

Vorrichtung und Verfahren zur Gasdispersion

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Dispersion von Gas in eine Flüssigkeit.

5

Die Dispersion von Gasen in flüssigen Medien findet in der chemischen Industrie beispielsweise bei Hydrierungen, Chlorierungen oder Oxidationen eine breite Anwendung. Bei Fermentationen und der aeroben Abwasserreinigung ist der Sauerstoffeintrag von wesentlicher Bedeutung. Auch bei der Schaumerzeugung findet eine Dispersion von Gas
10 in einem flüssigen Medium statt. In der Lebensmitteltechnik werden Gase in hochviskosen Flüssigkeiten dispergiert, um z.B. Cremes, Schaumgummi oder Schokolade mit luftgefüllter poröser Struktur herzustellen (z.B. beschrieben in WO02/13618A2).

Das Ziel einer Gasdispersion ist der Eintrag von Gas in ein Fluid, vorzugsweise in Form
15 von möglichst kleinen Bläschen, um eine möglichst große Grenzfläche zwischen gasförmiger und flüssiger Phase herzustellen. Je größer die Phasengrenzfläche ist, desto höher ist nach dem ersten Fick'schen Gesetz der Stofftransport zwischen Gas und Flüssigkeit.

20 Die Gasdispersion erfolgt dabei häufig in zwei Schritten:

1. Einbringen des Gases in die Flüssigkeit in Form von Blasen
2. Zerteilen der Blasen

Die Art des Einbringens, im Allgemeinen über Düsen, Fritten oder Lochplatten, bestimmt
25 die Größenverteilung der Primärblasen. In dem Artikel „*Gasdispersion in Flüssigkeiten durch Düsen bei hohen Durchsätzen*“ aus Chemie-Ingenieur-Technik, 28. Jahrgang 1956, Nr 6, Seiten 389 – 395 wird beispielsweise beschrieben, welchen Einfluss Parameter wie Düsenweite, Gasdurchsatz, Viskosität und Grenzflächenspannung auf die Größenverteilung von Gasblasen, die beim Hineinschießen eines Gasstrahls in eine Flüssigkeit aus einer Düse
30 entstehen, haben.

Das Zerteilen der Blasen kann beispielsweise mittels eines dynamischen oder statischen Mischers erfolgen. Während bei dynamischen Mixern die Homogenisierung einer Mischung durch bewegte Organe wie z.B. Rührer erreicht wird, wird bei statischen

Mischern die Strömungsenergie des Fluids ausgenutzt: eine Fördereinheit (z.B. eine Pumpe) drückt die Flüssigkeit durch ein mit statischen Mischereinbauten versehenes Rohr, wobei die der Hauptströmungsachse folgende Flüssigkeit in Teilströme aufgeteilt wird, die je nach Art der Einbauten gedehnt, geschert, miteinander verwirbelt und vermischt werden. Der Vorteil
5 bei der Verwendung von statischen Mischern liegt u. a. darin, dass keine beweglichen Teile vorhanden sind.

Einen Überblick über verschiedene Typen von statischen Mischern gibt zum Beispiel der Artikel „*Statische Mischer und ihre Anwendungen*“, M. H. Pahl und E. Muschelknautz,
10 Chem.-Ing.-Techn. 52 (1980) Nr. 4, S. 285-291. Als Beispiele für statische Mischer seien SMX-Mischer (vgl. Patentschrift US4062524) oder SMXL-Mischer (vgl. z.B. Patentschrift US5520460) genannt. Sie bestehen aus zwei oder mehr zueinander senkrecht stehenden Gittern von parallelen Blechstreifen, die an ihren Kreuzungspunkten miteinander verbunden und in einem Winkel gegen die Hauptströmungsrichtung des Mischgutes angestellt sind, um
15 die Flüssigkeit in Teilströme zu teilen und zu mischen. Ein einzelnes Mischelement ist als Mischer ungeeignet, da eine Durchmischung nur entlang einer Vorzugsrichtung quer zur Hauptströmungsrichtung erfolgt. Deshalb werden üblicherweise mehrere Mischelemente, die jeweils zueinander um 90° verdreht sind, hintereinander angeordnet.

