



(10) **DE 10 2019 124 650 A1** 2021.03.18

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 124 650.4**  
(22) Anmeldetag: **13.09.2019**  
(43) Offenlegungstag: **18.03.2021**

(51) Int Cl.: **C12M 1/04 (2006.01)**  
**C12P 7/02 (2006.01)**  
**C12P 1/04 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Karlsruher Institut für Technologie, 76131  
Karlsruhe, DE**

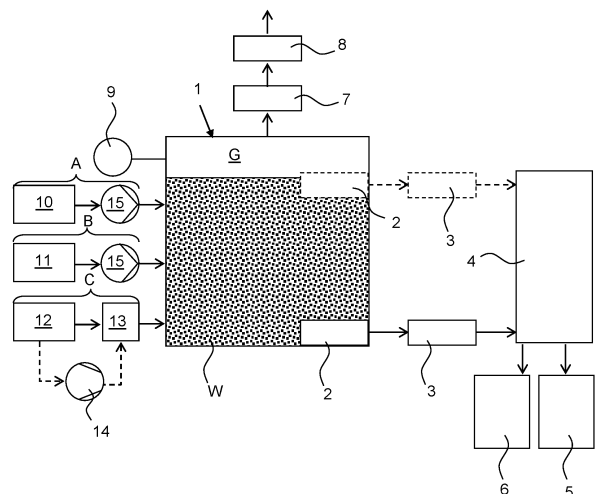
(72) Erfinder:  
**Boukis, Nikolaos, Dr., 76137 Karlsruhe, DE;  
Sauer, Jörg, Prof. Dr., 76135 Karlsruhe, DE; Stoll,  
Katharina, 76131 Karlsruhe, DE; Weiss, Karl,  
75045 Walzbachtal, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung stellt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei einem Prozessdruck, der in einem Bereich von 1,1 bis 200 bar, bevorzugt 2 bis 20 bar, liegt, bereit. Dazu weist die Vorrichtung einen Reaktor (1) auf, in den zumindest zwei Zuführvorrichtungen für Edukt und Zusatzstoffe münden, und der mit einem Gasauslass verbunden ist, der eine Druckregelungseinrichtung (7) sowie eine Auslassvorrichtung für eine wässrige Lösung (W) aufweist. Erfindungsgemäß ist die Auslassvorrichtung eine pumpenlos betriebene Auslassvorrichtung mit einer Auslassleitung (2) mit einem zeitgesteuerten Hochdruckventil (3) zur Steuerung einer Öffnungs- und Schließzeit.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas.

**[0002]** Gasgemische aus Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid werden als Synthesegas bezeichnet, weil daraus über gut bekannte chemische Wege verschiedene Chemikalien synthetisiert werden können. Solche Synthesegase entstehen zum Beispiel bei der Vergasung organischer Materie, bei der Eisenverhüttung sowie über Elektrolyse von Wasser und Kohlenstoffdioxid. Um chemische Synthesen mit diesen Synthesegasen zu verwirklichen, ist die Nutzung von Edelmetallkatalysatoren für die Beschleunigung der gewünschten chemischen Reaktionen der übliche Weg. Trotzdem werden in der Regel bei der Reaktion hohe Drücke (weit über 10 bar) und Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius sowie komplizierte Anlagen benötigt. Oft müssen gefährliche organische Lösungsmittel eingesetzt werden. Die Edelmetallkatalysatoren sind sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen; vor allem Schwefel-, Chlor- oder cyanidhaltige Verbindungen müssen vor dem ersten Kontakt mit dem Katalysator vollständig entfernt werden.

**[0003]** Ein relativ neuer Weg für die Synthese von Chemikalien wie Säuren und Alkoholen aus Synthesegas sind enzymatisch katalysierte Reaktionen. Enzyme sind teuer und die zu erwartenden Produkte haben oft niedrige Marktpreise. Einen Ausweg bieten lebende Bakterien, welche die nötigen Enzyme beinhalten und sich selbst in der Reaktionssuspension vermehren. Diese Ganzzellenkatalysatoren haben ein großes Anwendungspotential in einer zukünftigen nachhaltigen Wirtschaft, die auf minderwertigen Eingangsstoffen (z. B. Abfallbiomasse) basiert. Zwar ist die Bakteriensuspension preiswert, aber es verbleiben einige Probleme bei der Fermentation von Synthesegas. Die Löslichkeit der Synthesegaskomponenten in der wässrigen Lösung der Bakteriensuspension ist relativ gering, was eine niedrige Raumzeit Ausbeute nach sich zieht.

**[0004]** Um diesem Problem zu begegnen und die Sättigungskonzentrationen zu erhöhen, sind Batch- oder Semi-batch Hochdruck-Rührkessel-Reaktorsysteme bekannt, die eine kontinuierliche Zufuhr von Synthesegas aufweisen, z. B. aus „Syn-gas Fermentation at Elevated Pressure“, A. Infantes et al., Chemie Ingenieur Technik, 2018, 90, Nr. 9, 1283-1284, und „Formic Acid Formation by Clostridium ljungdahlii at Elevated Pressures of Carbon Dioxide and Hydrogen“, F. Oswald et al., Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Feb. 2018, Vol. 6, Article 6.

**[0005]** Beim Batchbetrieb liegt allerdings ein weiteres Problem vor: Aufgrund von Nährstoffmangel sterben die Bakterien nach einiger Zeit ab. Anschließend muss der Reaktor geöffnet, gereinigt, sterilisiert und wieder angefahren werden. Dies resultiert in einer Minderung der Verfügbarkeit des Reaktors und höheren Betriebskosten. Die Sterilisation des Reaktors wird benötigt, um sicher zu stellen, dass nur die gewünschten Bakterien im Reaktor wachsen, da es ansonsten zu unerwünschten Produkten oder gar zur Vermehrung schädlicher Bakterien kommen kann.

**[0006]** Unbegrenzter oder zumindest sehr langer ununterbrochener Betrieb mit Produktbildung ist nur mit einer kontinuierlichen Betriebsweise möglich. Für den Dauerbetrieb einer Gasfermentationsanlage ist es notwendig, den Bakterien neben Synthesegas auch Spurenelemente- und Vitaminlösung in Form einer wässrigen Nährlösung zuzuführen. Ebenfalls notwendig ist es, die Produkte der bakteriellen Aktivität (Stoffwechselprodukte) kontinuierlich von der Fermentationsbrühe abzuziehen und somit deren Konzentration zu regeln.

