

(12)

Österreichische Patentanmeldung

(21) Anmeldenummer:

A 50947/2022

(51) Int. Cl.:

C12M 1/00 (2006.01)

(22) Anmeldetag:

12.12.2022

C12P 39/00 (2006.01)

(43) Veröffentlicht am:

15.06.2024

(56) Entgegenhaltungen:

US 2021024961 A1

US 2022220433 A1

US 2019249315 A1

US 2019390158 A1

(71) Patentanmelder:

Circe Biotechnologie GmbH

1210 Wien (AT)

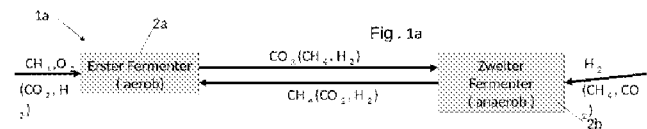
(74) Vertreter:

SONN Patentanwälte GmbH & Co KG

1010 Wien (AT)

(54) Gekoppelte Gasfermentation

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft ein System und Verfahren zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation. Das System umfasst einen ersten Fermenter, der für den Betrieb in einem aeroben Modus konfiguriert ist, und einen zweiten Fermenter, der für den Betrieb in einem anaeroben Modus konfiguriert ist, wobei der erste Fermenter einen ersten Einlass zum Einführen eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials und der zweite Fermenter einen zweiten Einlass zum Einführen eines zweiten umfasst gasförmiges Ausgangsmaterial, und wobei der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein erstes Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das erste Verbindungselement dazu konfiguriert ist, zumindest einen Teil eines ersten Endgases aus dem ersten Fermenter in den zweiten Fermenter zu führen zur Verwendung als zumindest ein Teil des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein zweites Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das zweite Verbindungselement so konfiguriert ist, dass es zumindest einen Teil eines zweiten Endprodukts aus dem zweiten Fermenter in den ersten Fermenter zur Verwendung als mindestens ein Teil des ersten gasförmigen Ausgangsmaterials einspeist.



Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein System und Verfahren zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation. Das System umfasst einen ersten Fermenter, der für den Betrieb in einem aeroben Modus konfiguriert ist, und einen zweiten Fermenter, der für den Betrieb in einem anaeroben Modus konfiguriert ist, wobei der erste Fermenter einen ersten Einlass zum Einführen eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials und der zweite Fermenter einen zweiten Einlass zum Einführen eines zweiten umfasst gasförmiges Ausgangsmaterial, und wobei der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein erstes Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das erste Verbindungselement dazu konfiguriert ist, zumindest einen Teil eines ersten Endgases aus dem ersten Fermenter in den zweiten Fermenter zu führen zur Verwendung als zumindest ein Teil des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein zweites Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das zweite Verbindungselement so konfiguriert ist, dass es zumindest einen Teil eines zweiten Endprodukts aus dem zweiten Fermenter in den ersten Fermenter zur Verwendung als mindestens ein Teil des ersten gasförmigen Ausgangsmaterials einspeist.

(Fig. 1a)

Die vorliegende Erfindung betrifft ein System zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation, bestehend aus einem ersten Fermenter, der für den Betrieb in einem aeroben Modus konfiguriert ist, und einem zweiten Fermenter, der für den Betrieb in einem anaeroben Modus konfiguriert ist, wobei der erste Fermenter einen ersten Einlass zum Einführen eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials umfasst, und der zweite Fermenter umfasst einen zweiten Einlass zum Einführen eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials. Dabei sind der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein erstes Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das erste Verbindungselement dazu konfiguriert ist, zumindest einen Teil des Gases aus dem ersten Fermenter (Abgas) in den zweiten Fermenter zur Verwendung als mindestens ein Teil der gasförmigen Ausgangsmaterialien zu befördern. Die vorliegende Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation.