20 Die Verwendung statischer Mischer zur Dispergierung von Gas in einer Flüssigkeit ist bekannt. In WO2005/103115A1 wird zum Beispiel die Verwendung eines statischen Mischers in einem Verfahren zur Herstellung von Polycarbonat nach dem Umesterungsverfahren beschrieben. Um Monomere und andere flüchtige Bestandteile aus dem Polycarbonat zu entfernen, wird der Polymerschmelze ein Schäumungsmittel zugesetzt.
25 Durch anschließende Druckerniedrigung entweicht das Schäumungsmittel unter Aufschäumen der Schmelze. Der Schaum bewirkt eine starke Oberflächenvergrößerung, die vorteilhaft für die Entgasung, d.h. die Entfernung flüchtiger Bestandteile ist. Als Schäumungsmittel wird bevorzugt ein inertes Gas wie z.B. Stickstoff eingesetzt, das mittels eines statischen Mischers, z.B. eines SMX-Mischers, in die Schmelze eingebracht und
30 dispergiert wird.

In US2005/0094482A1 und US5480589 sind statische Mischer zur Dispergierung von Gasen zur Herstellung geschlossenzelliger Schäume beschrieben. Ein stufenförmiger Aufbau zur Erhöhung der Effektivität der Gasdispergierung ist nicht beschrieben.

Bei der Dispergierung von Gas in eine Flüssigkeit sind im Allgemeinen größere Mischerlängen nötig als bei der Dispergierung von Flüssigkeiten.

- 5 Ausgehend vom Stand der Technik stellt sich die Aufgabe, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Dispergierung von Gas in eine Flüssigkeit bereitzustellen, um eine effektivere Gasdispergierung als nach dem Stand der Technik beschrieben zu ermöglichen. Im Vergleich zum Stand der Technik soll bei gleicher Mischerlänge eine kleinere mittlere Blasengröße am Mischeraustritt erzielt werden. Alternativ soll bei gleichem Druckverlust
10 über den gesamten Mischer eine kleinere mittlere Blasengröße am Mischeraustritt erzielt werden.

- Überraschend wurde gefunden, dass ein statischer Mischer, bei dem in Fließrichtung ein steigender spezifischer Energieeintrag vorliegt, über eine besonders effektive
15 Dispergierwirkung verfügt. Es lassen sich mit Hilfe eines solchen Mixers bei vergleichbarem Gesamtdruckverlust kleinere Gasblasen erzeugen als mit einem statischen Mischer, bei dem der Energieeintrag über die Länge des Mixers konstant ist. Es lassen sich mit Hilfe eines solchen Mixers ebenfalls bei gleicher Gesamtmischerlänge kleinere Gasblasen erzeugen als mit einem statischen Mischer, bei dem der Energieeintrag über die
20 Länge des Mixers konstant ist.

- Ein erster Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist daher eine Vorrichtung zur Dispergierung von Gas in eine Flüssigkeit mit einer Anzahl n an aufeinander folgenden Zonen $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ mit statischen Mischelementen, wobei jede Zone Z_i eine Länge L_i und
25 einen effektiven Durchmesser D_i aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Zonen so ausgeführt sind, dass der auf das jeweilige Verhältnis L_i/D_i normierte mechanische Energieeintrag E_i , der auf das Gas-Flüssigkeits-Gemisch wirkt, in Fließrichtung von Zone zu Zone zunimmt, wobei n eine ganze Zahl größer oder gleich 3 ist und i ein Index ist, der die ganzen Zahl von 1 bis zur Anzahl n der Zonen durchläuft.

- 30 Ein weiterer Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zur Dispergierung von Gas in eine Flüssigkeit, bei dem Gas und Flüssigkeit gemeinsam durch eine Mischvorrichtung gefördert werden und dabei eine Anzahl n an aufeinander folgenden

Zonen $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ mit statischen Mischelementen durchströmen, wobei jede Zone Z_i eine Länge L_i und einen effektiven Durchmesser D_i aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass der auf das jeweilige Verhältnis L_i/D_i normierte mechanische Energieeintrag E_i , der auf das Gas-Flüssigkeits-Gemisch wirkt, in Fließrichtung von Zone zu Zone zunimmt, wobei n eine
5 ganze Zahl größer oder gleich 3 ist und i ein Index ist, der die ganzen Zahl von 1 bis zur Anzahl n der Zonen durchläuft.