**[0007]** Es gibt etliche Beispiele für den kontinuierlichen Betrieb, der unter atmosphärischem Druck realisiert wird. In „Ethanol production by syngas fermentation in a continuous stirred tank bioreactor using Clostridium ljungdahlii“, Acharya et al., Biofuels (2017), DOI: 10.1080/17597269.2017.1316143, und „Sustainable ethanol fermentation from synthesis gas by Clostridium ljungdahlii in a continuous stirred tank bioreactor“, Mohammadi et al., J. Chem. Technol. Biotechnol. 2012; 87, 837-843, wird beschrieben, wie nicht nur Synthesegas kontinuierlich, sondern auch Nährlösung mittels einer ersten Pumpe dem unter atmosphärischen Druck betriebenen Laborreaktor zugeführt wird und wie aus dem Laborreaktor die wässrige Phase über eine zweite Pumpe kontinuierlich abgezogen wird.

**[0008]** Ferner ist aus US 9,834,792 B2 ein Mehrstufen-Verfahren zur Umwandlung einer C1-Kohlenstoffquelle wie Synthesegas in gewünschte Endprodukte bekannt. Das Verfahren umfasst das parallele Aufteilen des Synthesegasstroms auf mehrere Bioreaktorstufen, während Flüssigprodukte sukzessive der Reihe nach von einer ersten Reaktorstufe zu den stromabwärts liegenden Reaktorstufen zugeführt werden. Das Verfahren findet bei im Wesentlichen atmosphärischem Druck statt, wobei die Bioreaktoren miteinander zur Weiterleitung der Flüssigprodukte mit Leitungen im Bodenbereich verbunden sind. Die Auslassleitung aus dem letzten Reaktor kann dabei mit einem Siphon auf Höhe des gewünschten Füllstands verbunden werden.

**[0009]** Um die Löslichkeit der Gaskomponenten auch bei einer kontinuierlichen Betriebsweise zu verbessern, gibt es Bestrebungen, ein kontinuierliches

Fermentationsverfahren unter erhöhtem Druck zu entwickeln. Während dabei die kontinuierliche (oder semi-kontinuierliche) Zufuhr von Nährlösung über eine Hochdruck-Dosierpumpe realisiert werden kann, stellt die Ausschleusung der gleichen Produktmenge aus dem Reaktor bei erhöhtem Druck eine besondere Herausforderung dar.

**[0010]** Aus EP 3470 524 A1 ist ein zweistufiges Fermentationsverfahren bekannt, das eine kontinuierliche Betriebsweise mit erhöhtem Druck kombiniert. Die dazu verwendete Vorrichtung sieht dabei nicht nur zur Lösungszufuhr eine entsprechende Pumpe, sondern auch zum Ausschleusen der Lösung aus jedem Reaktor jeweils eine weitere Pumpe vor.

**[0011]** Auch die aus US 5,593,886 B oder US 5,807,722 B bekannte Vorrichtung zur Durchführung eines kontinuierlichen Fermentationsverfahrens unter erhöhtem Druck sieht zur Ausschleusung der Produktlösung aus dem Reaktor weitere Pumpen vor.

**[0012]** Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach kontinuierlicher Betriebsweise zur Fermentation von Synthesegas bei verbessertem Druckmanagement bereitzustellen.

**[0013]** Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

**[0014]** Die weitere Aufgabe der Bereitstellung eines prozess- und kostenoptimierten Verfahrens zur Fermentation von Synthesegas mit erhöhter Effektivität wird durch das Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 10 gelöst.

**[0015]** Bevorzugte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen ausgeführt.

**[0016]** Eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei einem Prozessdruck vorgesehen, der in einem Bereich von 1,1 bis 200 bar, bevorzugt bei 2 bis 20 bar, liegt. Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist einen Reaktor auf, in den zumindest zwei Zuführvorrichtungen für Edukt und Zusatzstoffe münden. In seinem Kopfbereich ist der Reaktor mit einem Gasauslass verbunden. Der Gasauslass steht mit einer in dem Kopfbereich vorliegenden Gasphase in Kontakt und weist eine Druckregelungseinrichtung auf. Ferner hat der Reaktor eine Auslassvorrichtung für wässrige Lösung. Erfindungsgemäß ist diese Auslassvorrichtung eine pumpenlos betriebene Auslassleitung mit einem zeitgesteuert betriebsbaren Hochdruckventil. Die Auslassvorrichtung ist nicht mit einer Pumpe betrieben. Da die Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils gesteuert werden kann, kann getaktet ein vorbestimmtes Volumen bzw.

eine vorbestimmte Masse der wässrigen Lösung aus dem Reaktor ausgelassen werden. „Getaktet“ meint hierbei das Öffnen und nach einer vorbestimmten Zeit Schließen des Ventils in vorbestimmten Zeitabständen. Vorteilhaft wird durch die Kontrolle des ausgelassenen Volumens eine kontinuierliche Betriebsweise ermöglicht, weil der erhöhte Prozessdruck in der Gasphase innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen beibehalten werden kann.

**[0017]** Die Zuführvorrichtung für Edukt und Zusatzstoffe ist nach einem Ausführungsbeispiel eine Zuführvorrichtung für Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas. Sie kann auch weitere Zuführvorrichtungen für weitere Zusatzstoffe umfassen.

**[0018]** Unter Synthesegas werden hierin beliebige Mischungen aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid verstanden, die gegebenenfalls ferner Kohlenstoffdioxid und Inertgase wie Stickstoff enthalten können.

**[0019]** Beispiele für geeignete Bakterien zur Fermentation umfassen, sind aber nicht auf *Acetobacterium kivui*, *A. woodii*, *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium aceticum*, *C. acetobutylicum*, *C. formicoaceticum*, *C. kluyveri*, *C. thermoaceticum*, *C. thermocellum*, *C. thermohydrosulfuricum*, *C. thermosaccharolyticum*, *C. carboxidivorans*, *C. ljungdahlii*, *Eubacterium limosum*, *C. autoethanogenum* und *Peptostreptococcus productus*, beschränkt.

**[0020]** Die damit aus Synthesegas herstellbaren Fermentationsprodukte umfassen organische Säuren und deren Salze sowie Alkohole. Diese Produkte umfassen, sind aber nicht auf Essigsäure, Propan säure, Buttersäure, Methanol, Ethanol, Propanol, n-Butanol, Hexanol und Salze wie z. B. Acetate, Butyrate oder Hexanoate beschränkt.

**[0021]** Der Reaktor kann beispielsweise aus einem oder mehreren Gefäßen bestehen, die einen kontinuierlichen Rührkesselreaktor, immobilisierten Zellreaktor, Rieselbettreaktor, Blasensäulenreaktor, Gaslift-Fermenter oder andere geeignete Fermentierungsreaktoren umfassen. Der kontinuierliche Rührkesselreaktor kann ein bevorzugter Reaktor der erfindungsgemäßen Vorrichtung sein.

