



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**
10 **DE 199 09 180 A 1**

51 Int. Cl.⁶:
B 01 J 19/00
B 01 J 8/00

21 Aktenzeichen: 199 09 180.3
22 Anmeldetag: 3. 3. 99
43 Offenlegungstag: 9. 9. 99

DE 199 09 180 A 1

66 Innere Priorität:
198 09 139. 7 04. 03. 98

71 Anmelder:
Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH, 55129 Mainz,
DE

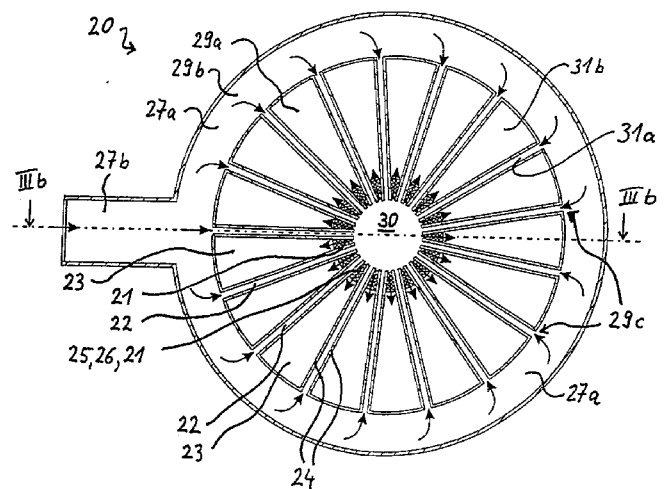
72 Erfinder:
Ehrfeld, Wolfgang, Prof. Dr., 55124 Mainz, DE;
Löwe, Holger, Dr., 55276 Oppenheim, DE; Hessel,
Volker, Dr., 65510 Hünstetten, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zur Durchführung chemischer Umsetzungen in einem Mikroreaktor und solch ein Mikroreaktor

57 Mikroreaktoren zeichnen sich besonders durch eine hohe Selektivität und Ausbeute der in ihnen durchgeführten chemischen Umsetzungen aus. Das große Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis führt jedoch auch bei Gegenstromführung der Edukt- und Produktströme zu hohen Wärmeverlusten vom Reaktionsbereich an die Umgebung, wodurch diese Mikroreaktoren für chemische Umsetzungen bei hohen Temperaturen nur begrenzt einsatzfähig sind. Die Aufgabe, diese Wärmeverluste zu minimieren, wird mit einem Verfahren gelöst, bei dem die Edukt- und Produktströme spiralartig oder radial zu bzw. von dem in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors angeordneten Reaktionsbereich geführt werden. Der Reaktionsbereich ist also in mindestens einer Ebene von den im Gegenstrom zueinander geführten Edukt- und Produktströmen umgeben, so daß die abgegebene Reaktionswärme zu einem großen Teil wieder dem Reaktionsbereich zugeführt wird. Damit wird der Einsatzbereich von Mikroreaktoren im Hinblick auf Umsetzungen bei hohen Temperaturen entscheidend erweitert. Ebenfalls wird ein entsprechender Mikroreaktor in unterschiedlichen Ausführungsformen beschrieben.



DE 199 09 180 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Durchführung chemischer Umsetzungen in einem Mikroreaktor, bei dem ein oder mehrere Eduktströme zu mindestens einem Reaktionsbereich geführt werden, und bei dem ein oder mehrere Produktströme vom Reaktionsbereich im Gegenstrom zu dem bzw. den Eduktströmen und in thermischem Kontakt mit diesem bzw. diesen geführt werden. Des weiteren betrifft die Erfindung einen Mikroreaktor zur Durchführung chemischer Umsetzungen mit einer oder mehreren Zuführungen für Edukte und einer oder mehreren Abführungen für Produkte sowie mindestens einem mit der bzw. den Zu- und Abführungen verbundenen Reaktionsbereich, wobei die Abführungen im Gegenstrom zu der bzw. den Zuführungen und in thermischem Kontakt mit dieser bzw. diesen angeordnet sind.

Mikroreaktoren ermöglichen aufgrund des hohen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses eine exakte und schnelle Einstellung von Reaktionsbedingungen und damit eine Optimierung der Ausbeute und der Selektivität. Da je Reaktionsbereich nur kleine Mengen umgesetzt werden, lassen sich auch Reaktionen mit explosiven oder/und toxischen Substanzen ohne umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen durchführen. Dies ermöglicht zum Beispiel eine Vorort-Produktion kleiner Mengen, insbesondere von Substanzen, deren großtechnische Produktion oder/und Transport nicht praktikabel sind.

Aus der DE 39 26 466 A1 ist ein Mikroreaktor zur Durchführung chemischer Reaktionen mit starker Wärmetönung bekannt, in dem Stoff-, Reaktions- und Wärmeleitung in übereinandergeschichteten, plattenartigen Elementen stattfindet, die durch ein System aus durch Zerspannung hergestellten Rillen durchzogen und verbunden sind. Der Mikroreaktor selbst kann aus einem Katalysatormaterial gefertigt sein.

In der WO 95/30476 wird ein Verfahren zur Durchführung chemischer Reaktionen vorgestellt. Dadurch, daß die Edukte in Fluidfäden aufgeteilt werden, gelangen die Edukte eng benachbart als Freistrahlen in einen Raum, der als Misch- und Reaktionsraum dient, wo sie durch Diffusion und Turbulenz vermischen und zur Reaktion kommen. Der Vorteil hierbei ist, daß durch die Aufteilung in Fluidfäden die Edukte schnell homogen vermischt werden, wodurch eine Reaktion mit weniger Folge- und Nebenprodukten stattfindet. Eine Durchführung heterogen katalysierter Gasphasenreaktionen ist nach diesem Verfahren nicht ohne weiteres möglich.

Entscheidender Nachteil bekannter Mikroreaktoren ist, daß aufgrund des hohen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses, das eine gezielte und schnelle Einstellung der Reaktionsbedingungen ermöglicht, ein hoher Wärmeverlust auftritt. Insbesondere bei Reaktionen, die bei erhöhten Temperaturen ablaufen, erfordert dies eine ständige Zufuhr größerer Wärmemengen, um die Wärmeverluste über das Mikroreaktorgehäuse sowie über den den Reaktor verlassenden Produktstrom auszugleichen.

Großtechnisch tritt dieses Problem dadurch kaum in Erscheinung, daß der eigentliche Reaktionsbereich thermisch einfach zu isolieren ist und die Reaktionswärme aus dem Produktstrom über Wärmetauscher einfach zurückzugewinnen ist. Solche mehrstufigen Konzepte lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf Mikroreaktoren übertragen und würden zudem den Vorteil kompakter Anordnungen zunichte machen.

Ein solcher großtechnischer Reaktor zur Durchführung exothermer katalytischer Oxidationsreaktionen bei möglichst isothermen Bedingungen wird in der DE-OS-

20 16 614 beschrieben. In dem zylindrischen Reaktor wird axial über eine zentrale Gaszuführung das umzusetzende Gasmischung zugeführt und radial in mit Katalysator-Material gefüllte Kreisringsektoren weitergeleitet. Die Umsetzung findet in den Kreisringsektoren statt, wobei alternierende Kreisringsektoren als Plattenwärmetauscher ausgebildet sind, die in axialer Richtung von einer Kühlflüssigkeit durchströmt werden. Die von der Kühlflüssigkeit aufgenommene Reaktionswärme kann zur Erzielung einer erforderlichen Anfangstemperatur beispielsweise über einen weiteren Wärmetauscher an das umzusetzende Gasmischung abgegeben werden. Die Reaktionsprodukte, die radial aus den Kreisringsektoren ausströmen, werden über einen als Sammler ausgebildeten, die Kreisringsektoren umgebenden Ringraum zusammengeführt. Dieses mindestens einen Wärmetauscher beinhaltende Konzept würde jedoch bei Übertragung auf Mikroreaktormaßstäbe aufgrund des komplexen Aufbaus zu hohen Wärmeverlusten führen.

In der US 5,405,586 wird ebenfalls ein zylindrischer Reaktor mit Kreisringsektoren als Reaktionsbereiche und Wärmetauscher vorgestellt. Jeder zweite Kreisringsektor weist ein katalytisch aktives Material auf, das radial von außen nach innen durchströmt wird, wobei die Edukte axial von oben zugeführt und die Produkte axial nach unten abgeführt werden. Alternierende Kreisringsektoren werden von einem Wärmetauscher-Medium radial von innen nach außen durchströmt, so daß sich die Temperatur der katalysatorgefüllten Reaktionsbereiche genau einstellen läßt.

Ein weiterer großtechnischer Reaktor zur Durchführung katalytischer Reaktionen, bei dem die Reaktionsbereiche in engem Kontakt mit einem Wärmetauscher stehen, ist in der DE-PS-9 42 805 beschrieben. Zwischen den Windungen eines Spiralwärmetauschers befindet sich katalytisch aktives Material, das quer zu dem spiralförmig strömenden Wärmetauscher-Medium durchströmt wird.

Ein ähnlicher Reaktor wird in dem Abstract zur JP 3-26326 beschrieben. Die umzusetzenden Gase werden in einer spiralartig gewundenen katalytischen Schicht von innen nach außen geführt, während in den ebenfalls spiralartig gewundenen Zwischenräumen ein Heizmedium zunächst axial zugeführt und dann spiralartig nach außen geleitet wird.

In dem Abstract zur JP 61-118132 wird ein zylindrischer Reaktor beschrieben, in dem ein zwischen spiralartig gewundenen Platten befindliches katalytisches Material axial zur Spiralachse durchströmt wird. In den ebenfalls spiralartig verlaufenden Zwischenräumen der spiralartig gewundenen Platten strömt quer zum Eduktstrom ein Wärmetauscher-Medium. Auch hier befinden sich die Reaktionsbereiche in direktem Kontakt mit einem Wärmetauscher.

In der DE-PS-2 14 788 wird ein geschlossener Spiralgegenstromkühler zum Wärmetausch zwischen zwei voneinander getrennten Fluiden vorgestellt. Ein Einsatz als Reaktor ist nicht vorgesehen.

Solche großtechnischen Reaktoren sind auf die Möglichkeit einer gezielt einstellbaren isothermen Reaktionsführung hin optimiert. Eine Minimierung von Wärmeverlusten der Reaktionsbereiche direkt an die Umgebung oder indirekt über die abgeführten Produkte wird jedoch nicht angestrebt. Aufgrund der mit den geänderten Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnissen einhergehenden Wärmeverlusten ist eine Übertragung solcher Reaktorkonzepte auf Maßstäbe von Mikroreaktoren kaum sinnvoll.

Ein Röhrenofen zum indirekten Erhitzen von Gasen oder Flüssigkeiten wird in der AT-PS-235 802 beschrieben. Das Fluid wird durch Gegenstromrohre, d. h. ineinandergeschobene Doppelrohre, geleitet, die parallel zueinander ausgerichtet in einen Feuerraum hineinragen. Die Rohre können eine Katalysatorfüllung aufweisen. Mit dieser Anordnung

kann ein guter Wärmeübergang vom Feuerraum zu dem Gegenstromrohren erreicht werden. Eine Minimierung von Wärmeverlusten der Reaktionsbereiche in den Gegenstromrohren an die Umgebung kann hiermit jedoch nicht erreicht werden.