Bei der Gasfermentation wird ein gasförmiger Ausgangsstoff durch Mikroorganismen vergoren (umgesetzt). Der gasförmige Ausgangsstoff kann ein Industriegas oder ein synthetisches Gas (Synthesegas, Syngas) sein, das aus der Vergasung fossiler Brennstoffe, Biomasse oder (kommunaler) Abfallströme entsteht. Methanotrophe Bakterien können Methan (CH_4) in Gegenwart von Sauerstoff (O_2) durch aerobe Fermentation in verschiedene Produkte umwandeln (z. B. bakterielles Einzellerprotein, Single Cell Protein (SCP), Polyhydroxyalkanoate (PHA) oder andere interessante Verbindungen wie Ectoin). Kohlendioxid (CO_2) entsteht dabei als Nebenprodukt. Methanotrophe Bakterien können Methan als einzige Kohlenstoff- und Energiequelle nutzen. Bakterien, aber auch andere Mikroorganismen, wie zum Beispiel Archaeen, können Methanotrophe sein. Methyilotrophe sind Mikroorganismen, die sich von Methanol ernähren können. Einige Mikroorganismen können sich sowohl von Methan als auch von Methanol ernähren. Es gibt darüber hinaus weitere anaerobe Methanotrophe, die hier jedoch nicht berücksichtigt werden.

Acetogene Bakterien üben anaerobe Gasfermentation von Kohlenmonoxid (CO) oder Kohlendioxid (CO_2) in Gegenwart von Wasserstoff (H_2) aus und können genutzt werden, um beispielsweise Einzellerprotein, Biopolymere oder andere interessante Verbindungen herzustellen. Daher bietet die anaerobe Gasfermentation einen Weg zur Kohlenstoffbindung und kann Kohlendioxid nutzen, das als Nebenprodukt bei der aeroben Fermentation entsteht.

Dementsprechend ermöglicht die Kombination von anaerober und aerober Gasfermentation (Gasvergärung) eine Reduzierung des CO_2 -Fußabdrucks. Eine solche zweistufige Fermentation ist im Stand der Technik bekannt, z. B. aus Molitor et al., *Current Opinion in Chemical Biology*, 2017, 41, 84-92, und aus Marcellin et al., *Current Opinion in Chemical Biotechnology*, 2022, 76, 102723. Beispielsweise kann in einer ersten Stufe Acetat durch Synthesegas-Fermentation unter anaeroben Bedingungen hergestellt werden, gefolgt von einer zweiten Stufe, um das produzierte Acetat unter

aeroben Bedingungen in Einzelzellerprotein umzuwandeln. Kohlendioxid, das bei der aeroben Fermentation als Nebenprodukt entsteht, kann dann wieder in die erste Stufe eingeführt werden.

Allerdings wirkt sich Methan, das als Nebenprodukt (z. B. als nicht verbrauchter Bestandteil aus zugeführtem Gas) während der anaeroben Fermentation entsteht, negativ auf den CO₂-Fußabdruck aus, da es entweder in die Atmosphäre freigesetzt oder in einem zusätzlichen Schritt aufgefangen werden muss. Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, den CO₂-Fußabdruck, der sich aus einer kombinierten anaeroben und aeroben Gasfermentation ergibt, weiter zu senken.

Die vorliegende Erfindung betrifft ein System zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation wie oben beschrieben, wobei der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein zweites Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das zweite Verbindungselement dazu konfiguriert ist, zumindest einen Teil des Endgases aus dem zweiten Fermenter in den ersten Fermenter zur Verwendung als zumindest ein Teil des gasförmigen Ausgangsmaterials in diesem ersten Fermenter zu leiten.

Die vorliegende Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation, umfassend die Schritte:

(a) Bereitstellen eines ersten Fermenters und eines zweiten Fermenters, die jeweils eine Fermentationsbrühe umfassen, wobei der erste Fermenter in einem aeroben Modus betrieben wird und der zweite Fermenter in einem anaeroben Modus betrieben wird und wobei der erste und zweite Fermenter über die Gasphase gekoppelt sind.