**[0022]** In einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung können die Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils in Abhängigkeit von Vorrichtungs- und Betriebsparametern derart einstellbar und konfigurierbar sein, dass ein Volumen/eine Masse der aus dem Reaktor während der Öffnungszeit austretenden wässrigen Lösung so einstell- und steuerbar ist, dass der Prozessdruck nicht unter einen vorbestimmten Schwellendruck fällt, der von 95 bis 99,5 % des Prozessdrucks beträgt.

**[0023]** Vorzugsweise kann das Hochdruckventil ein elektronisch steuerbares oder regelbares Hochdruckventil sein, sodass die Einstellung der Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils automatisiert entweder durch Vorgabe passender Steuerungsparameter oder durch Regelung in Abhängigkeit bestimmter Betriebsparameter erfolgt.

**[0024]** Die Vorrichtungs- und Betriebsparameter, die das während einer Öffnungszeit des Hochdruckventils austretende Volumen der wässrigen Lösung bestimmen und damit zur Einstellung der Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils herangezogen werden, umfassen als Vorrichtungsparameter zumindest die Dimensionen der Auslassleitung und als Betriebsparameter wenigstens den Prozessdruck und die dem Reaktor zugeführten und abgeführten Volumen- oder Massenströme, d. h., Volumina der Edukte und Zusatzstoffe; gemäß einer Ausführungsform Volumina des Nährlösung, der Hilfslösung und des Synthesegases, und ein Volumen des aus dem Gasauslass ausströmenden Gases. Selbstverständlich können auch weitere Vorrichtungs- und Betriebsparameter, die für das während einer Öffnungszeit des Hochdruckventils austretende Volumen an wässriger Lösung relevant sind, umfasst werden, wie z. B. Dimensionen des Reaktors und der Füllstand der wässrigen Lösung im Reaktor.

**[0025]** Für eine elektronische Steuerung bzw. Regelung der zu- und abgeführten Volumenströme kann die Vorrichtung in einer bevorzugten Ausführungsform zumindest eine dem jeweiligen Betriebsparameter entsprechende Messeinrichtung, d. h. zur Messung des Prozessdrucks, der Zufuhrvolumina von Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas und der Menge von aus dem Gasauslass ausströmenden Gas aufweisen. Diese Messeinrichtung(en) sind mit einer elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung kommunikativ, d. h. drahtlos oder verdrahtet zur Datenübertragung, verbunden, die wiederum mit dem Hochdruckventil zur Steuerung oder Regelung desselben verbunden ist, wobei die elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung zur Erfassung und Verarbeitung von Messwerten der Messeinrichtungen und zur automatisierten Einstellung der Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils in Abhängigkeit der Vorrichtungsparameter, die in der elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung hinterlegt sind, und der Messwerte ausgebildet ist. Die Öffnungszeit des Hochdruckventils wird auch als Taktungszeit bezeichnet. Als Taktungsfrequenz ist die Anzahl der Öffnungsvorgänge pro Zeiteinheit definiert. Beides, Taktungszeit und Taktungsfrequenz, wird kann basierend auf experimentellen Erfahrungswerten in Bezug auf die Vorrichtungs- und Betriebsparameter vorbestimmt oder kann in Abhängigkeit zu einem Betriebsparameter, wie z. B. dem Füllstand im Reaktor, geregelt eingestellt werden.

**[0026]** Weitere Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Vorrichtung sehen vor, dass eine Öffnung der Auslassleitung, d. h. die Auslassöffnung aus dem Reaktor, im unteren Bereich des Reaktors, bevorzugt am Boden des Reaktors bzw. an dem tiefsten Punkt des Reaktors angeordnet ist. Mit dieser Ausführungsform können auch feste Reaktionsrückstände aus dem Reaktor entfernt werden, die in einem schwach durchmischten Reaktor sich ansonsten absetzen. Alternativ dazu kann die Öffnung der Auslassleitung, d. h. die Auslassöffnung aus dem Reaktor, im oberen Bereich des Reaktors, bevorzugt im Bereich eines vorgesehenen Füllstands bzw. Flüssigkeitspegelstands der in dem Reaktor vorliegenden wässrigen Lösung angeordnet sein. Diese Ausführungsform hat den Vorteil, dass der Füllstand im Reaktor nicht tiefer als bis zur Position der Auslassöffnung absinken kann. Ferner kann bei auftretender Schaumbildung dieser aus dem Reaktor entfernt werden. Hierbei besteht allerdings eine erhöhte Anforderung an die Druckregelung des Reaktors, da mit dem Schaum ein gewisser Anteil der Gasphase durch die Auslassleitung entweicht.

**[0027]** Es können dabei jeweils auch mehrere Auslassöffnungen vorgesehen sein, die mit einer gemeinsamen Auslassleitung verbunden sind. So können z. B. mehrere Öffnungen am Boden des Reaktors vorliegen, von denen auch eine am tiefsten Punkt liegen kann. Ist der Auslass im oberen Bereich des Reaktors vorgesehen, können mehrere Öffnungen am Umfang des Reaktors vorliegen, die mit einer gemeinsamen Auslassleitung verbunden sind.

**[0028]** Eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung kann zwei Auslassvorrichtungen aufweisen, d. h. eine erste Auslassvorrichtung aus einer ersten Auslassleitung mit einem ersten Hochdruckventil und eine zweite Auslassvorrichtung aus einer zweiten Auslassleitung mit zweitem Hochdruckventil. Dabei kann eine Öffnung der ersten Auslassleitung im unteren Bereich des Reaktors, bevorzugt am Boden des Reaktors bzw. dessen tiefsten Punkt angeordnet sein, und eine Öffnung der zweiten Auslassleitung kann im oberen Bereich des Reaktors, bevorzugt im Bereich eines Flüssigkeitspegelstands der in dem Reaktor vorliegenden wässrigen Lösung angeordnet sein, wobei die erste und die zweite Auslassvorrichtung wahlweise betreibbar sind. Auf diese Weise kann in Abhängigkeit der Betriebseinstellungen die dafür besser geeignete Auslassvorrichtung ausgewählt werden. Auch hier können die Öffnungen der Auslassleitungen, wie zuvor beschrieben, mehrere Auslassöffnungen aus dem Reaktor bedeuten, die mit der jeweiligen Auslassleitung verbunden sind.

**[0029]** In einer weiteren Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann die Auslassvorrichtung mit einer Abscheidevorrichtung zur Trennung einer gasförmigen Phase von einer flüssigen Phase

der wässrigen Lösung verbunden sein, um einen Gasphasenanteil von der wässrigen Phase (Lösung), die die Fermentationsprodukte enthält, abzutrennen.