In der GB-PS-1,122,426 wird ein Verfahren zur Durchführung insbesondere von Gasphasenreaktionen bei gleichzeitiger Vermeidung von Nebenreaktionen durch Begrenzung der Temperatur der Wände des Reaktionsbereiches vorgestellt. Der Eduktstrom wird zu einem Reaktionsbereich geführt, wobei der Produktstrom auf der Länge des Reaktionsbereiches im Gegenstrom zum Eduktstrom und in thermischen Kontakt mit diesem abgeführt wird. Hierdurch wird eine ständige Wärmeabfuhr erreicht, so daß die Wände des Reaktionsbereiches nicht solch eine Temperatur annehmen, die eine unerwünschte katalytische Aktivität bewirkt. Eine gute Wärmeübertragung aus dem Produktstrom an den Eduktstrom wird aufgrund der kleinen Länge und der Anordnung des Gegenstrombereichs nicht erreicht. Vielmehr werden aufgrund der Führung des aufgeheizten Eduktstromes und des Produktstromes in weiten Bereichen in Kontakt mit der Umgebung hohe Wärmeverluste bewirkt.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Durchführung chemischer Umsetzungen in einem Mikroreaktor sowie einen entsprechenden Mikroreaktor der eingangs erwähnten Art bereitzustellen, bei dem Wärmeverluste aus dem Reaktionsbereich an die Umgebung stark vermindert sind und bei dem weiterhin eine kompakte Anordnung möglich ist.

Die Aufgabe wird durch Verfahren gemäß Anspruch 1 und durch einen Mikroreaktor gemäß Anspruch 7 gelöst, wobei die abhängigen Ansprüche vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung betreffen.

Gemäß des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Edukt- und Produktstrom bzw. die Edukt- und Produktströme zur Minimierung thermischer Verluste aus dem Reaktionsbereich an die Umgebung spiralartig oder radial in mindestens einer Ebene zu bzw. von einem Reaktionsbereich geführt, der in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors angeordnet ist.

Durch die Führung des Produktstroms im Gegenstrom und in thermischem Kontakt zum Eduktstrom wird eine Rückgewinnung der in dem Produktstrom enthaltenen Reaktionswärme erreicht. Erfindungsgemäß wird jedoch auch eine Minimierung der Wärmeverluste des Reaktionsbereiches an die Umgebung erreicht, die gerade bei Mikroreaktoren über das Gehäuse aufgrund des großen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses sehr hoch sind. Hierzu ist der Reaktionsbereich in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors angeordnet und in mindestens einer Ebene spiralartig oder radial von dem bzw. den Edukt- und Produktströmen umgeben. Freiwerdende Reaktionswärme wird also über die einströmenden Edukte wieder dem Reaktionsbereich zugeführt oder an den Produktstrom abgegeben, der durch die Gegenstromführung die Reaktionswärme wieder dem Eduktstrom zuführt. Die Verluste aus dem Reaktionsbereich an die Umgebung durch Wärmeleitung oder Wärmestrahlung, insbesondere über das Gehäuse, werden somit minimal gehalten. Das erfindungsgemäße Verfahren läßt sich auch vorteilhaft für Flüssigphasen-Reaktionen einsetzen.

Durch die Minimierung der Wärmeverluste kann im Reaktionsbereich eine für bekannte Mikroreaktoren nicht ohne weiteres erreichbare hohe Temperatur erzielt werden, so daß dieses Verfahren den Einsatzbereich von Mikroreaktoren entscheidend erweitert. Daher können mit diesem Verfahren die mit dem Einsatz von Mikroreaktoren verbundenen Vorteile, wie Steigerung der Selektivität und der Ausbeute, auf ein neues Spektrum von chemischen Umsetzungen erweitert

werden. Die Erfindung eignet sich daher insbesondere zur Durchführung von Gasphasenreaktionen bei erhöhten Temperaturen, bevorzugt bei Temperaturen über 500°C.

Ein aufwendiges Kühlen der Produkte bzw. Aufheizen der Edukte kann nach diesem Verfahren entfallen, wodurch auch eine deutliche Energieeinsparung erreicht wird. Zum Ausgleich von restlichen Wärmeverlusten kann dennoch ein Vorheizen des Eduktstroms vorgesehen werden.

Liegen mehrere Reaktionsbereiche vor, so sind diese benachbart, und von den Zu- und Abführungen umgeben. Diese benachbarte Anordnung der Reaktionsbereiche erlaubt eine Homogenisierung der Reaktionstemperaturen sowie bei Verwendung von Katalysatoren eine Homogenisierung der Katalysatortemperaturen. Hierdurch können die Umsetzungen in dem Mikroreaktor unter einheitlichen Bedingungen durchgeführt werden. Darüber hinaus gestattet die Anordnung von Zuführung, Abführung und Reaktionsbereich eine kompakte Bauweise bei einem einfachen Aufbau, so daß eine kostengünstige Realisierung in großen Stückzahlen ermöglicht wird.

Nach einer ersten Ausführungsform des Verfahrens wird ein Edukt- und Produktstrom spiralartig in einer Ebene zu bzw. von einem an der gemeinsamen Spiralachse angeordneten Reaktionsbereich geführt. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten in Richtung ober- und unterhalb der Spiralebene weisen der Edukt- und Produktstrom vorteilhaft ein hohes Aspektverhältnis, d. h. Verhältnis von Höhe zu Breite auf, oder/ und mehrere Edukt- und Produktströme werden in übereinanderliegenden Ebenen spiralartig geführt. Es ist auch denkbar, zwei oder mehr Edukt- oder/und Produktströme spiralartig in einer Ebene zu führen. Ebenso können auch zwei oder mehr, gegebenenfalls hintereinander angeordnete Reaktionsbereiche vorgesehen werden.

Nach einer zweiten Ausführungsform werden mehrere Edukt- und Produktströme jeweils in alternierenden Sektoren eines einen zylindrischen zentralen Bereich umgebenden, im Querschnitt kreisringförmigen Raumes radial zu bzw. von dem zentralen Bereich geführt, wobei der zentrale Bereich und/oder Bereich der Sektoren als Reaktionsbereich dient bzw. dienen. Hierbei ist der Reaktionsbereich also in mindestens einer Ebene radial von den Edukt- und Produktströmen umgeben, die in den Sektoren im Gegenstrom zueinander geführt werden.

Gemäß einer dritten Ausführungsform werden mehrere Edukt- und Produktströme radial zu bzw. von mehreren Reaktionsbereichen geführt, die fluidisch voneinander getrennt sowie in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors und benachbart zueinander liegen. Jeweils mindestens ein Edukt- und Produktstrom werden in einer Gegenstrom-Reaktoreinheit in thermischem Kontakt miteinander und im Gegenstrom zueinander geführt, wobei die Gegenstrom-Reaktoreinheit jeweils mindestens einen Reaktionsbereich aufweist. Die Gegenstrom-Reaktoreinheiten sind also in mindestens einer Ebene benachbart und zu einem zentralen Bereich hin ausgerichtet, so daß auch die Reaktionsbereiche benachbart zueinander liegen. Die Edukt- und Produktströme verlaufen radial in Richtung des zentralen Bereiches. Die von einem Reaktionsbereich abgegebene Wärme wird daher in dieser Ebene an die Edukt- und Produktströme sowie an die übrigen Reaktionsbereiche abgegeben, so daß eine Homogenisierung der Temperaturen der Reaktionsbereiche und damit eine einheitliche Reaktionsführung in den Gegenstrom-Reaktoreinheiten erreicht wird.

Es kann vorteilhaft sein, um die Gegenstrom-Reaktoreinheiten ein Wärmetausch-Medium zu leiten. Hierzu können die zwischen den Gegenstrom-Reaktoreinheiten befindlichen Zwischenräume genutzt werden.

Zum Aufteilen eines Eduktstroms und zum Zusammen-

führen einzelner Produktströme werden die Eduktströme und/oder die Produktströme über einen äußeren kreisringförmigen Raum zu- bzw. abgeführt. Hierdurch wird auch ein weiterer Wärmetausch zwischen den Edukt- und Produktströmen erreicht.

Um eine gute Wärmeübertragung zu gewährleisten, werden die Edukt- und/oder Produktströme vorteilhaft in Kanälen mit einer Breite in mindestens einem Bereich von <2 mm geführt. Mit mikrotechnischen Herstellungsverfahren lassen sich auch kleinste Kanalbreiten von 500 µm und kleiner realisieren, wodurch auch bei kleinen Weglängen und/oder hohen Strömungsgeschwindigkeiten eine sehr gute Wärmeübertragung zwischen dem Produkt- und Eduktstrom erreicht wird. Ein weiterer Vorteil kleiner Kanalbreiten ist das Vorherrschen laminarer Strömungsbedingungen, die im Gegensatz zu sonst in Reaktoren üblichen turbulenten Bedingungen eine genaue Einstellung der Verweilzeiten und damit eine Erhöhung sowohl der Selektivität als auch der Ausbeute ermöglichen.

Der erfindungsgemäße Mikroreaktor zeichnet sich dadurch aus, daß die Zuführung und Abführung bzw. die Zuführungen und Abführungen spiralartig oder radial in mindestens einer Ebene um den in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors liegenden Reaktionsbereich angeordnet sind. Dadurch, daß der Reaktionsbereich in mindestens einer Ebene von der bzw. den Zuführungen und Abführungen umgeben ist, wird eine Minimierung thermischer Verluste aus dem Reaktionsbereich an die Umgebung erzielt.

Zur Minimierung von Wärmeverlusten senkrecht zu der Ebene, in der der Reaktionsbereich von den Zu- und Abführungen umgeben ist, weisen die Zu- und Abführungen vorteilhaft ein hohes Aspektverhältnis, d. h. Verhältnis von Höhe zu Breite auf, oder/und mehrere solcher Mikroreaktoren sind derart übereinander angeordnet, daß die Reaktionsbereiche benachbart zueinander liegen.

Gemäß einer ersten Ausführungsform des Mikroreaktors verlaufen die Zuführung und Abführung spiralartig um eine gemeinsame Spiralachse, wobei der Reaktionsbereich an einem Bereich an der gemeinsamen Spiralachse angeordnet ist. Zum Einleiten von zwei oder mehr Edukten können auch zwei oder mehr Zuführungen vorgesehen sein. Ebenfalls vorteilhaft können auch zwei oder mehr, gegebenenfalls hintereinander angeordnete Reaktionsbereiche vorhanden sein.

Nach einer zweiten Ausführungsform weist der Mikroreaktor einen zylindrischen zentralen Bereich auf, der von einem in Sektoren aufgeteilten und im Querschnitt kreisringförmigen Raum umgeben ist. Alternierende Sektoren des kreisringförmigen Raumes dienen als Zu- bzw. Abführung. Der zentrale Bereich und/oder Bereiche der Sektoren dient bzw. dienen als Reaktionsbereich. Die als Zuführung dienenden Sektoren sind über den zentralen Bereich jeweils mit den als Abführung dienenden Sektoren verbunden. Hierzu kann der zylindrische zentrale Bereich einfach als freier Raum, in den die Sektoren münden, ausgestaltet sein oder der zentrale Bereich ist derart unterteilt, daß jeweils nur ein Sektor mit seinem benachbarten Sektor verbunden ist.