Unter Flüssigkeit wird hier allgemein ein Medium verstanden, das durch die erfindungsgemäße Vorrichtung gefördert werden kann. Dabei kann es sich beispielsweise auch um eine Schmelze oder eine Dispersion (z.B. Emulsion oder Suspension) handeln. Im
10 Folgenden wird auch der Begriff Fluid verwendet. Das Fluid ist dabei vorzugsweise höherviskos, d.h. es weist eine Viskosität zwischen 2 mPas und 10.000.000 mPas, besonders bevorzugt zwischen 1000 mPas und 1.000.000 mPas auf (gemessen in einem Kegel-Platte-Viskosimeter nach DIN 53019 bei einem Schergefälle von 1 s^{-1}).

15 Um ein Gas oder Gasgemisch in dem Fluid zu dispergieren, wird mechanische Energie in das Gemisch eingetragen. Dieser Energieeintrag wird durch statische Mischelemente realisiert. In der Mischtechnik ist die Verwendung von modularen Systemen üblich. Ein Mischer setzt sich aus einer Reihe von modularen Mischelementen zusammen. Zur Erhöhung der Mischwirkung kann die Zahl der Mischelemente in einem Mischer erhöht
20 werden. Üblicherweise werden die Mischelemente zur Ausbildung eines statischen Mixers in ein Rohr eingebracht. Es sei darauf hingewiesen, dass die vorliegende Erfindung nicht auf Mischer beschränkt ist, die aus einer Anordnung modularer Mischelemente aufgebaut sind, sondern auch auf Mischer in kompakter Bauform Anwendung findet.

25 Die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass sie über eine Anzahl n an aneinandergrenzenden Zonen verfügt, wobei n eine ganze Zahl größer oder gleich 3 ist. In jeder Zone liegen statische Mischelemente vor. Jede Zone Z_i weist eine Länge L_i und eine Querschnittsfläche A_i auf. Dabei ist i ein Index, der die ganzen Zahl von 1 bis zur Anzahl n der Zonen durchläuft. Die Länge L_i einer Zone Z_i entspricht der Länge der hintereinander
30 angeordneter Mischelemente in dieser Zone; die Querschnittsfläche A_i entspricht der Querschnittsfläche der in der Zone Z_i vorliegenden Mischelemente.

Aus der Querschnittsfläche A_i lässt sich ein effektiver Durchmesser D_i nach Gleichung 1 errechnen:

$$D_i = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \quad (1)$$

Der effektive Durchmesser D_i entspricht bei einem kreisförmigen Querschnitt dem Durchmesser des Kreises. Bei einem nicht-kreisförmigen (z.B. rechteckigem) Querschnitt entspricht der effektive Durchmesser D_i dem Durchmesser eines Kreises mit einer Fläche, die der Querschnittsfläche entspricht.

Das Verhältnis L_i/D_i ist eine für die jeweilige Zone Z_i charakteristische Kennzahl.

10

Ein Mischelement verfügt über innere Strukturen und Kanäle zwischen diesen Strukturen. Wird ein Fluid durch ein Mischelement gefördert, so bewirken die Strukturen und Kanäle, dass das Fluid in Teilströme aufgeteilt, verteilt, geschert und ggf. verwirbelt wird und so die Teilströme miteinander vermischt werden. Der mittlere Durchmesser eines Kanals wird nachfolgend mit dem Buchstaben d_i abgekürzt. Unter einem mittleren Kanaldurchmesser d_i wird der über alle Kanäle arithmetisch gemittelte effektive Kanaldurchmesser verstanden, wobei sich der effektive Kanaldurchmesser analog dem effektiven Durchmesser einer Zone Z_i nach Gleichung 1 berechnen lässt.

20

$$d_i = \sqrt{\frac{4a_i}{\pi}} \quad (2)$$

Das Verhältnis d_i/D_i zwischen dem mittleren Kanaldurchmesser d_i und dem effektiven Durchmesser D_i der Mischelemente in einer Zone Z_i ist ebenfalls eine charakteristische Kennzahl für die jeweilige Zone Z_i . Der Parameter a_i bezeichnet dabei die offene Querschnittsfläche, genauer die Projektionsfläche des freien Querschnitts. So ergibt sich beispielsweise aus Fig. 1a die offene Querschnittsfläche a_i aus der Summe der Projektionsflächen der einzelnen freien Querschnittsflächen der offenen Kanäle, durch die das Fluid durchströmen kann (Gleichung 3).