**[0030]** An die Abscheidervorrichtung kann sich in einer bevorzugten Ausführungsform stromabwärts auf einer Gasphasenseite eine Vorrichtung zur Gasdurchflussmessung und auf einer Flüssigphasenseite eine Vorrichtung zur Füllstands- oder Durchflussmessung anschließen. Auch die hier gemessenen Werte können bei der automatisierten Regelung der Vorrichtung mittels der elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung berücksichtigt werden. Ferner kann auf der Gasphasenseite optional eine Analyse der Gaszusammensetzung vorgesehen sein, um das Vorhandensein von eventuell nicht reagiertem Synthesegas oder unerwünschten gasförmigen Reaktionsprodukten feststellen zu können.

**[0031]** Weitere Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Vorrichtung beziehen sich darauf, dass die Zuführvorrichtung für die Nährlösung eine Vorratsvorrichtung und eine zugeordnete Hochdruckpumpe aufweisen kann. Ebenso kann die Zuführvorrichtung für die Hilfslösung eine Vorratsvorrichtung und eine zugeordnete Hochdruckpumpe aufweisen. Die Zuführvorrichtung für Synthesegas kann eine Synthesegasquelle und in Abhängigkeit eines Synthesegasdrucks der Synthesegasquelle einen Durchflussregler oder einen Kompressor und einen Durchflussregler aufweisen.

**[0032]** Dabei können die Zuführvorrichtungen zur automatisierten Steuerung bzw. Regelung des Betriebs entsprechende mit der Mess- und Regelungseinrichtung kommunikativ verbundene Durchflussmesser für die zugeführten Mengen (Volumina oder Massen) aufweisen, wobei bei den Zuführvorrichtungen für Nährlösung und Hilfslösung alternativ auch jeweils eine Füllstandmessung in der jeweiligen Vorratsvorrichtung vorgesehen sein kann. Auch die Füllstandmesser sind dann mit der Mess- und Regelungseinrichtung kommunikativ verbunden.

**[0033]** Ebenso können die Hochdruckpumpen und der Durchflussregler sowie ggf. der Kompressor mit der elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung kommunikativ verbunden sein, die ferner zur Steuerung der Hochdruckpumpen und des Durchflussreglers zur Regelung der Zuführvolumina von Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas ausgebildet ist.

**[0034]** Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei einem Prozessdruck, der in einem Bereich von 1,1 bis 200 bar liegt, das unter Verwendung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung durchgeführt werden kann, umfasst die Schritte:

- in dem Reaktor Vorlegen einer Suspension mit Synthesegasfermentationsbakterien als wässrige Lösung bis zu einem vorbestimmten Füllstand in dem Reaktor;

- kontinuierlich Zuführen des Edukts und kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Zuführen der Zusatzstoffe in den Reaktor;

- dabei in dem Reaktor Einstellen des Prozessdrucks der Gasphase in dem Bereich von 1,1 bis 200 bar; - gegebenenfalls nach einer vorbestimmten Startfermentationszeit - und

- kontinuierlich zeitgesteuert Öffnen und Schließen des Hochdruckventils, dabei Auslassen des vorbestimmten Volumens der wässrigen Lösung aus dem Reaktor.

**[0035]** Vorzugsweise kann zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens in dem Reaktor der Prozessdruck der Gasphase in dem Bereich von 2 bis 20 bar eingestellt werden.

**[0036]** Erfindungsgemäß umfasst das kontinuierlich Zuführen des Edukts und das kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Zuführen der Zusatzstoffe in den Reaktor das

- kontinuierlich Zuführen des Synthesegases in den Reaktor mit der Zuführvorrichtung für das Synthesegas;

- kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Zuführen der Nährlösung in den Reaktor mit der Zuführvorrichtung für die Nährlösung; und

- bedarfsabhängig Zuführen der Hilfslösung zur Einstellung eines pH-Werts der wässrigen Lösung im Reaktor mit der Zuführvorrichtung für die Hilfslösung.

**[0037]** Dabei sind das Öffnen und Schließen des Hochdruckventils zum Auslassen des vorbestimmten Volumens der wässrigen Lösung aus dem Reaktor und das Zuführen von Synthesegas, Nährlösung und Hilfslösung in den Reaktor so aufeinander abgestimmt, dass der Prozessdruck in der Gasphase innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen sowie auch ein vorbestimmter Füllstand der wässrigen Lösung im Reaktor beibehalten werden.

**[0038]** Weitere Ausführungsformen sowie einige der Vorteile, die mit diesen und weiteren Ausführungsformen verbunden sind, werden durch die nachfolgende ausführliche Beschreibung unter Bezug auf die begleitenden Figuren deutlich und besser verständlich. Gegenstände oder Teile derselben, die im Wesentlichen gleich oder ähnlich sind, können mit denselben Bezugszeichen versehen sein. Die Figuren sind lediglich eine schematische Darstellung einer Ausführungsform der Erfindung.

**[0039]** Dabei zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Ansicht eines Reaktors mit einer Auslassvorrichtung in einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas unter Druck,

**Fig. 2** eine schematische Ansicht des Reaktors mit einer Auslassvorrichtung in einer zweiten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung,

**Fig. 3** eine schematische Ansicht einer Vorrichtung zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas unter Druck nach einer erfindungsgemäßen Ausführungsform.

**[0040]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei einem erhöhten Druck von 1,1 bis 200 bar, bevorzugt von 2 bis 20 bar. Dabei gestattet die Vorrichtung die Durchführung des Verfahrens in kontinuierlicher Betriebsweise, die die Produktivität erhöht, und zwar unter einem erhöhten Prozessdruck, was bislang nur im Batch- oder Semi-Batchbetrieb möglich war, die aber nachteilig nur über eine begrenzte Zeitdauer stabil sind. Mithilfe des höheren Prozessdrucks wird die ansonsten sehr geringe Gaslöslichkeit von Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid in einer Prozesslösung erhöht, wodurch die Verfügbarkeit dieser Komponenten für die Bakterien verbessert wird.

**[0041]** **Fig. 3** zeigt eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung als Gesamtanlage zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei erhöhtem Prozessdruck, die außer einem Reaktor **1** jeweils eine in den Reaktor **1** mündende Zuführvorrichtung **A**, **B**, **C** aufweist. Hierin werden die Zuführvorrichtungen für Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas verwendet, können aber grundsätzlich auch für andere Zusatzstoffe eingesetzt werden. Der Reaktor **1** hat ferner einen Gasauslass, der mit der in dem Reaktor **1** vorliegenden Gasphase **G** kommuniziert, da er am Kopf des Reaktors **1** mit diesem verbunden ist. Ferner verfügt der Reaktor **1** über eine Druckregelungseinrichtung **7** sowie eine Gasdurchflussmesser **8**, und weist eine aus dem Reaktor **1** führende Auslassvorrichtung für die wässrige Lösung **W** (auch Prozesslösung **W**) auf.