Gemäß einer dritten Ausführungsform sind mehrere Zu- und Abführungen radial in mindestens einer Ebene um mehrere Reaktionsbereiche angeordnet, die fluidisch voneinander getrennt sind und in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors benachbart zueinander liegen. Jeweils mindestens eine Zuführung und Abführung sowie mindestens ein Reaktionsbereich sind in einer Gegenstrom-Reaktoreinheit enthalten.

Die Gegenstrom-Reaktoreinheiten liegen also in mindestens einer Ebene benachbart zueinander und sind derart zu dem zentralen Bereich hin ausgerichtet, daß die Reaktions-

bereiche benachbart zueinander liegen und die Zu- und Abführungen radial um die Reaktionsbereiche angeordnet sind.

Gemäß einer Ausführungsvariante weisen die Gegenstrom-Reaktoreinheiten jeweils ein Gegenstromrohr auf, das ein äußeres an einem Ende verschlossenes Rohr und ein koaxial zum äußeren Rohr beabstandetes inneres Rohr umfaßt. Das innere Rohr dient als Zu- oder Abführung und der Bereich zwischen dem äußeren und dem inneren Rohr dient umgekehrt als Ab- bzw. Zuführung. Der Übergangsbereich zwischen der Zu- und der Abführung im Bereich des verschlossenen Endes des äußeren Rohres dient als Reaktionsbereich. Diese Gegenstromrohre sind derart radial um einen zentralen Bereich angeordnet, daß die Reaktionsbereiche benachbart zueinander liegen und zum zentralen Bereich hin ausgerichtet sind.

Zur Minimierung von Wärmeverlusten senkrecht zur Ebene der Gegenstrom-Reaktoreinheiten sind vorteilhaft zwei oder mehr übereinander liegende Ebenen mit Gegenstrom-Reaktoreinheiten vorgesehen, die jeweils in einer Ebene radial um einen gemeinsamen zylindrischen zentralen Bereich angeordnet sind. Solch eine Anordnung ist technisch einfach zu realisieren.

Es ist auch denkbar, die Gegenstrom-Reaktoreinheiten radial im Raum um einen kugelförmigen zentralen Bereich anzuordnen. Durch solch eine, beispielsweise kugelsymmetrische Anordnung, sind direkte Wärmeverluste der Reaktionsbereiche an die Umgebung weitgehend unterbunden.

Gemäß einer weiteren Ausführungsvariante weisen die Gegenstrom-Reaktoreinheiten jeweils zwei zueinander beabstandete angeordnete plattenförmige Elemente, die einen als Zu- oder Abführung dienenden Kanal bilden, sowie ein die beiden plattenförmigen Elemente U-förmig umgebendes plattenförmiges Element, das mit den ersten beiden plattenförmigen Elementen jeweils einen als Ab- bzw. Zuführung dienenden Kanal bildet. Der Übergangsbereich zwischen der Zu- und der Abführung im Bereich der Biegung des U-förmigen Elementes dient als Reaktionsbereich.

Diese Gegenstrom-Reaktoreinheiten ermöglicht aufgrund der fast beliebigen Ausdehnung der plattenförmigen Elemente sehr hohe Aspektverhältnisse und damit sehr gute Wärmeaustauschbedingungen bei sehr kleinen Wärmeverlusten an die Umgebung.

Dieser Mikroreaktor weist durch die Verwendung von zum Teil gebogenen plattenförmigen Elementen einen einfachen Aufbau auf und kann damit kostengünstig hergestellt werden. Insbesondere die U-förmigen plattenförmigen Elemente der einzelnen Gegenstrom-Reaktoreinheiten können, da sie aneinandergrenzen, aus einem einzigen Stück gefertigt sein.

Die Gegenstrom-Reaktoreinheiten gemäß einer der Ausführungsvarianten können aneinander grenzen, um eine Homogenisierung der Temperatur der Reaktionsbereiche durch Wärmeleitung zu erreichen. Befinden sich zwischen den Gegenstrom-Reaktoreinheiten Zwischenräume, so können diese zum Durchleiten eines Wärmetausch-Mediums genutzt werden.

Vorteilhaft sind die Sektoren nach der zweiten Ausführungsform oder die Gegenstrom-Reaktoreinheiten nach der dritten Ausführungsform von einem als Abführungssammler oder Zuführungsverteiler dienenden äußeren im Querschnitt kreisringförmigen Raum umgeben, der mit den Abführungen bzw. den Zuführungen in radialer Richtung verbunden ist. Dies ermöglicht einen verbesserten Wärmetausch bei gleichzeitig kompakter Bauweise.

Dieser als Abführungssammler oder Zuführungsverteiler dienende kreisringförmige Raum kann von einem zweiten äußeren im Querschnitt kreisringförmigen Raum umgeben sein, der umgekehrt als Zuführungsverteiler bzw. Abfüh-

nungssammler dient und hierzu mit den Zuführungen bzw. den Abführungen in radialer Richtung verbunden ist.

Eine Hauptabführung oder Hauptzuführung kann oberhalb oder/und unterhalb des in Sektoren aufgeteilten kreisringförmigen Raumes oder/und des ersten oder/und zweiten äußeren kreisringförmigen Raumes vorgesehen sein. Diese Hauptzuführung oder Hauptabführung ist hierzu mit den als Abführung bzw. Zuführung dienenden Sektoren bzw. dem Abführungssammler bzw. dem Zuführungsverteiler in axialer Richtung verbunden. Neben des äußerst kompakten Aufbaus werden mit dieser Anordnung Wärmeverluste senkrecht zur Ebene, in der die Zu- und Abführungen angeordnet sind, minimiert.

Vorteilhaft sind die Zu- und/oder Abführungen zur guten Wärmeübertragung als Kanäle mit einer Breite in mindestens einem Bereich von <2 mm ausgebildet. Bevorzugt sind Kanal breiten von kleiner gleich 500 µm, wodurch auch bei kleinen Weglängen und/oder hohen Strömungsgeschwindigkeiten eine sehr gute Wärmeübertragung zwischen dem Produkt- und Eduktstrom erreicht wird. Besonders bevorzugt sind die Kanal breiten derart gewählt, daß entsprechende Volumenströme vorausgesetzt laminare Strömungsbedingungen vorherrschen.

Insbesondere zur Durchführung heterogen katalysierter Gasphasenreaktionen weist der Reaktionsbereich ein katalytisch aktives Material auf. Dieses kann auf einem Trägermaterial aufgebracht sein oder die den Reaktionsbereich umgebenden Wände können ein katalytisch aktives Material aufweisen, beispielsweise hieraus bestehen oder dieses als Beschichtung aufweisen.

Die Mikroreaktoren können aus einzelnen, entsprechend gebogenen plattenförmigen Teilen, wie Blechen oder Folien, oder aus einem Substrat hergestellt sein, in das entsprechende Strukturen, wie Kanäle und Hohlräume eingebracht sind, die gegebenenfalls mit einer Deckplatte abgeschlossen sind.

Geeignete Herstellungsverfahren sind insbesondere feinkwerktechnische und mikrotechnische Verfahren, wie Fräsen, Funkenerodieren, Ablatieren mittels Laserstrahlung, lithographische Verfahren unter Einsatz von Ätztechniken, insbesondere Naßätzen von Edelstählen, oder LIGA-Verfahren. Eine kostengünstige Massenfertigung kann auch mit Abformverfahren, wie Spritzgießen oder Prägen, realisiert werden. Neben Polymeren können hierbei auch präkeramische Verbindungen oder mit organisch gebundene metallische oder/und keramische Pulver verwendet werden, wozu im Verfahren gegebenenfalls ein Entbinderungsschritt und eine thermische Behandlung erforderlich sind.

Geeignete Materialien für solche Mikroreaktoren werden insbesondere im Hinblick auf die chemische Inertheit bezüglich der Edukte und Produkte, die Temperaturstabilität und Verarbeitbarkeit ausgewählt. Je nach Anwendung kommen daher insbesondere Metalle, Edelstähle, Legierungen, Halbmetalle, wie Silizium, Glas, Keramik oder Polymere, wie Thermoplaste, in Frage.

In solche Mikroreaktoren können weitere funktionelle Einheiten, wie Mischer, Wärmetauscher oder Sensoren, beispielsweise Durchflußmesser, pH-Sonden, Druck- oder Temperaturmesser, integriert werden.

Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Mikroreaktors werden anhand der folgenden schematischen Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1a einen Mikroreaktor mit spiralartiger Anordnung der Zu- und der Abführung im Querschnitt von oben,

Fig. 1b den Mikroreaktor nach **Fig. 1a** im Querschnitt von der Seite,

Fig. 2 einen Mikroreaktor mit spiralartiger Anordnung zweier Zuführungen und einer Abführung im Querschnitt

von oben,

Fig. 3a einen Mikroreaktor mit einem in als Zu- bzw. Abführung dienende Sektoren aufgeteilten kreisringförmigen Raum im Querschnitt von oben,

Fig. 3b den Mikroreaktor nach **Fig. 3a** im Querschnitt von der Seite,

Fig. 4a einen Mikroreaktor mit radial angeordneten, als Gegenstromrohre ausgebildeten Gegenstrom-Reaktoreinheiten im Querschnitt von oben,

Fig. 4b den Mikroreaktor nach **Fig. 4a** im Querschnitt von der Seite,

Fig. 5a einen Mikroreaktor mit radial angeordneten, aus plattenförmigen Elementen gebildeten Gegenstrom-Reaktoreinheiten im Querschnitt von oben,

Fig. 5b den Mikroreaktor nach **Fig. 5a** im Querschnitt von der Seite,

Fig. 5c den Mikroreaktor nach **Fig. 5a** und **5b** in perspektivischer Darstellung, geschnitten von oben sowie teilweise von der Seite.

In **Fig. 1a** ist ein Mikroreaktor **1** mit spiralartiger Anordnung der Zuführung **2** und der Abführung **3** im Querschnitt von oben schematisch dargestellt. Die Zuführung **2** und die Abführung **3** sind in einer Ebene in der Art einer Doppelspirale benachbart geführt und beide mit dem im gemeinsamen zentralen Bereich **4** liegenden Reaktionsbereich **4** verbunden. Die Pfeile deuten die Strömungsrichtung des Edukt- bzw. Produktstromes innerhalb des Mikroreaktors **1** an. Bis auf die äußere Windung ist die Zuführung **2** in der gezeigten Ebene von der Abführung **3** umgeben. Dadurch, daß der Reaktionsbereich **4** in der gezeigten Ebene von der Zu- und Abführung **2, 3** umgeben ist, sind in dieser Ebene Wärmeverluste an die Umgebung stark minimiert. Durch die benachbarte Anordnung und Fluidführung im Gegenstrom wird ein effektiver Wärmeaustausch zwischen dem Produktstrom und dem Eduktstrom ermöglicht. Im Reaktionsbereich **4** befindet sich ein Katalysatormaterial **5**.