(b) Einleiten eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials, das Methan umfasst, in den ersten Fermenter und Umwandeln des ersten gasförmigen Ausgangsmaterials in ein erstes Produkt und ein erstes Abgas (Endgas, Produktgas), und Einführen eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials, das Kohlendioxid umfasst, in den zweiten Fermenter und Umwandeln des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials in ein zweites Produkt und ein zweites Abgas,

wobei mindestens ein Teil des ersten Endgases durch ein erstes Verbindungselement in den zweiten Fermenter eingespeist wird, um als mindestens ein Teil des zweiten gasförmigen Einsatzmaterials verwendet zu werden, und

wobei mindestens ein Teil des zweiten Endgases durch ein zweites Verbindungselement in den ersten Fermenter eingespeist wird, um als mindestens ein Teil des ersten gasförmigen Einsatzmaterials verwendet zu werden.

Die vorliegende Erfindung ermöglicht es, mindestens einen Teil des ersten Endgases zur Herstellung des zweiten Produkts und mindestens einen Teil des zweiten Endgases zur Herstellung des ersten

Produkts zu verwenden. Vorzugsweise umfasst das erste Endgas Kohlendioxid und das zweite Endgas Methan. Somit kann zumindest der Teil des ersten Abgases, der Kohlendioxid umfasst, in den zweiten Fermenter eingespeist werden, und zumindest der Teil des zweiten Abgases, der Methan umfasst, kann in den ersten Fermenter eingespeist werden. Methan muss somit nicht in die Atmosphäre abgegeben oder in einem zusätzlichen Schritt gefiltert/abgebaut werden. Insbesondere wurde festgestellt, dass die anaerobe Fermentation im zweiten Fermenter ohne andere Kohlenstoffquelle außer der im ersten Endgas enthaltenen Kohlenstoffquelle, insbesondere Kohlendioxid, durchgeführt werden kann, was einen erheblichen Nutzen für die Umwelt mit sich bringt und den CO₂-Fußabdruck senkt. CO₂, das in den aeroben ersten Fermenter eingeleitet wird, kann diesen passieren und sich anreichern, wenn CH₄ verbraucht wird, und CH₄, das in den acetogenen zweiten Fermenter eingeleitet wird, kann ebenfalls durch den acetogenen zweiten Fermenter gelangen und dort vor dem Einleiten in den 1. Fermenter angereichert werden, da das CO₂ im 2. Fermenter ja verbraucht wird. Da somit kohlenstoffhaltige Gase in einer gekoppelten Gasfermentation gemäß der vorliegenden Erfindung vollständig verbraucht werden können, kann die CO₂-Bilanz erheblich verbessert werden.

Beim Einleiten der gekoppelten Gasfermentation besteht mindestens einer der ersten und zweiten gasförmigen Einsatzstoffe aus einem von außen in das System eingeführten Gas. Wenn das gasförmige Ausgangsmaterial Kohlendioxid umfasst, kann die Fermentation durch Einleiten des gasförmigen Ausgangsmaterials in den zweiten Fermenter gestartet werden, da Kohlendioxid in der Fermentationsbrühe (genauer gesagt in Wasser) eine bessere Löslichkeit aufweist als Methan. Die Fermentation kann auch durch Einleiten des ersten gasförmigen Ausgangsmaterials in den ersten Fermenter gestartet werden, z. B. wenn eine Gasquelle mit einem hohen Anteil an Methan verwendet wird, wie z. B. Erdgas oder Biogas. Alternativ kann die Fermentation durch Einleiten gasförmiger Einsatzstoffe sowohl in den ersten als auch in den zweiten Fermenter gestartet werden.