25

$$a_i = \sum_{m=1}^N b_{i,m} \cdot w_{i,m} \quad (3)$$

30

Der Parameter m ist dabei ein Zählparameter, N ist die Anzahl der einzelnen freien Querschnittsflächen.

Die nach dem Stand der Technik zur Gasdispargierung eingesetzten statischen Mischer verfügen über Mischeinbauten, die über die Länge des Mixers gleichbleibend sind. Hier liegt nur eine einzige Zone vor, deren Länge L der Länge des Mixers und dessen effektiver Durchmesser D dem effektiven Durchmesser des Mixers entspricht. Um die Dispergierungswirkung eines solchen Mixers zu erhöhen, kann beispielsweise die Länge L erhöht werden. Mit der Länge des Mixers steigt der Druckverlust Δp über den Mischer linear an. Der mechanische Energieeintrag E_{abs} ist gemäß Gleichung (4) proportional zum Druckverlust, wobei $\dot{V}$ der Volumenstrom des Fluids ist.

$$E_{abs} = \Delta p \cdot \dot{V} \quad (4)$$

Der Druckverlust Δp und damit der mechanische Energieeintrag lässt sich in gleicher Weise auch durch eine Reduzierung des effektiven Durchmessers D erhöhen.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnet sich durch eine Anzahl n an Zonen aus. Jede Zone Z_i ist durch einen spezifischen mechanischen Energieeintrag E_i charakterisiert, der in ein Fluid, das die jeweilige Zone durchströmt, eingetragen wird. Der spezifische mechanische Energieeintrag E_i ist der auf die Kennzahl L_i/D_i normierte mechanische Energieeintrag E_{abs} . Dabei ist erfindungsgemäß $E_1 < E_2 < \dots < E_n$.

$$E = \frac{E_{abs} \cdot D}{L} \quad (5)$$

25

Die Zahl n der Zonen in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung ist nicht limitiert. Sie kann gegen unendlich laufen, wenn die Zonen infinitesimal klein werden und ein kontinuierlich steigender spezifischer Energieeintrag über die Länge der Vorrichtung vorliegt, wie es z.B. bei einem konisch enger werdenden Rohr der Fall sein könnte.

30

Es ist denkbar, dass vor oder hinter den Zonen Z_1 bis Z_n weitere Zonen existieren, die frei wählbare spezifische Energieeinträge aufweisen.

So ist eine besonders bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung dadurch gekennzeichnet, dass es eine erste Zone Z_0 gibt, die einen höheren spezifischen Energieeintrag leistet als die in Fließrichtung nachfolgende Zone Z_1 ($E_0 > E_1$). Erfindungsgemäß folgen auf die Zone Z_1 weitere Zonen Z_2 bis Z_n , wobei für die entsprechenden spezifischen Energieeinträge E_1 bis E_n gilt: $E_1 < E_2 < \dots < E_n$.

Überraschend wurde festgestellt, dass durch eine solche Anordnung von Zonen durch die Zone Z_0 Primärblasen erzeugt werden, die in den darauffolgenden Zonen weniger stark zur Koaleszenz neigen und somit eine effektivere Dispergierung erreicht wird.

In einer bevorzugten Ausführungsform verfügt die erfindungsgemäße Vorrichtung über eine Anzahl n an Mischzonen, die hintereinander angeordnet sind, wobei der mittlere Kanaldurchmesser d_i in den Mischzonen in Fließrichtung kleiner wird. Durch kleinere Kanäle wird ein höherer Druckverlust pro Länge erzeugt, der gleichbedeutend mit einem zunehmenden spezifischen Energieeintrag ist.

Bevorzugt umfasst diese Ausführungsform ein zylinderförmiges Rohr, in das Mischelemente eingebracht sind. Der effektive Durchmesser D_i der Mischelemente ist dabei bevorzugt über die gesamte Rohrlänge konstant, während der mittlere Kanaldurchmesser d_i in aufeinanderfolgenden Zonen in Fließrichtung kleiner wird. Es gilt $D_1 = D_2 = \dots = D_n$ und $d_1 > d_2 > \dots > d_n$.