Die **Fig. 1b** zeigt den Mikroreaktor nach **Fig. 1a** im Querschnitt von der Seite. Deutlich sichtbar ist die benachbarte Anordnung der Zuführung **2** mit der Abführung **3**, die beide mit dem Reaktionsbereich **4**, hier mit einem Katalysatormaterial **5**, verbunden sind. Zur Verminderung von Wärmeverlusten zu den die Zu- und die Abführung an den beiden Stirnflächen abschließenden Deck- und Bodenplatte **6, 7** weisen die Zuführung **2** und die Abführung **3** ein großes Verhältnis zwischen Höhe und Breite auf. Es ist auch denkbar, mehrere solcher Mikroreaktoren aufeinander zu stapeln, wodurch keine Wärmeverluste an den benachbarten abschließenden Elementen auftreten.

Der Mikroreaktor nach **Fig. 2** weist zwei Zuführungen **10** und **11** sowie eine Abführung **12** auf, die um den im zentralen Bereich **13** liegenden Reaktionsbereich **13** angeordnet und mit diesem verbunden sind. Es ist auch denkbar, drei oder mehr Zuführungen sowie zwei oder mehr, gegebenenfalls hintereinander angeordnete Reaktionsbereiche vorzusehen.

Solche in den **Fig. 1a, 1b** und **2** dargestellte Mikroreaktoren können aus spiralförmig gewundenen plattenförmigen Elementen aufgebaut sein, die an den Stirnflächen verschlossen sind, und Anschlüsse für die Zu- und die Abführung aufweisen. Denkbar ist auch, die Wandungen der Zu- und der Abführung sowie eine Bodenplatte einstückig aus einem Substrat, beispielsweise durch Mikrostrukturierung eines Polymers und anschließender galvanischer Abformung oder durch Prägen einer Aluminiumplatte, herzustellen.

In der **Fig. 3a** ist ein Mikroreaktor **20** schematisch dargestellt, der einen zylindrischen zentralen Bereich **30** umgebenden, in Sektoren **31a, 31b** aufgeteilten und im

Querschnitt kreisringförmigen Raum **29a** aufweist. Alternerende Sektoren **31a**, **31b**, hier jeweils siebzehn, dienen als Zuführung **22** bzw. als Abführung **23**. Die als Zuführung **22** dienenden Sektoren **31a** sind über den zentralen Bereich **30**, der durch einen freien Raum gebildet ist, mit den als Abführung **23** dienenden Sektoren **31b** verbunden. In diesem Beispiel dienen die dem zentralen Bereich **30** zugewandten Bereiche der als Abführung **23** dienenden Sektoren **31b** als Reaktionsbereiche **21**. Der kreisringförmige Raum **29a** weist eine Vielzahl von Sektoren auf, wodurch ein guter Wärmeaustausch zwischen den im Gegenstrom geführten Produkt- und Eduktströmen, die radial zu bzw. von dem zentralen Bereich **30** strömen, erreicht wird. In diesem Beispiel sind die als Zuführung **22** dienenden Sektoren **31a** als Kanäle etwa gleicher Breite ausgebildet, während die als Abführung **23** dienenden Sektoren **31b** einen sich radial nach außen aufweitenden Querschnitt aufweisen. Die die Zu- und Abführungen **22**, **23** begrenzenden und die Sektoren **31a**, **31b** bildenden Wände **24** sind vorteilhaft aus einem thermisch gut leitfähigen Material, beispielsweise aus Metallfolien, gebildet. Der kreisringförmige Raum **29a** ist von einem äußeren kreisringförmigen Raum **29b** umgeben, der als Zuführungsverteiler **27a** dient. Hierzu ist dieser mit einer seitlich angeordneten Hauptzuführung **27b** sowie über Schlitze **29c** mit den als Zuführung **22** dienenden Sektoren **31a** verbunden. Die Strömungsrichtungen der Edukt- und Produktströme sind als Pfeile angedeutet. In diesem Beispiel weisen die Reaktionsbereiche **21** ein auf einen Träger **26** aufgebracht katalytisch aktives Material **25** auf. Es kann auch vorteilhaft sein, ein katalytisch aktives Material in dem zentralen Bereich **30** vorzusehen. Um eine Temperaturänderung, beispielsweise beim Starten einer Umsetzung im Mikroreaktor, im zentralen Bereich **30** des Mikroreaktors **20** zu erreichen, kann es vorteilhaft sein, eine Heiz- oder Kühlvorrichtung, beispielsweise einen Wärmetauscher, im zentralen Bereich **30** anzuordnen.

In dem in **Fig. 3b** gezeigten seitlichen Querschnitt des Mikroreaktors **20** nach **Fig. 3a** ist ebenfalls der Verlauf der Edukt- und der Produktströme anhand von Pfeilen angedeutet. Zu erkennen ist ein Reaktionsbereich **21** mit einem auf dem Träger **26** aufgebracht katalytischen Material **25**, der über die Zuführung **22**, den Zuführungsverteiler **27a** mit der seitlichen Hauptzuführung **27b** sowie über die Abführung **23** mit den Hauptabführungen **28** verbunden ist. Die Hauptabführungen **28** sind an beiden Stirnseiten des Mikroreaktors **20** oberhalb und unterhalb sowohl des zentralen Bereichs **30**, des in Sektoren aufgeteilten kreisringförmigen Raumes **29a** als auch des äußeren kreisringförmigen Raumes **29b** angeordnet und axial mit den als Abführung **23** dienenden Sektoren **31b** verbunden.

In der **Fig. 4a** ist ein Mikroreaktor **40** im Querschnitt von oben dargestellt, der in der gezeigten Ebene fünf Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** aufweist. Jede Mikroreaktoreinheit **41** umfaßt eine von einem inneren Rohr **44** gebildete Zuführung **43**, die in der gezeigten Ebene von der der als äußeren Rohr **42** ausgebildeten Abführung **45** umgeben ist und über den an dem verschlossenen Ende des äußeren Rohres **42** gelegenen Reaktionsbereich **46** mit dieser verbunden ist. Die einzelnen Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** sind derart radial angeordnet, daß die fluidisch nicht miteinander verbundenen Reaktionsbereiche **46** im zentralen Bereich **46'** benachbart liegen. In diesem Beispiel ist der Bereich **46'** zwischen den Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** leer, wodurch eine Wärmeübertragung an benachbarte Gegenstrom-Reaktoreinheiten überwiegend durch Wärmestrahlung erfolgt. Durch die benachbarte Anordnung der Reaktionsbereiche **46** ist eine Wärmeübertragung an die Umgebung minimiert. Es ist auch denkbar, den freien Bereich **46'** zum

Durchleiten eines Wärmetausch-Mediums, beispielsweise in der Startphase einer Reaktion, zur Temperaturregelung oder um überschüssige Wärme abzuführen, zu nutzen. Die Abführungen **45** der Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** sind mit einem als kreisringförmigen Raum **49b** ausgebildeten Abführungssammler **49a** verbunden. Die Zuführungen **43** beginnen in einem gemeinsamen Zuführungsverteiler **47a**, der als zweiter äußerer kreisringförmiger Raum **47b** den Abführungssammler **49a** umgibt.

In **Fig. 4b** ist der Mikroreaktor **40** nach **Fig. 4a** im Querschnitt von der Seite gezeigt. Die Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** umfassen jeweils ein äußeres Rohr **42** und ein koaxial angeordnetes inneres Rohr **44**, wobei beide Rohre einen runden Querschnitt aufweisen. Das äußere Rohr **42** ist an einem Ende halbkugelförmig verschlossen. Das innere Rohr **44** bildet die Zuführung **43**, die von der Abführung **45** umgeben ist. Im Übergangsbereich zwischen der Zuführung **43** und der Abführung **45**, bevorzugt im Bereich des verschlossenen Endes des äußeren Rohres **42**, befindet sich der Reaktionsbereich **46**. Die Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** sind im Innern des kreisringförmig ausgebildeten Abführungssammlers **49a** radial in drei Ebenen um den zylindrischen zentralen Bereich **46'** angeordnet. Der Abführungssammler **49a** verbindet die einzelnen Abführungen **45** mit den Hauptabführungen **49c**, die an beiden Stirnflächen des zylindrischen Mikroreaktors **40** angeordnet sind. Der als zweiter äußerer kreisringförmiger Raum **47b** ausgebildete Zuführungsverteiler **47** verbindet die Hauptzuführung **48** mit den einzelnen Zuführungen **43**. Die Mikroreaktoreinheiten **41** sind derart radial um den zentralen Bereich **46'** angeordnet, daß die Reaktionsbereiche **46** benachbart sind. Aufgrund stark verringerter Wärmestrahlungsverluste an die Umgebung ist sowohl eine effektive Konzentrierung als auch eine Homogenisierung der Reaktionswärme im zentralen Bereich **46'** des Mikroreaktors **40** möglich. Ein großer Teil der im Produktstrom enthaltenen Reaktionswärme kann im Bereich der Zuführungen **43** und des Zuführungsverteilers **47** an den Eduktstrom abgegeben werden.

Der Mikroreaktor **40** kann aus drei koaxial ineinander liegenden Hohlzylindern **80a**, **80b**, **80c**, beispielsweise aus Metallfolie, aufgebaut sein. Die äußeren Rohre **42** der Gegenstrom-Reaktoreinheiten **41** stellen dabei Ausstülpungen des innersten Hohlzylinders **80a** dar. Die mit dem mittleren Hohlzylinder **80b** verbundenen inneren Rohre **44** der Gegenstrom-Reaktoreinheiten stehen nicht in Kontakt mit den sie umgebenden äußeren Rohren **42**, so daß auf Grund dieser freien Beweglichkeit auch große Temperaturdifferenzen nicht zu inneren Spannungen der Hohlzylinderanordnung **80a**, **80b**, **80c** führen.

Der in den **Fig. 5a**, **5b** und **5c** schematisch dargestellte Mikroreaktor **50** weist fünf Gegenstrom-Reaktoreinheiten **51** auf, die einen zentralen Bereich **60'** derart umgeben, daß die Reaktionsbereiche **60** der einzelnen Gegenstrom-Reaktoreinheiten **51** benachbart zueinander im zentralen Bereich **60'** liegen. Jede Gegenstrom-Reaktoreinheit **51** weist eine Zuführung **56** auf, die in der in **Fig. 5a** gezeigten Ebene von der Abführung **58** umgeben ist, wobei der Verbindungsbe-
reich zwischen der Zu- und Abführung den Reaktionsbereich **60** bildet. Die von den Zuführungen **56** und den Abführungen **58** geführten Edukt- bzw. Produktströme, deren Verlauf hier mit Pfeilen angedeutet ist, laufen radial zu bzw. von den im zentralen Bereich **60'** gelegenen Reaktionsbereichen **60**. Die Gegenstrom-Reaktoreinheiten **51** sind von einem als Abführungssammler **59a** dienenden kreisringförmigen Raum **59b** umgeben, der mit den Abführungen **58** verbunden ist. Der Abführungssammler **59a** wiederum ist von einem als zweiten äußeren kreisringförmigen Raum **57b** ausgebildeten Zuführungsverteiler **57a** umgeben, der von ei-

ner seitlich am Mikroreaktor **50** angeordneten Hauptzuführung **61** den Eduktstrom auf die einzelnen Zuführungen **56** verteilt. Oberhalb und unterhalb des zylindrischen Mikroreaktors **50** befindet sich eine Hauptabführung **62**, die die Produkte axial aus dem Abführungssammler **59a** abführt.