Bei der Fermentation entstehen Endgase, die im jeweils anderen Fermenter wiederverwendet werden können. Beispielsweise kann in nachfolgenden Zyklen der Fermentation (d.h. nachdem ein gasförmiges Ausgangsmaterial in den ersten und/oder zweiten Fermenter eingeführt wurde) das erste gasförmige Ausgangsmaterial extern eingeführtes Gas (z. B. Sauerstoff) und mindestens einen Teil des zweiten Endgases umfassen (z. B. Methan), während der zweite gasförmige Einsatzstoff extern zugeführtes Gas (z. B. Wasserstoff) und mindestens einen Teil des ersten Endgases umfassen kann. Der zweite gasförmige Einsatzstoff kann sogar aus dem ersten Endgas oder vorzugsweise aus einem Teil davon bestehen, nachdem zumindest im ersten Endgas enthaltener Sauerstoff entfernt wurde. Vorzugsweise wird Endgas, das zumindest Methan, Wasserstoff und Kohlendioxid umfasst, zwischen dem ersten und dem zweiten Fermenter ausgetauscht. Eine Zusammensetzung jedes der ersten und

zweiten Endgase kann zur Prozesssteuerung kontinuierlich gemessen werden, z. B. mittels eines Gassensors. In den ersten und zweiten Anschlusselementen können Gassensoren angeordnet sein.

Die im ersten und zweiten Fermenter enthaltene Fermentationsbrühe kann Mikroorganismen umfassen, ausgewählt aus Bakterien, Archaeen, Algen, Hefen oder einer Mischung davon. Die im ersten Fermenter enthaltene Fermentationsbrühe kann Methanotrophe enthalten, während die im zweiten Fermenter enthaltene Fermentationsbrühe Acetogene enthalten kann. Jeder aerobe Mikroorganismus, der ein Produkt von kommerziellem Interesse liefert, kann im ersten Fermenter gezüchtet (kultiviert) werden, und jeder anaerobe Mikroorganismus, der ein Produkt von kommerziellem Interesse liefert, kann im zweiten Fermenter gezüchtet werden. Vorzugsweise wird das Verfahren mit Rein- oder Mischkulturen durchgeführt, die mindestens ein methanotrophes Bakterium bzw. ein acetogenes Bakterium umfassen. Weiterhin bevorzugt wird das Verfahren mit Rein- oder Mischkulturen umfassend mindestens ein methylotrophes Bakterium, das sich von Methanol ernährt, im ersten, aeroben Fermenter durchgeführt.

Unter Methanotrophen werden im Sinne der vorliegenden Anmeldung aerobe Methanotrophe verstanden, also Mikroorganismen, die CH_4 durch Oxidation mit O_2 zu Zielprodukten und CO_2 als Nebenprodukt verstoffwechseln können. Methylotrophe Hefe kann z. B. *Pichia pastoris* sein.

Unter Acetogenen werden im Sinne der vorliegenden Anmeldung weiters Mikroorganismen verstanden, die ihren Kohlenstoff aus CO_2 und/oder CO und ihre Energie aus H_2 beziehen. Sie können im Stoffwechsel Acetat bilden. Die Acetogenen können gegenüber CH_4 tolerant sein, produzieren es jedoch nicht in nennenswerten Mengen (wie dies bei methanogenen Bakterien in einer Biogasanlage der Fall wäre, bei der es sich ebenfalls um einen anaeroben Prozess handelt).

SCP (single cell protein, bakterielles Einzellerprotein) kann aus Methan unter Verwendung eines oder mehrerer der folgenden Stämme hergestellt werden: *Pseudomonas sp.*, *Methylomonas Methanica*, *Methylococcus capsulatus*, *Methylococcus vinelandii*, *Methylomonas Carbonatophila*, *Methylococcus Capsulatus* - Stamm Bath, *Methylosinus Sporium*, *Methylomonas rubrum*, *Methylococcus ucrainicus*, *Methylosinus Trichosporium*, *Methylomonas Rosaceus*, *Methylococcus fulvus*, *Methylosinus Trichosporium TG*, *Methylomonas agile*, *Methylococcus thermophilus*, *Methylocystis parvus*, *Methylomonas albus*, *Methylococcus albus*, *Methylobacterium organophilum*, *Methylomonas Streptobakterium*, *Methylococcus minimus*, *Mycobacterium methanicum*, *Methylomonas Methanooxidans*, *Methylococcus luteus*, *Mycobacterium cuneatum*, *Methylomonas Methanitricans*, *Methylococcus bovis*, *Nocardia rhodochrous*, *Pseudomonas-Stamm L-8*, *Methylococcus Chroococcus*, *Nocardia ucrainica*, *Pseudomonas-Stamm L-47*, *Methylococcus whittenburii*, *Rhodopseudomonas Gelatine*, *Hansenula polymorpha*, *Pichia pastoris*, *Pseudomonas sp.*