**[0042]** Die erfindungsgemäße Auslassvorrichtung, die den kontinuierlichen Betrieb unter erhöhtem Druck in apparativ einfacher Weise gestattet, wird durch eine Auslassleitung **2** mit einem Hochdruckventil **3** gebildet und weist vorteilhaft keine Pumpe auf. Mit dem Hochdruckventil **3** ist es möglich, durch die Auslassleitung **2** kontinuierlich getaktet während der Öffnungszeit des Hochdruckventils **3** ein vorbestimmtes Volumen der wässrigen Lösung **W** aus dem Reaktor **1** auszulassen, die so bemessen ist, dass

der Füllstand der wässrigen Lösung **W** im Reaktor **1** und der Prozessdruck in der Gasphase **G** innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen beibehalten werden, wobei die zugeführten Volumina von Synthesegas, Nährlösung und ggf. auch Hilfslösung zur Einstellung des pH-Werts der wässrigen Lösung **W** im Reaktor **1** berücksichtigt werden.

**[0043]** Wie in **Fig. 3** durch die Strichelierungen angedeutet und in **Fig. 1** und **Fig. 2** verdeutlicht, kann die Auslassvorrichtung je nach Betriebseinstellung in unterschiedlicher Weise angeordnet werden. Wie **Fig. 1** schematisch zeigt, kann die Auslassvorrichtung derart realisiert werden, dass eine Öffnung der Auslassleitung **2**, d. h. die Auslassöffnung aus dem Reaktor **1**, im unteren Bereich des Reaktors **1**, dort bevorzugt am Boden des Reaktors **1**, insbesondere am tiefsten Punkt des Bodens des Reaktors **1** angeordnet sein. Ein Auslass am unteren Teil des Reaktors **1** entfernt zuverlässig eventuelle feste Reaktionsrückstände. Diese können vor allem in einem nur schwach gerührten bzw. durchmischten System vorkommen.

**[0044]** Alternativ dazu kann die Öffnung der Auslassleitung **2**, d. h. die Auslassöffnung aus dem Reaktor, im oberen Bereich des Reaktors **1**, bevorzugt im Bereich eines vorgesehenen bzw. vorbestimmten Flüssigkeitspegelstands der in dem Reaktor **1** vorliegenden wässrigen Lösung **W** angeordnet sein. Ein Auslass an der Phasengrenze zwischen wässriger Lösung **W** und Gasphase **G** hat den Vorteil, dass zuverlässig, auch bei kleinen Betriebsstörungen, die Phasengrenze bzw. der Füllstand des Reaktors **1** nicht tiefer als bis zur Öffnung der Auslassleitung **2** absinken kann. Ferner wird gebildeter Schaum aus dem Reaktor **1** entfernt. Zwar kann dabei ein gewisser Anteil der Gasphase **G** über die Auslassleitung **2** entweichen, wodurch eine Druckregelung der Anlage komplexer wird, aber eine Minderung der Effizienz des Reaktors **1** tritt dadurch nicht ein, da das zugeführte Synthesegas die wässrige Lösung **W** durchquert und somit bereits reagiert hat.

**[0045]** Um je nach Bedarf beide Vorteile mit einer Vorrichtung nutzen zu können, kann eine erfindungsgemäße Vorrichtung auch zwei Auslassvorrichtungen, d. h. zwei Auslassleitungen **2** und zwei Hochdruckventile **3** entsprechend **Fig. 3** aufweisen, wobei die Öffnung der ersten Auslassleitung **2** im unteren Bereich des Reaktors **1**, bevorzugt am Boden des Reaktors **1** bzw. dessen tiefstem Punkt angeordnet ist, und die Öffnung der zweiten Auslassleitung **2** im oberen Bereich des Reaktors **1**, bevorzugt im Bereich des Flüssigkeitspegelstands der in dem Reaktor **1** vorliegenden wässrigen Lösung **W** angeordnet ist. Je nach Betriebseinstellung kann wahlweise die erste oder die zweite Auslassleitung **2** bzw. das zugeordnete Hochdruckventil **3** betrieben werden und damit die Position der Auslassöffnung am tiefsten Punkt/Boden des Reaktors oder oben am Flüssigkeitspegelstand

bzw. der Phasengrenze zwischen wässriger Lösung **W** und Gasphase **G** gewählt werden.

**[0046]** Zur Durchführung des Verfahrens zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei erhöhtem Prozessdruck wird in dem Reaktor **1** eine Suspension mit Bakterien, die zur Fermentation von Synthesegas geeignet sind, als wässrige Lösung **W** bis zu einem vorbestimmten Füllstand vorgelegt, der von einem Füllstandsmesser **9** überwacht wird. Zur Fermentation wird den in Lösung suspendierten Bakterien kontinuierlich ein Synthesegas mit einer Zuführvorrichtung **C** in den Reaktor **1** zugeführt und ein Prozessdruck in der Gasphase **G** in dem Bereich von 1,1 bis 200 bar, bevorzugt 2 bis 20 bar, mittels der Druckregelungseinrichtung **7** geregelt, wobei ein gegebenenfalls abzulassendes Gasvolumen mit dem Gasdurchflussmesser **8** erfasst werden kann. Beides wird bevorzugt vorbestimmt, nach experimentellen Erfahrungswerten. Optional kann in Abhängigkeit zu einem Betriebsparameter, wie z. B. dem Füllstand im Reaktor, geregelt werden.

**[0047]** Die Zufuhr des Synthesegases aus einer Synthesegasquelle **12** der Zuführvorrichtung **C** erfolgt mittels eines Durchflussreglers **13** und umfasst gegebenenfalls - wie durch die Strichelierung in **Fig. 3** angedeutet - einen Kompressor **14**. Ob ein Kompressor **14** benötigt wird oder nicht, hängt von dem vorliegenden Gasdruck der Synthesegasquelle ab. Die Zuführvorrichtung **C** mündet vorzugsweise in Bodennähe in den Reaktor **1** und kann dort über eine Gas-einleitungs-vorrichtung, die einen Gasübergang in die wässrige Lösung **W** unterstützt, wie Diffusoren, Gasfritten zum Beispiel, in die wässrige Lösung **W** eingeleitet werden. Alle eingehenden Ströme können bevorzugt durch Sterilfilter geleitet werden, um Fremdkontamination zu vermeiden.

**[0048]** Neben dem Synthesegas werden die wässrige Lösung **W**, in der die Bakterien suspendiert sind, ferner kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Nährlösung, die eine wässrige Lösung mit essentiellen Nährstoffen wie Spurenelemente- und Vitaminen ist, über eine Zuführvorrichtung **A** und bei Bedarf zur Einstellung des pH-Werts der wässrigen Lösung **W** eine Hilfslösung, z. B. saure/alkalische Lösung, über eine Zuführvorrichtung **B** zugeführt.