Jede Zuführung **56** einer Gegenstrom-Reaktoreinheit **51** wird durch zwei zueinander beabstandet angeordnete plattenförmige Elemente **54**, **55** gebildet. Diese sind von einem U-förmigen plattenförmigen Element **53** derart umgeben, daß in den beiden Zwischenräumen zwischen den Elementen **54** bzw. **55** und dem U-förmigen Element **53** jeweils ein Kanal gebildet wird, der als Abführung **58** dient. Der Übergangsbereich zwischen der Zuführung **56** und den beiden Abführungen **58**, insbesondere der Bereich der Biegung des U-förmigen Elementes **53**, dient als Reaktionsbereich **60**. Insbesondere aus **Fig. 5c** wird deutlich, daß in diesem Ausführungsbeispiel die U-förmigen Elemente **53** der fünf Gegenstrom-Reaktoreinheiten **51** aus einem einzigen entsprechend geformten plattenförmigen Element gebildet sind, das einen Hohlzylinder **90a** mit U-förmigen Ausstülpungen darstellt. Jeweils zwei eine Wand einer Zuführung **56** bildende plattenförmige Elemente **54** zweier benachbarter Gegenstrom-Reaktoreinheiten **51** sind aus einem plattenförmigen Element gebildet. Diese plattenförmigen Elemente bilden auch die als mittlerer Hohlzylinder **90b** bezeichnete Wand zwischen dem als Abführungssammler **59a** dienenden kreisringförmigen Raum **59b** und dem zweiten äußeren kreisförmigen Raum **57b**, der als Zuführungsverteiler **57a** dient. Der äußere Hohlzylinder **90c** bildet die äußere Wand des Zuführungsverteilers **57a**. Wie aus **Fig. 5c** ersichtlich, sind die Hohlzylinder **90a**, **90b**, **90c** mit einer Bodenplatte **63** verbunden, die zur Ableitung der Produktströme vom Abführungssammler **59a** in die Hauptabführung **62** Öffnungen **64** aufweist. Entsprechend ist die Verbindung durch eine hier nicht dargestellte Deckplatte zu der oberhalb angeordneten Hauptabführung **62** ausgebildet. Dieser kompakte Mikroreaktor **50** besteht aus wenigen, einfach herzustellenden Elementen und ist damit als kostengünstiges Massenprodukt in vielen Bereichen, beispielsweise in der Brennstoffzellentechnik oder/und Kraftfahrzeugtechnik, einsetzbar.

Die Mikroreaktoren weisen eine äußerst kompakte Bauweise auf, bei der die Reaktionsbereiche in mindestens einer Ebene von Edukt- bzw. Produktströmen umgeben sind. Durch die Gegenstromführung wird von den Reaktionsbereichen abgegebene Wärme diesen wieder zugeführt, so daß gegenüber bekannten Mikroreaktoren deutlich höhere Reaktionstemperaturen erreicht werden können. Damit eröffnen diese Mikroreaktoren ein weiteres bisher für Mikroreaktoren nicht in Frage kommendes Spektrum insbesondere an chemischen Umsetzungen bei hohen Temperaturen.

Bezugszeichenliste

1 Mikroreaktor
2 Zuführung
3 Abführung
4 Reaktionsbereich
4' zentraler Bereich
5 Katalysatormaterial
6 Deckplatte
7 Bodenplatte
10 Zuführung
11 Zuführung
12 Abführung
13 Reaktionsbereich
13' zentraler Bereich
20 Mikroreaktor
21 Reaktionsbereich

22 Zuführung
23 Abführung
24 Wand
25 Katalysatormaterial
26 Katalysatorträger
27a Zuführungsverteiler
27b Hauptzuführung
28 Hauptabführung
29a kreisringförmiger Raum
29b äußerer kreisringförmiger Raum
29c Schlitz
30 zylindrischer zentraler Bereich
31a, **31b** Sektor
40 Mikroreaktor
41 Gegenstrom-Reaktoreinheit
42 äußeres Rohr
43 Zuführung
44 inneres Rohr
45 Abführung
46 Reaktionsbereich
46' zentraler Bereich
47a Zuführungsverteiler
47b zweiter äußerer kreisringförmiger Raum
48 Hauptzuführung
49a Abführungssammler
49b äußerer kreisringförmiger Raum
49c Hauptabführung
50 Mikroreaktor
51 Gegenstrom-Reaktoreinheit
53 U-förmig gebogenes plattenförmiges Element
54 plattenförmiges Element
55 plattenförmiges Element
56 Zuführung
57a Zuführungsverteiler
57b zweiter äußerer kreisringförmiger Raum
58 Abführung
59a Abführungssammler
59b äußerer kreisringförmiger Raum
60 Reaktionsbereich
60' zentraler Bereich
61 Hauptzuführung
62 Hauptabführung
63 Bodenplatte
64 Öffnung
80a, **80b**, **80c** Hohlzylinder
90a, **90b**, **90c** Hohlzylinder

Patentansprüche

- Verfahren zur Durchführung chemischer Umsetzungen in einem Mikroreaktor, bei dem ein oder mehrere Eduktströme zu mindestens einem Reaktionsbereich geführt werden, und bei dem ein oder mehrere Produktströme vom Reaktionsbereich im Gegenstrom zu dem bzw. den Eduktströmen und in thermischem Kontakt mit diesem bzw. diesen geführt werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Minimierung thermischer Verluste aus dem Reaktionsbereich an die Umgebung der bzw. die Edukt- und Produktströme spiralartig oder radial in mindestens einer Ebene zu bzw. von dem in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors angeordneten Reaktionsbereich geführt werden.
- Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Edukt- und Produktströme jeweils in alternierenden Sektoren eines einen zylindrischen zentralen Bereich umgebenden, im Querschnitt kreisringförmigen Raumes radial zu bzw. von dem zentralen Bereich geführt werden, wobei der zentrale Bereich und/

oder Bereiche der Sektoren als Reaktionsbereich dient bzw. dienen.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Edukt- und Produktströme radial zu bzw. von mehreren fluidisch voneinander getrennten und in einem zentralen Bereich des Mikroreaktors und benachbart zueinander liegenden Reaktionsbereichen geführt werden, wobei jeweils mindestens ein Edukt- und Produktstrom in einer Gegenstrom-Reaktoreinheit geführt werden, die jeweils mindestens einen Reaktionsbereich aufweist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß um die Gegenstrom-Reaktoreinheiten ein Wärmetausch-Medium geleitet wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Eduktströme und/oder die Produktströme über einen äußeren kreisringförmigen Raum zu- bzw. abgeführt werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der bzw. die Edukt- und/oder Produktströme in Kanälen mit einer Breite in mindestens einem Bereich von <2 mm geführt werden.

7. Mikroreaktor (1; 20; 40; 50) zur Durchführung chemischer Umsetzungen mit einer oder mehreren Zuführungen (2; 10, 11; 22; 43; 56) für Edukte und einer oder mehreren Abführungen (3; 12; 23; 45; 58) für Produkte sowie mindestens einem mit der bzw. den Zu- und Abführungen (2, 3; 10, 11, 12; 22, 23; 43, 45; 56, 58) verbundenen Reaktionsbereich (4; 13; 21; 46; 60), wobei die Abführungen im Gegenstrom zu der bzw. den Zuführungen und in thermischem Kontakt mit dieser bzw. diesen angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß zur Minimierung thermischer Verluste aus dem Reaktionsbereich (4; 13; 21; 46; 60) an die Umgebung die Zuführung (2) und Abführung (3; 12) bzw. die Zuführungen (10, 11; 22; 43; 56) und Abführungen (23; 45; 58) spiralartig oder radial in mindestens einer Ebene um den in einem zentralen Bereich (4; 13; 30; 46; 60) des Mikroreaktors (1; 20; 40; 50) liegenden Reaktionsbereich (4; 13; 21; 46; 60) angeordnet sind.

8. Mikroreaktor (20) nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch einen zylindrischen zentralen Bereich (30), einen diesen umgebenden, in Sektoren (31a, 31b) aufgeteilten und im Querschnitt kreisringförmigen Raum (29a),

wobei alternierende Sektoren (31a, 31b) des kreisringförmigen Raumes als Zu- bzw. Abführung (22, 23) dienen,

wobei die als Zuführung (22) dienenden Sektoren (31a) über den zentralen Bereich jeweils mit den als Abführung (23) dienenden Sektoren (31b) verbunden sind, und

wobei der zentrale Bereich (30) und/oder Bereiche der Sektoren (31a, 31b) als Reaktionsbereich (21) dient bzw. dienen.

9. Mikroreaktor (40; 50) nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Zu- und Abführungen (43, 45; 56, 58) radial in mindestens einer Ebene um mehrere fluidisch voneinander getrennte und in einem zentralen Bereich (46; 60) des Mikroreaktors (40; 50) benachbart zueinander liegende Reaktionsbereiche (46; 60) angeordnet sind, wobei jeweils mindestens eine Zuführung (43; 56) und Abführung (45; 58) sowie mindestens ein Reaktionsbereich (46; 60) in einer Gegenstrom-Reaktoreinheit (41; 51) enthalten sind.

10. Mikroreaktor (40) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Gegenstrom-Reaktoreinheiten (41) jeweils ein Gegenstromrohr, umfassend ein äußeres

res an einem Ende verschlossenes Rohr (42) und ein koaxial zum äußeren Rohr beabstandetes inneres Rohr (44), aufweisen, wobei das innere Rohr (44) als Zu- oder Abführung (43) und der Bereich zwischen dem äußeren und dem inneren Rohr als Ab- bzw. Zuführung (45) dient, und wobei der Übergangsbereich zwischen der Zu- und der Abführung im Bereich des verschlossenen Endes des äußeren Rohrs als Reaktionsbereich (46) dient.

11. Mikroreaktor nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Gegenstrom-Reaktoreinheiten in zwei oder mehr Ebenen radial um einen zylindrischen zentralen Bereich angeordnet sind.

12. Mikroreaktor nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Gegenstrom-Reaktoreinheiten im Raum radial um einen zentralen kugelförmigen Bereich angeordnet sind.

13. Mikroreaktor (50) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Gegenstrom-Reaktoreinheiten (51) jeweils zwei zueinander beabstandet angeordnete, einen als Zu- oder Abführung (56) dienenden Kanal bildende plattenförmige Elemente (54, 55) sowie ein die beiden plattenförmigen Elemente U-förmig umgebendes und mit diesen jeweils einen als Ab- bzw. Zuführung (58) dienenden Kanal bildendes plattenförmiges Element (53) aufweisen, wobei der Übergangsbereich zwischen der Zu- und der Abführung im Bereich der Biegung des U-förmigen Elementes als Reaktionsbereich (60) dient.

14. Mikroreaktor nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der die Gegenstrom-Reaktoreinheiten aufweisende zentrale Bereich zum Durchleiten eines Wärmetausch-Mediums ausgebildet ist.