Bevorzugt werden Mischelemente des gleichen Typs verwendet, z.B. SMX-Mischer mit unterschiedlichen Kennzahlen d/D .

25

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform verfügt die erfindungsgemäße Vorrichtung über eine Anordnung von Mischelementen, die in Fließrichtung bei konstantem Verhältnis d_i/D_i einen zunehmend geringeren effektiven Durchmesser D_i aufweisen.

Es gilt $\frac{d_1}{D_1} = \frac{d_2}{D_2} = \frac{d_i}{D_i} \dots = \frac{d_n}{D_n}$ und $D_1 > D_2 > \dots > D_n$.

Bevorzugt umfasst diese Ausführungsform ein zylinderförmiges Rohr, in das Mischelemente eingebracht sind, die in Fließrichtung einen zunehmend kleineren effektiven Durchmesser D_i besitzen.

Die Mischelemente, deren Außendurchmesser kleiner ist als der Innendurchmesser des Rohres sind dabei bevorzugt mit einem Mantelrohr umschlossen, dessen Außendurchmesser annähernd dem Innendurchmesser des Rohres entspricht, um sie passend in das Rohr einbringen zu können. An den Übergangsstellen von einem Mischelement mit einem großen Durchmesser zu einem Mischelement mit einem kleinen Durchmesser sind bevorzugt Übergangsmantelrohre vorhanden, die über einen in Richtung des Mischelements mit
10 kleinem Durchmesser konisch verjüngendem Innendurchmesser verfügen. Diese Übergangsmantelrohre können einstückig mit den Mantelrohren verbunden oder separat ausgeführt sein.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform verfügt die erfindungsgemäße Vorrichtung in jeder Zone Z_i über eine Anordnung von Mischelementen unterschiedlichen Typs, die bei
15 gleichem Verhältnis L_i/D_i in Fließrichtung in jeder Zone Z_i einen zunehmenden Druckverlust verursachen.

Bevorzugt sind die Mischelemente in ein zylinderförmiges Rohr eingebracht. Sie verfügen
20 bevorzugt über den gleichen effektiven Durchmesser D_i .

Sollten die Außendurchmesser der Typen von Mischelementen variieren, so ist es denkbar, diejenigen Mischelemente, deren Außendurchmesser kleiner ist als der Innendurchmesser des Rohres, mit einem Mantelrohr bzw. Ring zu umschließen, dessen Außendurchmesser annähernd dem Innendurchmesser des Rohres entspricht, um sie passend in das Rohr
25 einbringen zu können. Auch die oben beschriebene Verwendung von Übergangsmantelrohren ist hier vorteilhaft.

Es ist denkbar, die verschiedenen aufgeführten Ausführungsformen miteinander zu kombinieren.

30

Die erfindungsgemäße Vorrichtung eignet sich zur Dispergierung von Gas in einer Flüssigkeit, z.B. zum Eintrag eines Schleppgases in eine Polymerschmelze oder zum Aufschäumen von flüssigen Medien.

Das Gas kann mit Röhrchen oder dünnen Kapillaren, die sich vorzugsweise in Fließrichtung vor der Statikmischerkaskade befinden, zugegeben werden. Weiterhin kann das Gas auch durch einen porösen Körper zugegeben werden. Ein poröser Körper kann beispielsweise folgende Geometrien umfassen: eine Fritte und/oder einen porösen, gesinterten Körper und/oder ein ein- oder mehrlagiges Sieb.

Der poröse Körper kann beispielsweise in Form eines Zylinders, in Form eines Quaders, einer Kugel oder eines Würfels oder in konischer Form, z.B. als Kegel, ausgeformt sein.

Diese Vorrichtungen sorgen für eine feine Vordispersierung des Gases sowie ggf. auch für eine Verteilung des Gases über den Querschnitt.

- Die Kapillare bzw. der poröse Körper weist einen mittleren effektiven Lochinnendurchmesser von vorzugsweise 0,1-500 μm , bevorzugt 1 – 200 μm , besonders bevorzugt 10-90 μm auf.

