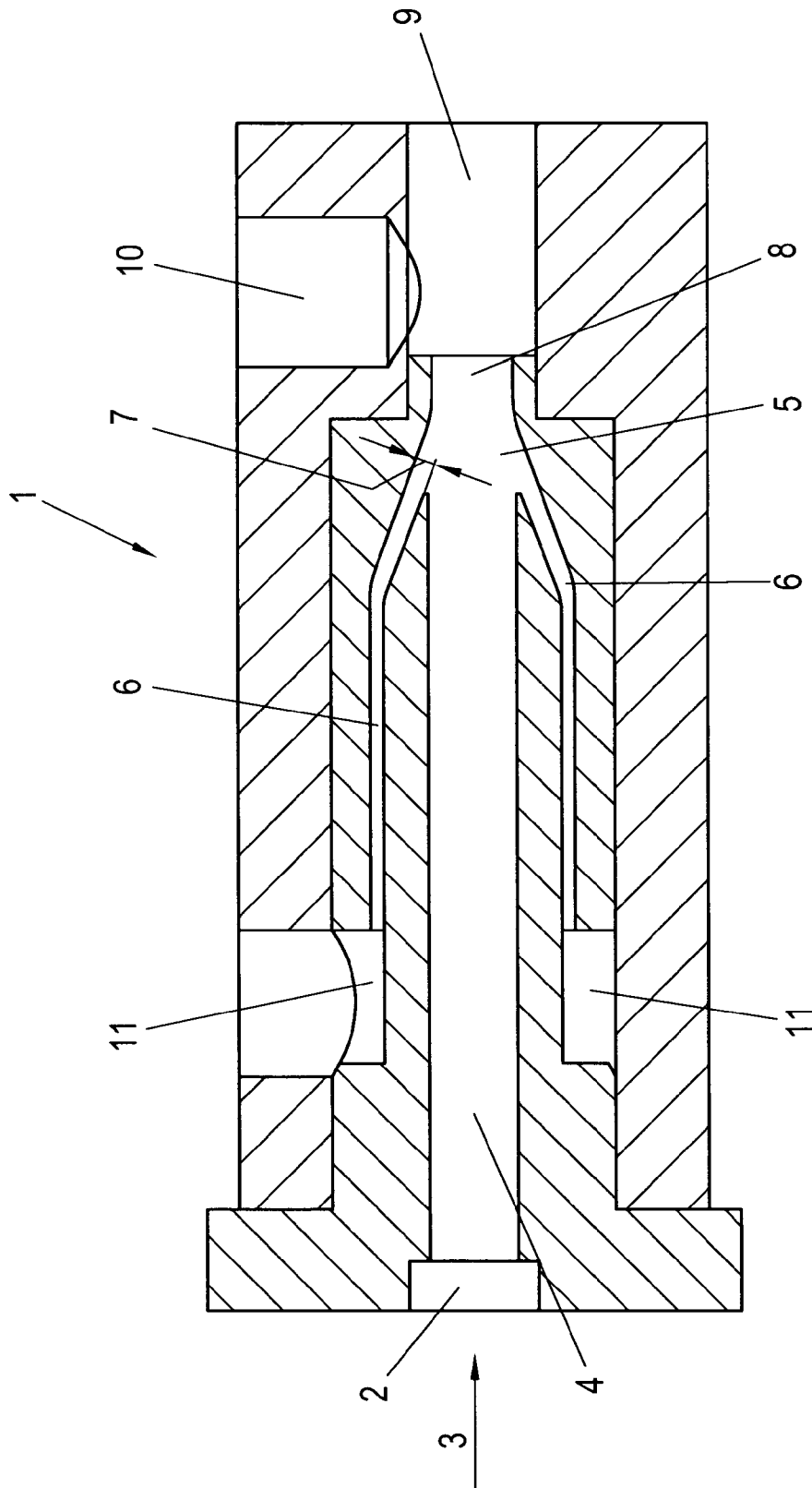


Fig. 1