15. Mikroreaktor (20; 40; 50) nach einem der Ansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Sektoren (31a, 31b) oder die Gegenstrom-Reaktoreinheiten (41; 51) von einem als Abführungssammler (49a, 59a) oder Zuführungsverteiler (27a) dienenden äußeren im Querschnitt kreisringförmigen Raum (29b; 49b; 59b) umgeben sind, der mit den Abführungen (45; 58) bzw. den Zuführungen (22) in radialer Richtung verbunden ist.

16. Mikroreaktor (40; 50) nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß der äußere, als Abführungssammler (49a; 59a) oder Zuführungsverteiler dienende kreisringförmige Raum (49b; 59b) von einem zweiten äußeren, als Zuführungsverteiler (47a; 57a) bzw. Abführungssammler dienenden im Querschnitt kreisringförmigen Raum (47b; 57b) umgeben ist, der mit den Zuführungen (43; 56) bzw. den Abführungen in radialer Richtung verbunden ist.

17. Mikroreaktor (20; 40; 50) nach Anspruch 8 bis 16, gekennzeichnet durch eine oberhalb oder/und unterhalb des in Sektoren aufgeteilten kreisringförmigen Raumes (29a) oder/und des ersten oder/und zweiten äußeren kreisringförmigen Raumes (29b; 49b, 47b; 59b, 57b) angeordnete Hauptabführung (28; 49c; 62) oder Hauptzuführung, die hierzu mit den als Abführung (23) bzw. Zuführung dienenden Sektoren (31b) bzw. dem Abführungssammler (49a; 59a) bzw. dem Zuführungsverteiler in axialer Richtung verbunden ist.

18. Mikroreaktor nach einem der Ansprüche 7 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Zu- und/oder Abführungen als Kanäle in mindestens einem Bereich mit einer Breite von <2 mm ausgebildet sind.

19. Mikroreaktor nach einem der Ansprüche 7 bis 18, gekennzeichnet durch gegebenenfalls auf einen Träger aufgebracht katalytisch aktives Material im Reakti-

onsbereich.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

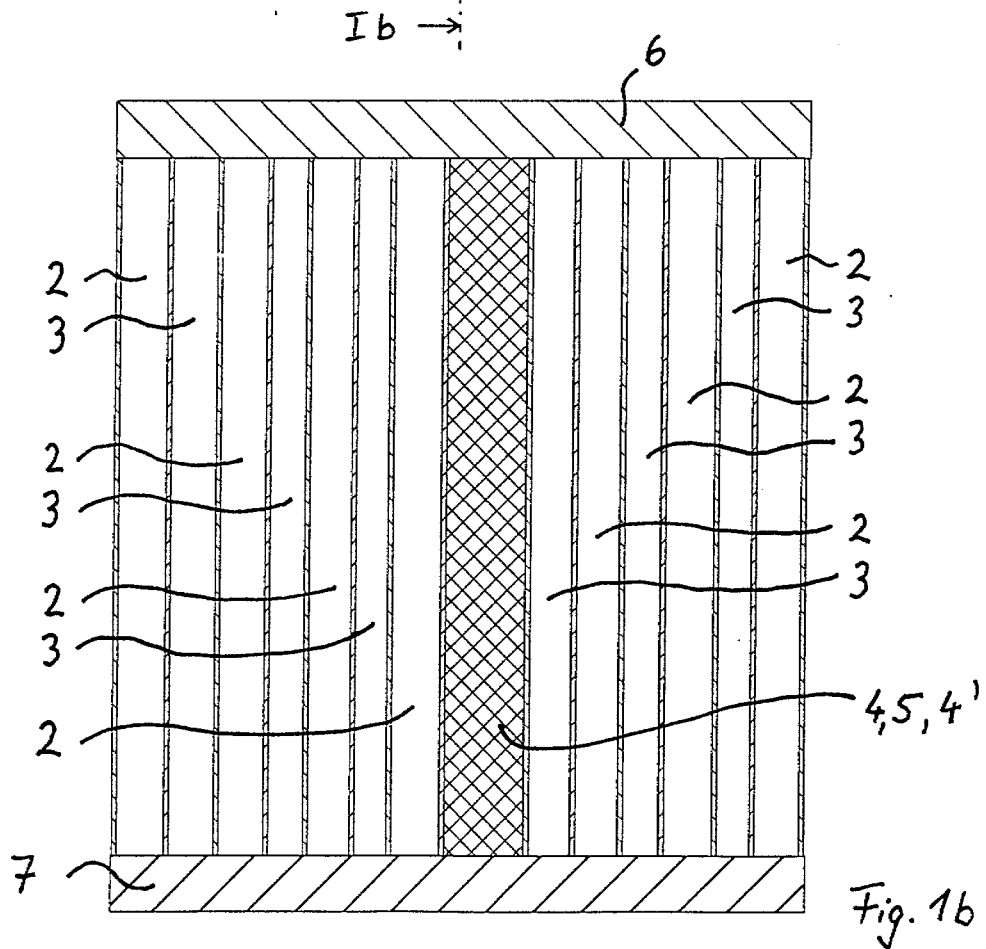
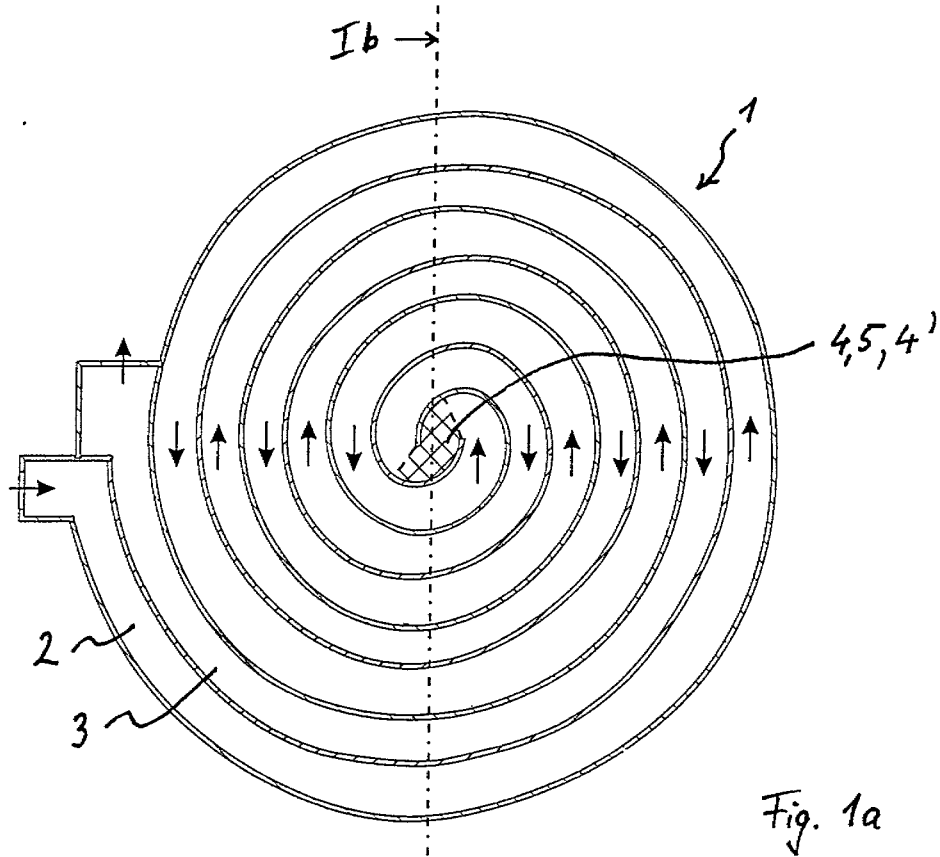
50