- Als poröse Körper können beispielsweise poröse Sinterkörper aus Metall zum Einsatz kommen, wie Frittenkörper, welche in der Chromatographie verwendet werden, z.B. die Sinterkörper der Fa. Mott Corporation (Farmington, USA). Weiterhin können gewickelte Drahtgewebe zum Einsatz kommen, beispielsweise die gewickelten Drahtgewebe der Fa. Fuji Filter Manufacturing Co., Ltd. (Tokyo, Japan), Handelsname: Fujiloy[®]. Weiterhin können Siebe oder mehrlagige Gewebe zum Einsatz kommen, wie z.B. die Metall-Drahtgewebe-Verbundplatten der Fa. Haver & Boecker Drahtweberei (Oelde, Deutschland), Handelsname: Haver Porostar.

- Diese Vorrichtungen dienen der Verteilung des Gases über den Rohrquerschnitt und einer für die Gasdispersierung günstigen Vordispersierung über die engen Poren. Der effektive Durchmesser D_i der in den porösen Sinterkörpern oder Sieben oder gewickelten Drahtgeweben eingesetzten Löchern beträgt bevorzugt 1-500 μm , besonders bevorzugt 2 – 200 μm , ganz besonders bevorzugt 10-90 μm .

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Beispielen näher erläutert ohne sie jedoch hierauf zu beschränken.

30

Fig. 1 zeigt Beispiele von drei unterschiedlichen erfindungsgemäßen statischen Mischern (No.1, No. 2 und No. 3): Fig. 1(a) von oben, Fig. 1(b) von der Seite (Schnittzeichnung) und

Fig. 1 (c) in der Anordnung nach Einbau in ein Rohr oder Gehäuse. Die Angaben für w_i und b_i bezeichnen die Länge bzw. Breite des projizierten Querschnitts der freien Strömungskanäle. D_i bezeichnet den lichten Durchmesser und DM den Außendurchmesser der statischen Mischelemente. L_i bezeichnet die gesamte Länge eines geometrisch
 5 gleichförmigen Mischerabschnitts und l_i die Länge eines einzelnen Mischelements.

No. 1 stellt einen Kenics-Mischer dar. No.2 zeigt einen handelsüblichen SMX-Statikmischer ohne bzw. mit äußerem Ring. No. 3 zeigt einen Mischer mit Stegstruktur und äußerem Ring (DE 29923895U1 und EP1189686B1).

10

Fig. 2 zeigt drei verschiedene Beispiele (A, B und C) von Varianten erfindungsgemäßer Statikmischer, mit einzelnen Zonen (gekennzeichnet durch die Längenangaben L_1, L_2, L_3), dadurch gekennzeichnet, dass der auf das jeweilige Verhältnis L_i/D_i der einzelnen Zonen normierte mechanische Energieeintrag E_i auf ein Fluid, das die jeweilige Zone Z_i
 15 durchströmt, in Fließrichtung zunimmt. Die Fließrichtung wird durch den dicken Pfeil angegeben.

Fig. 2 A zeigt eine Abfolge von statischen Mixern mit geometrisch ähnlicher Struktur und einer Anordnung von Mischelementen, die in Fließrichtung bei konstantem Verhältnis d_i/D_i
 20 einen zunehmend geringeren effektiven Durchmesser D_i aufweisen.

$$\text{Es gilt } \frac{d_1}{D_1} = \frac{d_2}{D_2} = \frac{d_3}{D_3} \text{ und } D_1 > D_2 > D_3.$$

Fig. 2 B zeigt eine Ausführungsform mit einem zylinderförmigen Rohr, in das Mischelemente eingebracht sind, bei denen der effektive Durchmesser D_i über die gesamte
 25 Rohrlänge konstant ist, während der mittlere Kanaldurchmesser d_i in aufeinanderfolgenden Zonen in Fließrichtung kleiner wird. Es gilt $D_1 = D_2 = D_3$ und $d_1 > d_2 > d_3$. Es werden Mischelemente des gleichen Typs verwendet, z.B. SMX-Mischer mit unterschiedlichen Kennzahlen d/D .