PHB kann aus Methan unter Verwendung eines oder mehrerer der folgenden Stämme hergestellt werden: *Methylocystis* sp. *WRRC1*, *Methylosinus Trichosporium*, *Methylobacterium organophilum*, *Methylocystis hirsuta*.

Ectoine kann mithilfe von *Methylocystis* sp. *WRRC1* und/oder *Methylobacterium organophilum* aus Methan hergestellt werden.

Die Mikroorganismen können aus natürlich vorkommenden und/oder genetisch veränderten Mikroorganismen ausgewählt werden. Beispielsweise kann jede Fermentationsbrühe 0,1 bis 10 Gew.-% Mikroorganismen und 90 bis 99,9 Gew.-% Wasser (einschließlich Nährstoffe, ohne Berücksichtigung der Gasfraktion, wie z. B. Gasblasen) enthalten. Der typische Gasanteil im Fermenter beträgt 5 bis 20 Vol.-%. Wenn die Fermentation mit einem Inokulum gestartet wird, kann die Zelldichte geringer sein, z. B. unter 0,1 Gew.-% der Mikroorganismen. Während des Wachstums kann für Methanotrophe eine Dichte von 0,1 bis 10 Gew.-% erreicht werden; typische Werte beim Betrieb des Fermenters können zwischen 1 und 30 g/l Trockengewicht, also 0,1 bis 3 Gew.-%, und Wasser zwischen 99,9 und 97 Gew.-% liegen. Bei Acetogenen können die Werte im gleichen Bereich liegen.

Das erste Produkt, das durch aerobe Fermentation gewonnen werden kann, kann SCP (Einzellerprotein) sein (z.B. für Futter- und/oder Lebensmittelanwendungen), oder auch Säuren (z.B. Aminosäuren, Nukleinsäuren), Alkohole, Monomere zur Herstellung von Biopolymeren (z.B. Milchsäure, Laktat) und Biopolymere (z. B. Polyhydroxyalkanoate wie Polyhydroxybutyrat (PHB); Polymilchsäure (PLA); Polyhydroxy-butyrat-co-valerat (PHBV); EPS (extrazelluläre polymere Substanz).

Das zweite Produkt, das durch anaerobe Fermentation erhalten werden kann, können Einzelzellprotein (z. B. für Futter- und/oder Lebensmittelanwendungen), Alkohole, Säuren (z.B. Aminosäuren; Nukleinsäuren; flüchtige Fettsäuren, die C₂-C₆-Carbonsäuren umfassen), ergeben, ebenso Monomere zur Herstellung von Biopolymeren (z. B. Milchsäure, Laktat) und Biopolymere (z. B. Polyhydroxyalkanoate (PHA), wie PHB, PLA, PHBV).

Vorzugsweise umfassen das erste und das zweite Produkt Einzelzellprotein (SCP) für Futtermittel- oder Lebensmittelanwendungen, Bausteine für Polymere wie Milchsäure (LA), Essigsäure (Acetat), Biopolymere wie Polyhydroxyalkanoate (PHA), insbesondere Polyhydroxybutyrat (PHB) oder kleine Moleküle wie Ectoine.