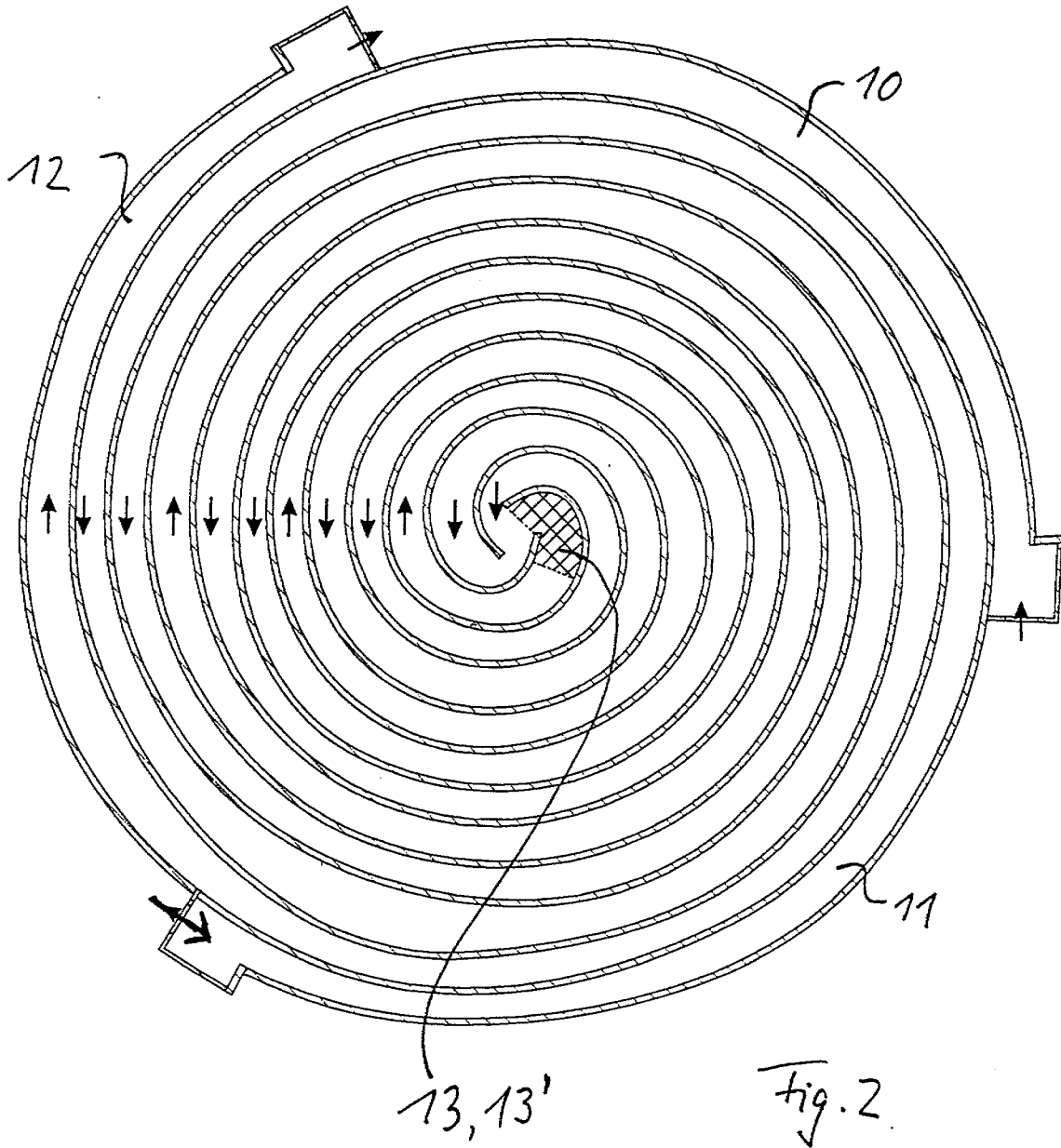
55

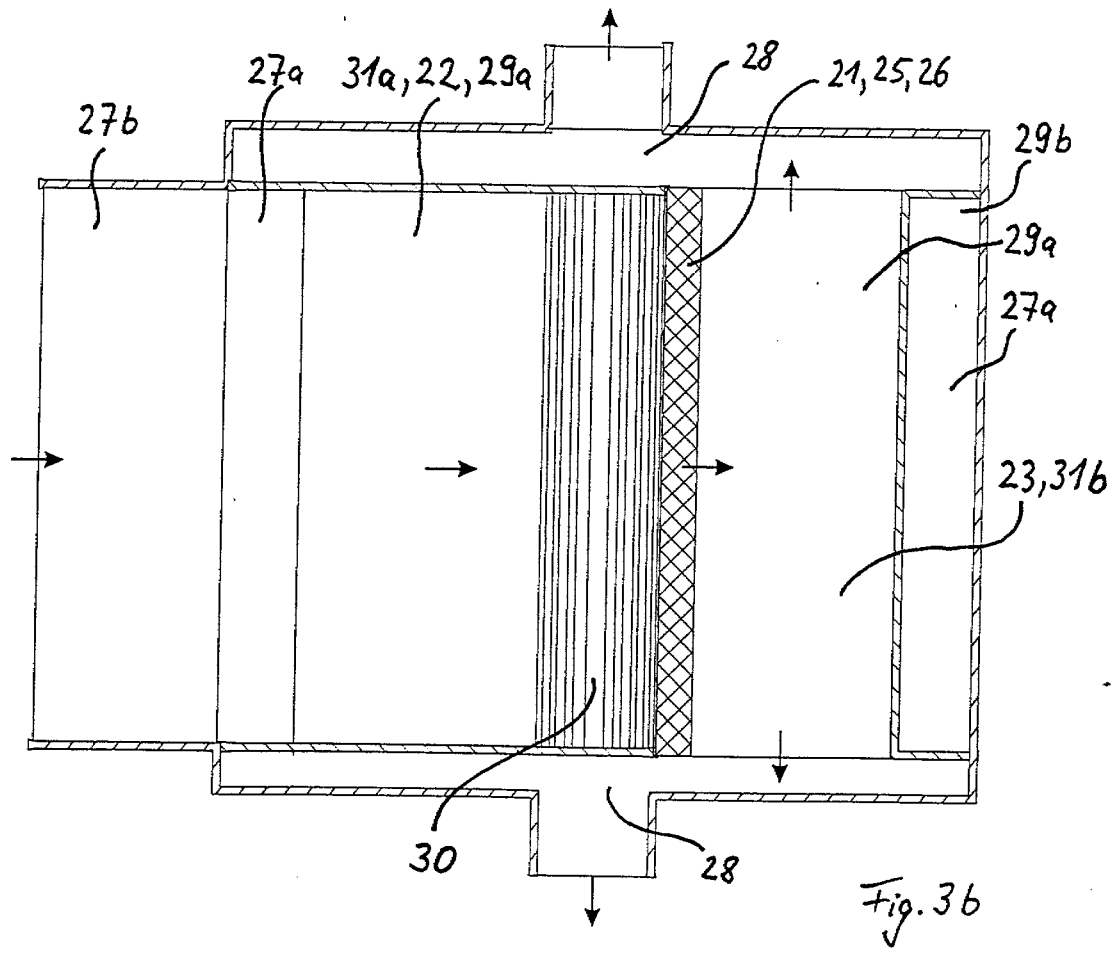
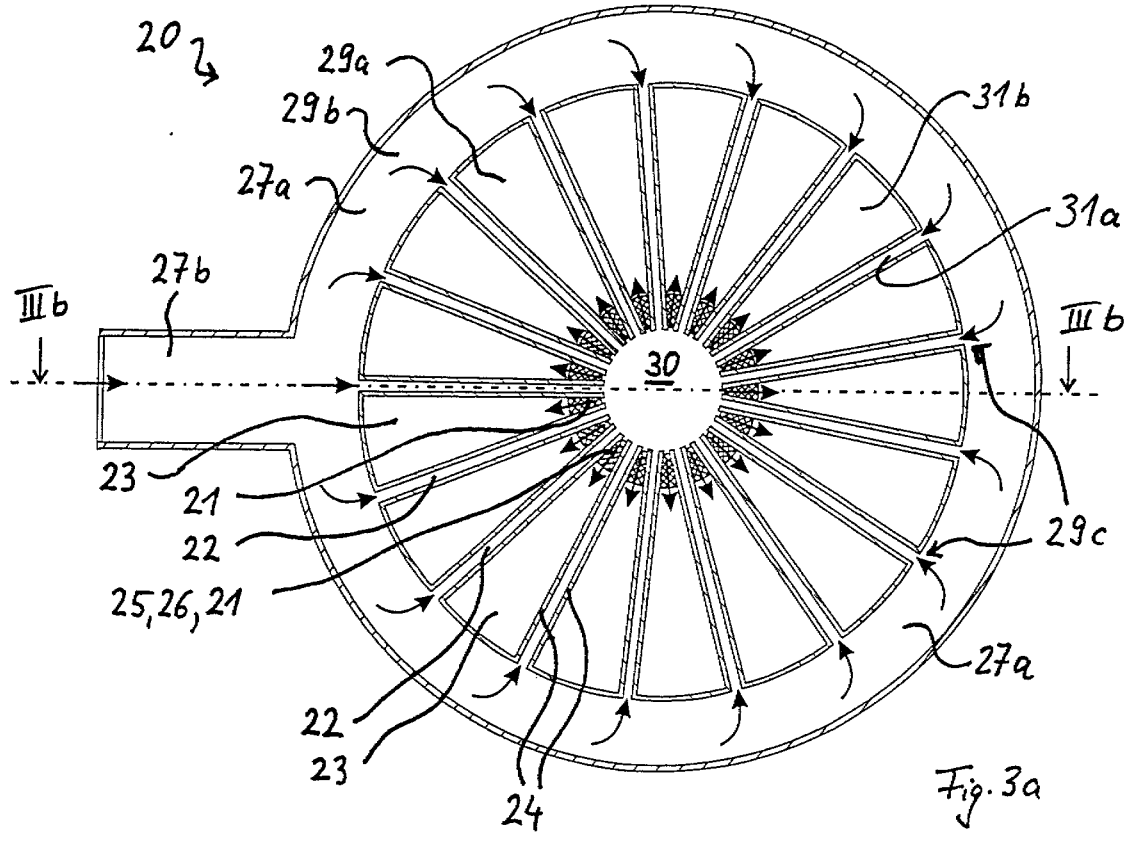
60

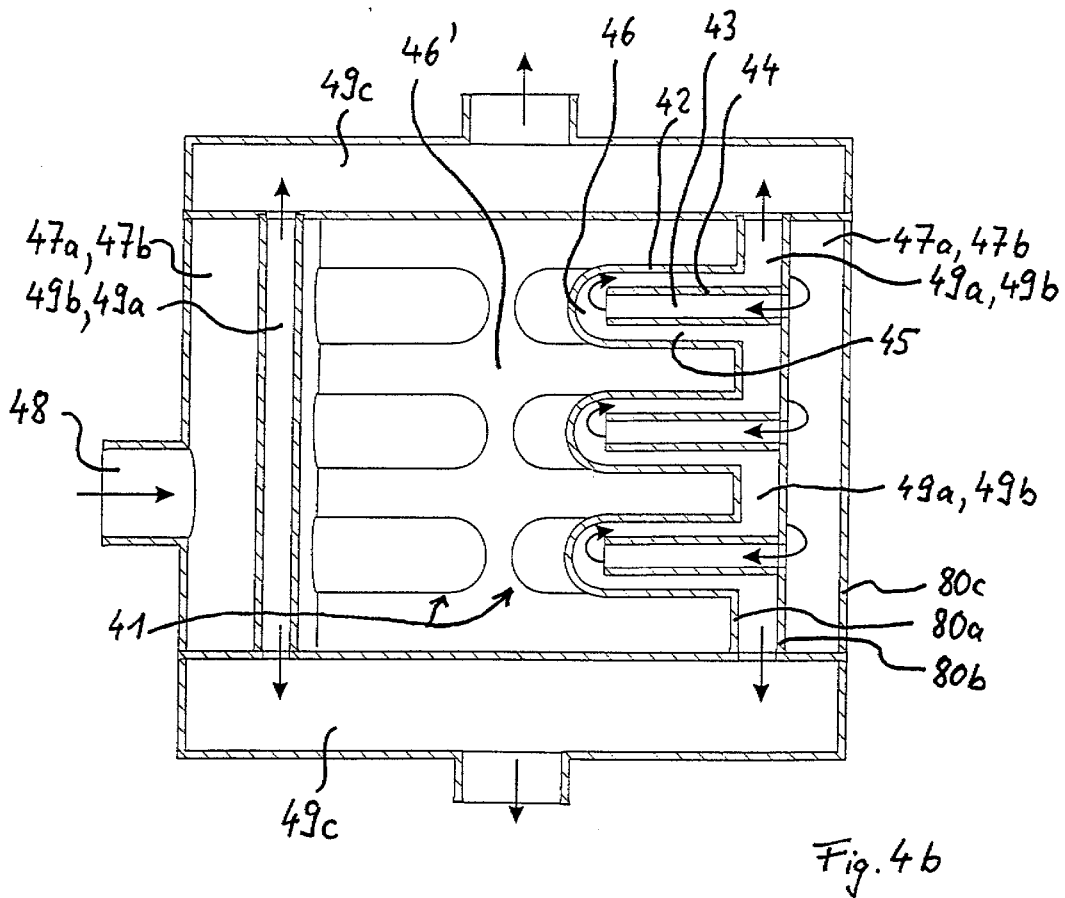
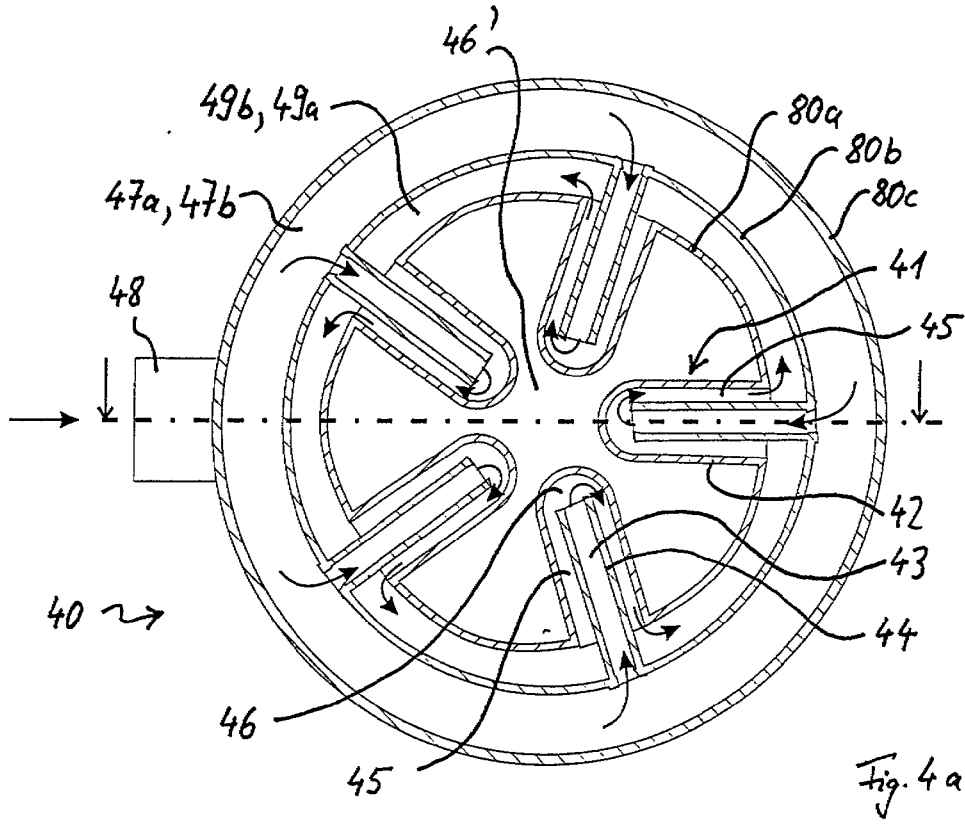
65