**[0049]** Die Zuführvorrichtungen **A**, **B** weisen jeweils eine Vorratsvorrichtung **10**, **11** für die Nährlösung und die Hilfslösung und jeweils eine Hochdruckdosierpumpe **15** auf. Nicht dargestellt ist eine Variante, die mehrere Vorratsvorrichtungen **11** für verschiedene Hilfslösungen aufweist, die jeweils mittels Hochdruckpumpe **15** nach Bedarf zur Einstellung des pH-Werts in den Reaktor **1** dosiert werden können. Ferner können die Vorratsbehälter **10**, **11** mit Vorrichtungen zur Füllstandmessung ausgestattet sein. Alternativ oder zusätzlich können die Zuführvorrichtungen **A**,

**B**, **C** Vorrichtungen zur Durchflussmessung aufweisen.

**[0050]** Mit der erfindungsgemäßen Auslassvorrichtung aus der Auslassleitung **2** und dem Hochdruckventil **3** werden in der kontinuierlichen Betriebsweise die Produkte der bakteriellen Aktivität (Stoffwechselprodukte) getaktet kontinuierlich aus der Fermentationsbrühe bzw. der wässrigen Lösung **W** abgeführt, so dass deren Konzentration einen vorbestimmten Grenzwert nicht überschreitet. Der erhöhte Prozessdruck sorgt dabei für eine verbesserte Raum-Zeit Ausbeute (Produktivität des jeweiligen Reaktors im Vergleich zur Nutzung desselben Reaktors für dasselbe Verfahren nach einer Betriebsweise gemäß Stand der Technik). Für die kontinuierliche Betriebsweise wird das aus dem Reaktor abgeführte Stoffvolumen mit der kontinuierlichen (oder semi-kontinuierlichen) Zufuhr von Nährlösung (und ggf. Hilfslösung) über die Hochdruck-Dosierpumpen **15** mittels gekoppelter Durchflussmessung oder Füllstandmessung abgestimmt.

**[0051]** Zur Realisierung ist ein sich schnell öffnendes und schließendes Hochdruckventil **3** in einfacher Ausführung ausreichend. Die für einen jeweiligen Reaktor **1** notwendige Öffnungs- und Schließzeit (Taktintervall) können experimentell ermittelt werden, um das Volumen pro Takt zu bestimmen, durch dessen Ablassen aus dem Reaktor **1** kein nennenswerter Druckverlust entsteht, wobei vorzugsweise mit jedem Takt ein immer gleichbleibendes Volumen abgelassen werden soll.

**[0052]** Die Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils **3** wird daher in Abhängigkeit von Vorrichtungs- und Betriebsparametern derart eingestellt, dass das Volumen der aus dem Reaktor **1** während der Öffnungszeit austretenden wässrigen Lösung **W** ausreichend klein gewählt ist, dass der Prozessdruck nicht unter einen vorbestimmten Schwellendruck fällt, der 95 bis 99,5 % des Prozessdrucks beträgt. Die Vorrichtungs- und Betriebsparameter umfassen vor allem die Dimensionen der Auslassleitung sowie den Prozessdruck und die Zuführvolumina von Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas und das Volumen von aus dem Gasauslass **8** ausgelassenem Gas, gegebenenfalls aber auch weitere Parameter wie die Dimensionen des Reaktors **1** und den Füllstand der wässrigen Lösung **W** im Reaktor **1**.

**[0053]** Die erfindungsgemäße Auslassvorrichtung mit Hochdruckventil bietet den zusätzlichen Vorteil, auch bei sehr geringen Durchflüssen zuverlässig zu funktionieren, wo Pumpen oder Regelventile oft versagen. Ist dort die Taktdauer zu kurz, wird kein stabiler Betrieb erreicht, während typische Öffnungszeiten des Hochdruckventils im Bereich von Millisekunden liegen können. Das Taktintervall dieser Operation bestimmt den Durchfluss der Auslassvorrichtung.

Ein geeignetes Hochdruckventil kann beispielsweise ein Hochdruckdosierventil sein.

**[0054]** Stromabwärts des Hochdruckventils **3** erfolgt eine Phasentrennung der abgelassenen wässrigen Lösung **W** in einem Gas-Flüssigkeitsabscheider **4**, woran sich eine Erfassung der Volumina beider Phasen mittels Gasdurchflussmessung **5** für die Gasphase und Füllstands- oder Durchflussmessung **6** für die wässrige Phase (Lösung) anschließt, gegebenenfalls mit entsprechenden Analysen. Die wässrige Phase enthält die gewünschten Fermentationsprodukte wie z. B. Acetate und Ethanol.

**[0055]** Je nach festgestellter Gaszusammensetzung kann der Gasphasenstrom, falls er z. B. noch Synthesegaskomponenten enthält, rückgeführt werden, gegebenenfalls nach einem Aufbereitungsschritt zur Aufkonzentration oder Reinigung. Alternativ oder zusätzlich kann die festgestellte Gaszusammensetzung als Basis zur Modifikation der Betriebsparameter herangezogen werden, um die Fermentationsbedingungen so zu ändern, dass die Gasphase kein Synthesegas oder unerwünschte Gasprodukte enthält. Entsprechend kann auch die wässrige Produktlösung analysiert werden, und, falls die Produktzusammensetzung von einer gewünschten Produktzusammensetzung abweicht, können die Fermentationsbedingungen entsprechend geändert werden, damit vermehrt die gewünschten Fermentationsprodukte entstehen.

**[0056]** Das Taktintervall des Hochdruckventils **3** kann über ein elektrisches Mess-, Steuer- und Regelungssystem vorgegeben werden. Die Vorgabe, die das abgelassene Volumen der wässrigen Lösung bestimmt, ergibt sich abgesehen von den unveränderlichen Vorrichtungsparemtern wie den Dimensionen der Auslassleitung aus den zu- und abgeführten Volumina: zugeführte Nährlösung, zugeführte saure oder basische Hilfslösung zur Regelung des pH-Werts, zugeführtes und ausströmendes Gas.

**[0057]** Um daher zur Einstellung der Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils **3** die Betriebsparameter zu erfassen, die Schwankungen unterliegen können, weist die Vorrichtung entsprechende Mess- und Regelungseinrichtungen auf. In **Fig. 3** sind die Druckregelungseinrichtung **7**, die eine Druckmessung des Prozessdrucks umfasst, Gasdurchflussmesser **8** und Füllstandsmesser **9** dargestellt. Die Zufuhrvolumina von Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas können über nicht dargestellte Füllstands- oder Durchflussmesser erfasst werden.

**[0058]** Sämtliche Messvorrichtungen sind mit einer ebenfalls nicht dargestellten elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung kommunikativ verbunden, die die erfassten Messwerte zur Regelung der Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils **3** verar-

beitet. Um auch die Zufuhrvolumina von Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas steuern bzw. regeln zu können, können auch die Hochdruckpumpen **15** und der Durchflussregler **13** mit der elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung verbunden sein.