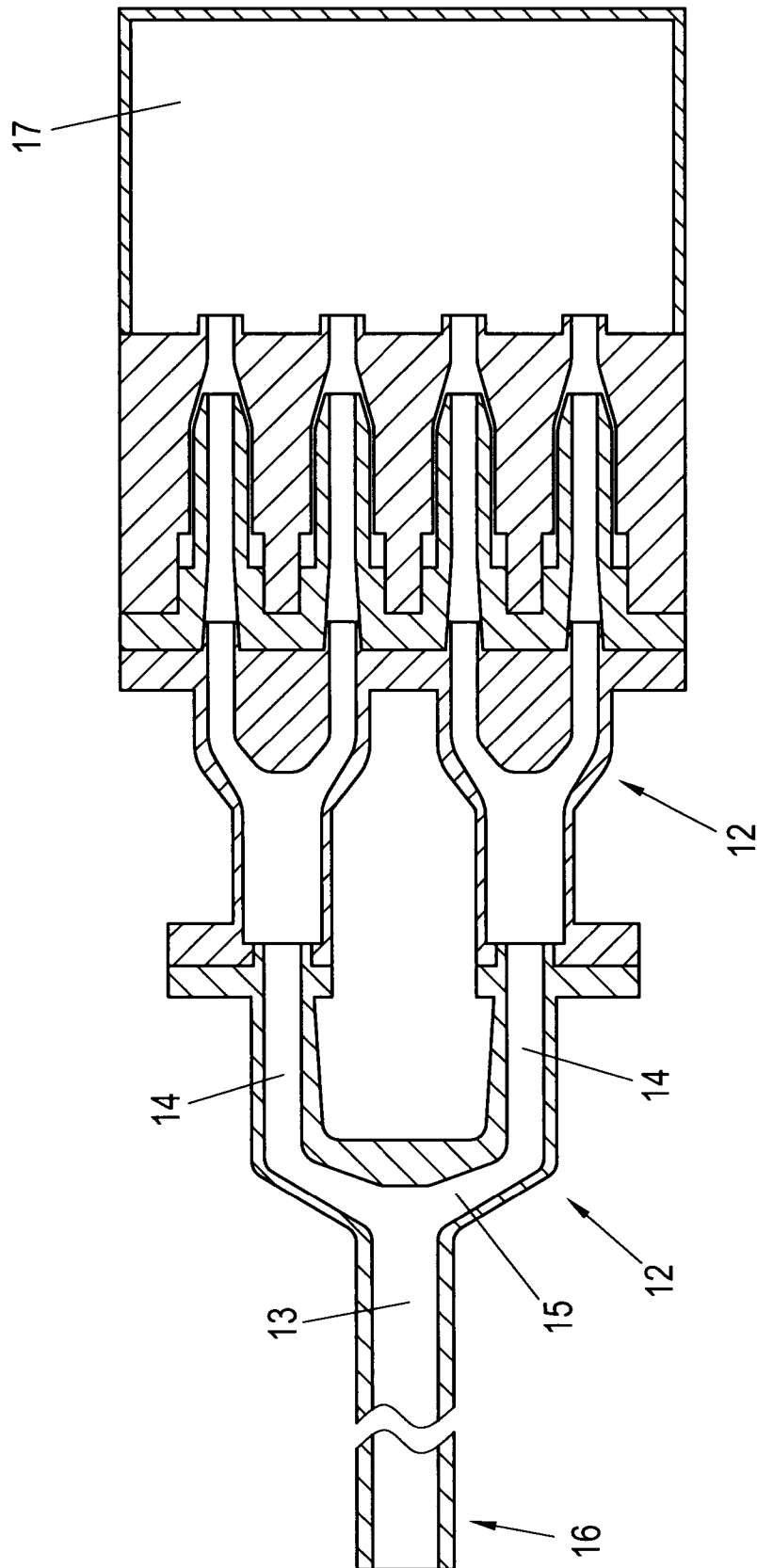


Fig. 2