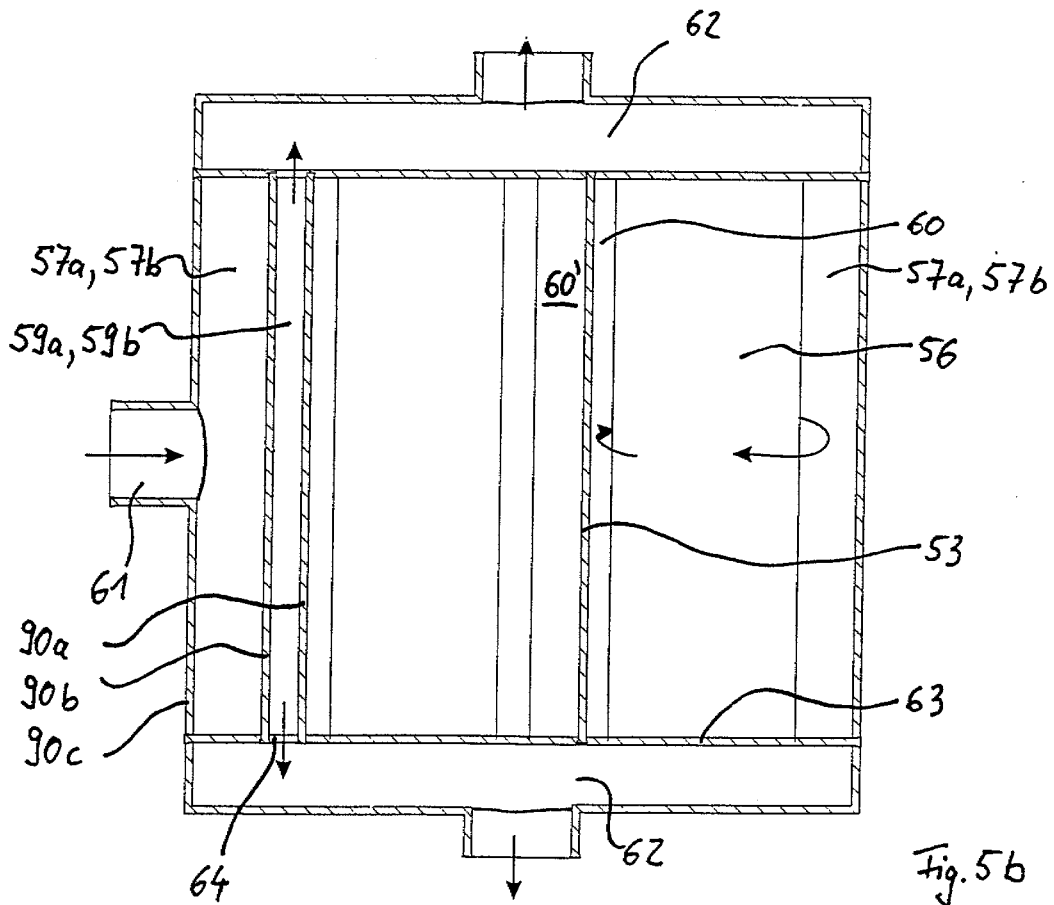
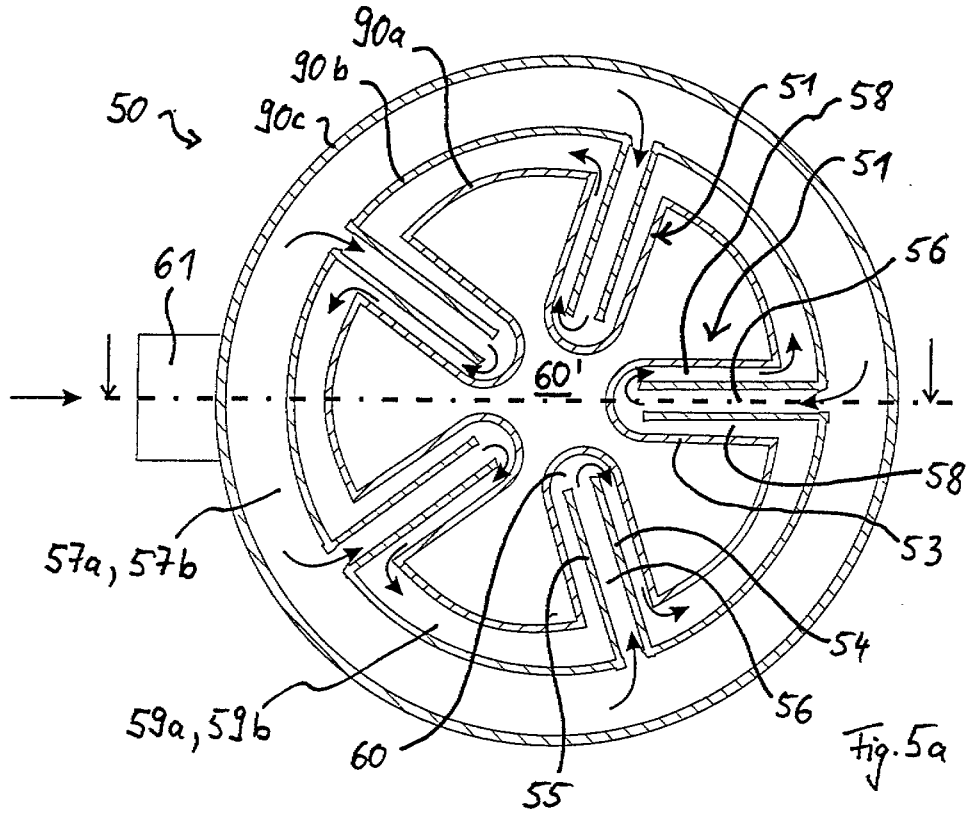
- Leerseite -











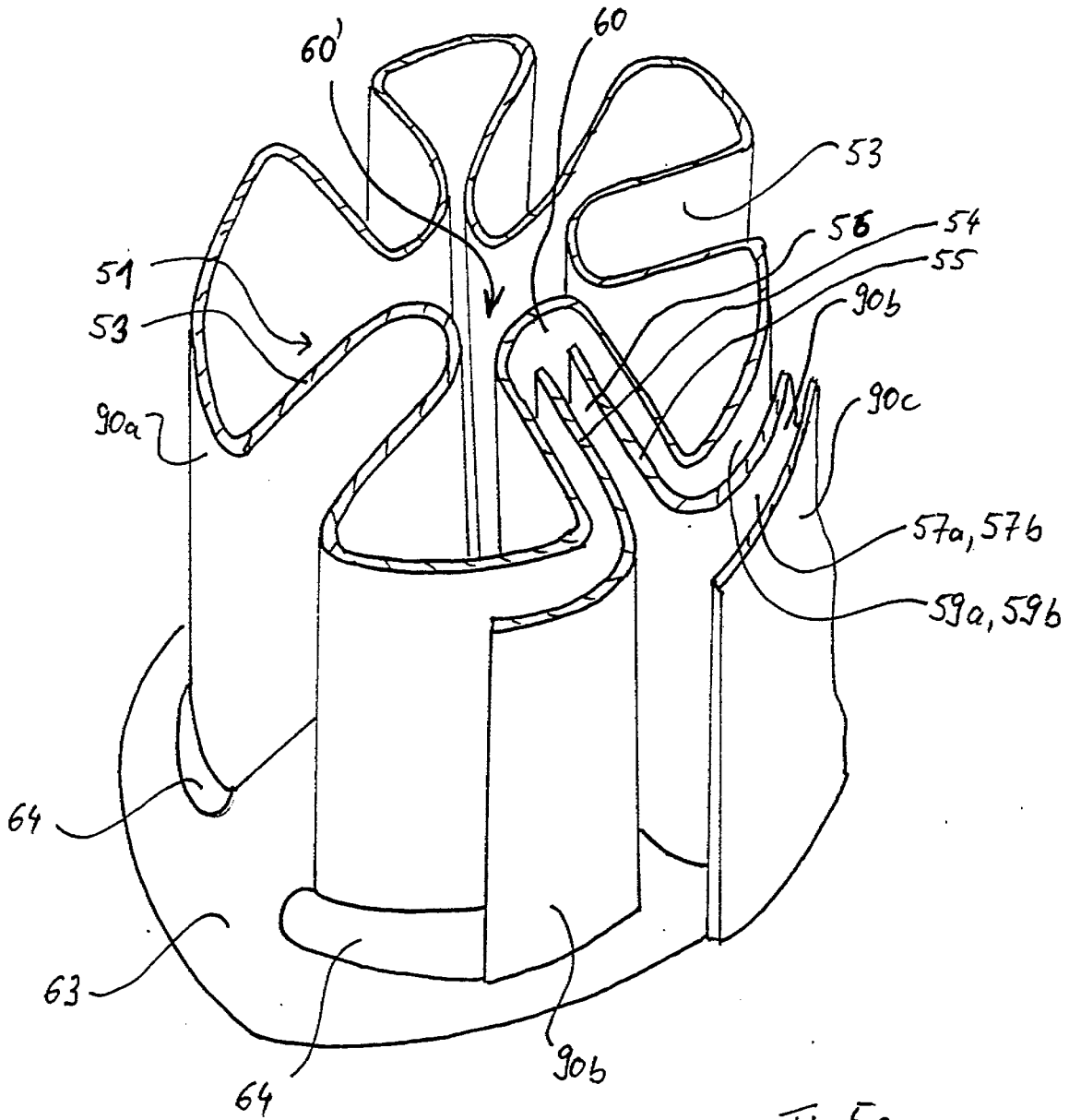


Fig. 5c