30 Fig. 2 C zeigt eine Anordnung von Mischelementen unterschiedlichen Typs, die bei gleichem Verhältnis L_i/D_i in Fließrichtung in jeder Zone Z_i einen zunehmenden Druckverlust verursachen. Als Beispiel ist hier in der ersten Zone mit der Länge L_1 ein Kenics-Mischer

dargestellt. In der zweiten Zone mit der Länge L_2 befindet sich ein SMX-Mischer. In der dritten Zone mit der Länge L_3 befindet sich ebenfalls ein SMX-Mischer mit geringeren effektiven Durchmesser D_i im Vergleich zu dem Mischer in der zweiten Zone.

- 5 Fig. 3A zeigt eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit drei Zonen und einem Vormischer sowie einer Gasdosierung über eine Kapillare. Vor dem Vormischer befindet sich der Bereich, bei dem das Fluid dosiert wird (L) sowie eine Vorrichtung zur Dosierung von Gasen (G) über eine Kapillare (Ca).
- 10 Fig. 3B zeigt eine Gasdosierung mittels porösem Sinterkörper (der dahinter liegende Mischer ist hier nicht eingezeichnet). Vor dem Vormischer befindet sich der Bereich, bei dem das Fluid dosiert wird (L) und eine Vorrichtung zur Gasdosierung (G) über einen porösen Sinterkörper (PS), welcher sich innerhalb des Strömungsquerschnitts befindet.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Dispergierung von Gas in eine Flüssigkeit mit einer Anzahl n an aufeinander folgenden Zonen $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ mit statischen Mischelementen, wobei
5 jede Zone Z_i eine Länge L_i und einen effektiven Durchmesser D_i aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Zonen so ausgeführt sind, dass der auf das jeweilige Verhältnis L_i/D_i normierte mechanische Energieeintrag E_i , der auf eine Flüssigkeit wirkt in Fließrichtung von Zone zu Zone zunimmt, wobei n eine ganze Zahl größer oder gleich 3 ist und i ein Index ist, der die ganzen Zahl von 1 bis zur
10 Anzahl n der Zonen durchläuft.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der mittlere Kanaldurchmesser d_i in den in Fließrichtung aufeinander folgenden Zonen Z_1 bis Z_n kleiner wird.
15
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die in den Zonen Z_1 bis Z_n vorliegenden Mischelemente dasselbe Verhältnis d_i/D_i und einen in Fließrichtung von Zone zu Zone zunehmend geringeren effektiven Durchmesser D_i aufweisen.
- 20 4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Zonen Z_1 bis Z_n über Mischelemente unterschiedlichen Typs verfügen, die bei gleichem Verhältnis L_i/D_i in Fließrichtung von Zone zu Zone einen zunehmenden Druckverlust verursachen.
- 25 5. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass es eine erste Zone Z_0 gibt, die einen höheren spezifischen Energieeintrag E_0 leistet als die in Fließrichtung nachfolgende Zone Z_1 .
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, weiterhin umfassend ein Röhrchen
30 oder eine dünne Kapillare zur Zuführung von Gas in die Vorrichtung, dadurch gekennzeichnet, dass das Röhrchen oder die dünne Kapillare vor der Anordnung aus Mischelementen angebracht ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, weiterhin umfassend einen porösen oder siebförmigen Körper zur Zuführung von Gas in die Vorrichtung, dadurch gekennzeichnet, dass der Körper vor der Anordnung aus Mischelementen angebracht ist.
- 5
8. Verfahren zur Dispergierung von Gas in eine Flüssigkeit, bei dem Gas und Flüssigkeit gemeinsam durch eine Mischvorrichtung gefördert werden und dabei eine Anzahl n an aufeinander folgenden Zonen $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ mit statischen Mischelementen durchströmen, wobei jede Zone Z_i eine Länge L_i und einen effektiven Durchmesser D_i aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass der auf das jeweilige Verhältnis L_i/D_i normierte mechanische Energieeintrag E_i , der auf das Gas-Flüssigkeits-Gemisch wirkt, in Fließrichtung von Zone zu Zone zunimmt, wobei n eine ganze Zahl größer oder gleich 3 ist und i ein Index ist, der die ganzen Zahl von
- 10
- 15
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Flüssigkeit eine Viskosität zwischen 2 mPas und 10.000.000 mPas, besonders bevorzugt zwischen 1000 mPas und 1.000.000 mPas aufweist.