**[0059]** Beispiel:

Ein Reaktor mit einem Volumen von 2,2 l wird mit 3,61 g/h Gasgemisch ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) beaufschlagt. Der Durchfluss der Lösung beträgt 60 g/h. Der Versuchsdruck beträgt 4 bar absolut. Die Öffnungszeit des Hochdruckventils der Auslassvorrichtung beträgt 0,15 s.

Dieser Wert wurde experimentell für die eingesetzte Anlage und unter dem Versuchsdruck von 4 bar ermittelt. Bei höheren Drücken wird dieser Wert für das bestehende System kleiner werden. Mit der Öffnungszeit von 0,15 s werden in der eingesetzten Anlage rund 1,7 g wässrige Suspension pro Takt aus dem System entfernt. Diese Menge hängt vom Gasanteil der wässrigen Suspension, von den Querschnitten und der Länge der verwendeten Leitungen ab. Daher sollten Öffnungs- und Schließzeiten im Rahmen erster Komponententests einer neuen Anlage unter Prozessbedingungen mit reinem Wasser bestimmt und beim späteren Betrieb angepasst werden. Im Ausführungsbeispiel beträgt das Taktintervall (Summe aus Öffnungs- und Schließzeit) 100 s. Über diese Einstellungen wird die Menge der wässrigen Lösung im Reaktor über längere Zeiten konstant gehalten.

Werden im Betrieb Abweichungen in der Bilanz zwischen Zuführung und Ausleitung festgestellt, kann das Taktintervall angepasst werden, im genannten Beispiel etwa innerhalb des Bereichs von 105 s bis 95 s, sodass die Öffnungszeit konstant bleibt.

**[0060]** Die Vorrichtung und das Verfahren, die mit den gezeigten Figuren und dem Beispiel beschrieben wurden, stellen lediglich Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Vorrichtung und des Verfahrens dar, beschränken aber nicht den Schutzzumfang der Erfindung auf die beispielhaften Details. Für den Fachmann übliche Modifikationen wie Abweichungen in Anzahl und Anordnung von Zu- und Auslassrichtungen beispielsweise sollen im Schutzzumfang umfasst sein.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Reaktor
<b>2</b>	Auslassleitung
<b>3</b>	Hochdruckventil
<b>4</b>	Abscheider



- 5** Gasdurchflussmessung (und ggf. Analyse)
- 6** Füllstands-/Durchflussmessung wässrige Phase
- 7** Druckregeleinrichtung
- 8** Gasdurchflussmessung
- 9** Füllstandmessung
- 10** Vorrat wässrige Nährlösung (ggf. mit Füllstandmessung)
- 11** Vorrat Hilfslösung
- 12** Synthesegasquelle
- 13** Durchflussregler
- 14** Kompressor
- 15** Hochdruckpumpe
- A, B, C** Zuführvorrichtung für Nährlösung, Hilfslösung und Synthesegas
- G, W** Gasphase, wässrige Lösung

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- US 9834792 B2 [0008]
- EP 3470524 A1 [0010]
- US 5593886 [0011]
- US 5807722 [0011]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- „Syngas Fermentation at Elevated Pressure“, A. Infantes et al., Chemie Ingenieur Technik, 2018, 90, Nr. 9, 1283-1284, und „Formic Acid Formation by Clostridium ljungdahlii at Elevated Pressures of Carbon Dioxide and Hydrogen“, F. Oswald et al., Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Feb. 2018, Vol. 6, Article 6 [0004]
- „Ethanol production by syngas fermentation in a continuous stirred tank bioreactor using Clostridium ljungdahlii“, Acharya et.al., Biofuels (2017), DOI: 10.1080/17597269.2017.1316143 [0007]
- „Sustainable ethanol fermentation from synthesis gas by Clostridium ljungdahlii in a continuous stirred tank bioreactor“, Mohammadi et al., J. Chem. Technol. Biotechnol. 2012; 87, 837-843 [0007]

## Patentansprüche

1. Vorrichtung zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas, wobei die Vorrichtung einen Reaktor (1) aufweist,

- der für einen Prozessdruck ausgelegt ist, der in einem Bereich von 1,1 bis 200 bar liegt, und
- in den zumindest zwei Zuführvorrichtungen für Edukt und Zusatzstoffe münden, und
- der mit einem Gasauslass verbunden ist, der eine Druckregelungseinrichtung (7) aufweist, und
- der eine Auslassvorrichtung für eine wässrige Lösung (W) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auslassvorrichtung eine pumpenlos betriebene Auslassvorrichtung mit einer Auslassleitung (2) mit einem zeitgesteuerten Hochdruckventil (3) zur Steuerung einer Öffnungs- und Schließzeit ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zuführvorrichtungen für Edukt und Zusatzstoffe

- eine Zuführvorrichtung (A) für Nährlösung,
- eine Zuführvorrichtung (B) für Hilfslösung und
- eine Zuführvorrichtung (C) für Synthesegas umfassen.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils (3) in Abhängigkeit von Vorrichtungs- und Betriebsparametern derart steuerbar sind, dass eine Masse oder ein Volumen der aus dem Reaktor (1) während der Öffnungszeit austretenden wässrigen Lösung (W) so vorbestimmbar ist, dass der Prozessdruck nicht unter einen vorbestimmten Schwellendruck fällt, der in einem Bereich von 95 bis 99,5 % des Prozessdrucks liegt.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass

die Vorrichtungsparameter zumindest die Dimensionen der Auslassleitung (2) umfassen, und die Betriebsparameter aus der Gruppe sind, die den Prozessdruck, ein zugeführtes Volumen jeden Edukts und ein aus dem Gasauslass ausströmendes Gasvolumen umfassen, wobei die Vorrichtung bevorzugt zumindest eine dem jeweiligen Betriebsparameter entsprechende Messeinrichtung (7, 8, 9) zur Messung des Prozessdrucks, der Zuführvolumina an Edukt und des aus dem Gasauslass ausströmenden Gasvolumens aufweist, wobei die zumindest eine Messeinrichtung (7, 8, 9) mit einer elektronischen Mess- und Regelungseinrichtung verbunden ist, die zumindest mit dem Hochdruckventil (3) verbunden ist, wobei die elektronische Mess- und Regelungseinrichtung zur Erfassung und Verarbeitung von Messwerten der zumindest einen Messeinrichtung (7, 8, 9) und zur automatisierten Einstellung der Öffnungs- und Schließzeit des Hochdruckventils (3) in Abhängigkeit der Vorrichtungsparameter und der Messwerte ausgebildet ist.

5. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Öffnung der Auslassleitung (2)

- in einem unteren Bereich des Reaktors (1), bevorzugt an einem Boden des Reaktors (1) angeordnet ist, oder
- in einem oberen Bereich des Reaktors (1), bevorzugt in einem Bereich eines Flüssigkeitspegelstands der in dem Reaktor (1) vorliegenden wässrigen Lösung (W) angeordnet ist.

6. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Reaktor eine zweite Auslassvorrichtung aufweist, die eine zweite Auslassleitung (2) mit einem zweiten Hochdruckventil (3) umfasst, wobei eine Öffnung der ersten Auslassleitung (2) in dem unteren Bereich des Reaktors (1), bevorzugt an dem Boden des Reaktors (1) angeordnet ist, und eine Öffnung der zweiten Auslassleitung (2) in dem oberen Bereich des Reaktors (1), bevorzugt in dem Bereich des Flüssigkeitspegelstands der in dem Reaktor (1) vorliegenden wässrigen Lösung (W) angeordnet ist, wobei die erste und die zweite Auslassvorrichtung wahlweise betreibbar sind.

7. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 6,

**dadurch gekennzeichnet**, dass

die zumindest eine Auslassvorrichtung mit einer Abscheidevorrichtung (4) zur Trennung einer gasförmigen Phase von einer flüssigen Phase der wässrigen Lösung (W) verbunden ist,

wobei

sich bevorzugt an die Abscheidevorrichtung (4) stromabwärts auf einer Gasphasenseite eine Vorrichtung zur Gasdurchflussmessung (5) und auf einer Flüssigphasenseite eine Vorrichtung zur Füllstands- oder Durchflussmessung (6) anschließt.

8. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 2 bis 7,

**dadurch gekennzeichnet**, dass

die Zuführvorrichtung (A) für die Nährlösung eine Vorratsvorrichtung (10) und eine zugeordnete Hochdruckpumpe (15) aufweist;

die Zuführvorrichtung (B) für die Hilfslösung eine Vorratsvorrichtung (11) und eine zugeordnete Hochdruckpumpe (15) aufweist; und

die Zuführvorrichtung (C) für Synthesegas mit einer Synthesegasquelle (12) fluidisch verbunden ist und in Abhängigkeit eines Synthesegasdrucks der Synthesegasquelle (12)

- einen Durchflussregler (13) oder

- einen Kompressor (14) und einen Durchflussregler (13) aufweist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Hochdruckpumpen (15) und der Durchflussregler (13) mit der elektronischen Mess-

und Regelungseinrichtung verbunden sind, die ferner zur Steuerung der Hochdruckpumpen (15) und des Durchflussreglers (13) zur Regelung der zugeführten Volumina von Edukten und Zusatzstoffen ausgebildet ist.

10. Verfahren zur kontinuierlichen Fermentation von Synthesegas bei einem Prozessdruck, der in einem Bereich von 1,1 bis 200 bar liegt, unter Verwendung einer Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 9, umfassend die Schritte

- in dem Reaktor (1) Vorlegen einer Suspension mit Synthesegasfermentationsbakterien als wässrige Lösung (W), bis zu einem vorbestimmten Füllstand in dem Reaktor (1);
- kontinuierlich Zuführen des Edukts und kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Zuführen der Zusatzstoffe in den Reaktor (1);
- dabei in dem Reaktor (1) Einstellen des Prozessdrucks der Gasphase (G) in dem Bereich von 1,1 bis 200 bar; und
- kontinuierlich zeitgesteuert Öffnen und Schließen des Hochdruckventils (3), dabei Auslassen des vorbestimmten Volumens der wässrigen Lösung (W) aus dem Reaktor (1).

11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei in dem Reaktor (1) der Prozessdruck der Gasphase (G) in dem Bereich von 2 bis 20 bar eingestellt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, wobei das kontinuierlich Zuführen des Edukts und das kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Zuführen der Zusatzstoffe in den Reaktor (1) das

- kontinuierlich Zuführen des Synthesegases in den Reaktor (1) mit der Zuführvorrichtung (C);
- kontinuierlich oder semi-kontinuierlich Zuführen der Nährlösung in den Reaktor (1) mit der Zuführvorrichtung (A); und
- bedarfsabhängig Zuführen der Hilfslösung zur Einstellung eines pH-Werts der wässrigen Lösung (W) im Reaktor (1) mit der Zuführvorrichtung (B) umfasst.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

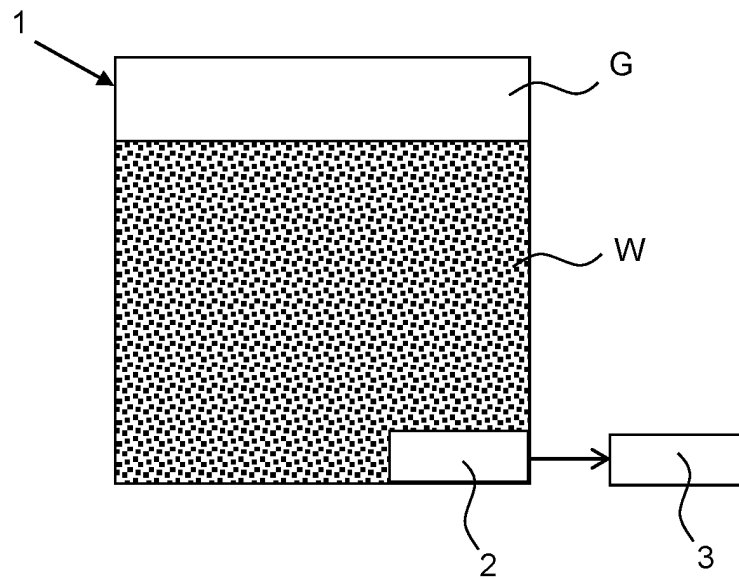


Fig. 2

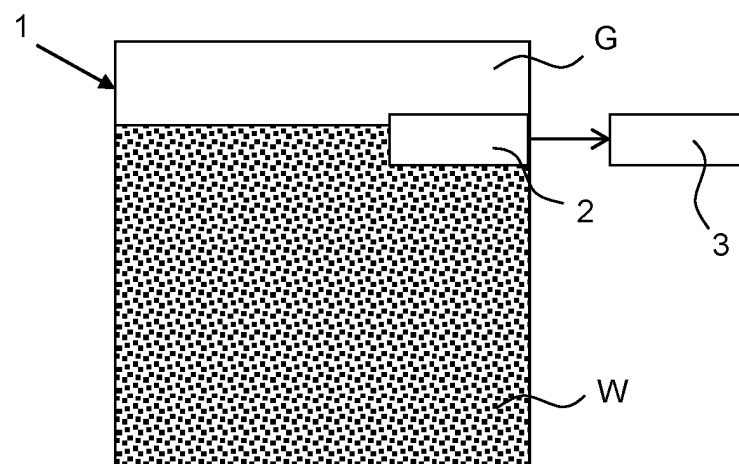


Fig. 3