Die Fermentationsbrühe im ersten Fermenter kann wasserstoffoxidierende Bakterien (Knallgasbakterien) und/oder photosynthetische Organismen (Mikroalgen) enthalten. Außerdem kann Ammoniak direkt der Fermentationsbrühe des ersten Fermenters zugesetzt werden (z. B. in Salzform als Stickstoffquelle), anstatt es als Teil des ersten gasförmigen Einsatzmaterials einzuführen. Zum Beispiel mit den Stämmen *Methylococcus capsulatus* und/oder *Methylophilus methylotrophus* kann Methan in Einzelzellprotein (SCP) umgewandelt werden, während bei den Stämmen *Methylocystis*

parvus OBBP, *Methylobacterium extorquens* und/oder *Methylocystis* sp. GB25, Biopolymere (z.B. Polyhydroxybutyrat (PHB)) hergestellt werden. Dementsprechend kann die Fermentationsbrühe im ersten Fermenter Methanotrophe enthalten, die in der Lage sind, SCP und/oder PHB und andere PHA zu produzieren. Es können Reinkulturen und Mischkulturen verwendet werden. Eine Mischkultur bestehend aus den Stämmen *Methylococcus capsulatus*, *Alcaligenes Acidovorans*, *Bacillus brevis* und *Bacillus firmus* ist vorteilhaft für die Herstellung von SCP aus Methan im ersten Fermenter, insbesondere wenn die Mischkultur 70 bis 90 % (nach Anzahl) *Methylococcus capsulatus* enthält.

Die Fermentationsbrühe des ersten Fermenters kann weiterhin methylotherme Bakterien enthalten, die eine Umwandlung von und in Methanol ermöglichen. Dies führt zu einer höheren Biomassedichte und Produktivität, da Methanol in Wasser besser löslich ist als Methan. Als Methanol verbrauchender Stamm zur Produktion von SCP hat sich das Vorhandensein von *Methylophilus methylotrophus* in der Fermentationsbrühe des ersten Fermenters als vorteilhaft erwiesen. Zur Herstellung von PH wird eine Fermentationsbrühe, die *Methylobacterium extorquens* enthält, bevorzugt. Synthetische Methylotherme und Methanotrophe sind auch möglich, beispielsweise in einer Fermentationsbrühe mit *Saccharomyces cerevisiae*.

Die Fermentationsbrühe im zweiten Fermenter kann anaerobe Archaeen enthalten. Für die Umwandlung in Ethanol können beispielsweise *Clostridium ljungdahlii* oder *Clostridium carboxidivorans* verwendet werden, und *Acetobacterium Woodii* kann zur Umwandlung in Acetat verwendet werden. In einer bestimmten Ausführungsform können Mikroalgen (z.B. *Synechocystis* sp. Stamm PCC 6714) kann zur Umwandlung in interessierende Produkte wie PHB oder Laktat verwendet werden. Dementsprechend kann die Fermentationsbrühe im zweiten Fermenter Acetogene umfassen, die in der Lage sind, Laktat, Ethanol, Acetat, PHB und/oder andere Produkte von Interesse zu produzieren.

Die gemeinsame Kultivierung verschiedener Mikroorganismen in den Fermentern ermöglicht die effiziente Nutzung verschiedener Rohstoffe. Beispielsweise kann die Co-Kultivierung mit wasserstoffoxidierenden Bakterien (HOB), Mikroalgen und/oder aeroben Archaeen im ersten Fermenter eine günstige Zusammensetzung des ersten Endgases ergeben, von dem mindestens ein Teil in den zweiten Fermenter eingespeist wird. Ebenso kann die Co-Kultivierung mit anaeroben Archaeen im zweiten Fermenter zu einer günstigen Zusammensetzung des zweiten Endgases führen, von dem mindestens ein Teil in den ersten Fermenter eingespeist wird.

Der erste gasförmige Einsatzstoff kann neben Methan auch Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserstoff, Stickstoff, Ammoniak oder eine Mischung davon umfassen. Vorzugsweise umfasst das erste gasförmige Ausgangsmaterial Sauerstoff (O₂), um einen Betrieb im aeroben Modus zu

ermöglichen. Der erste Einsatzstoff kann außerdem Stickstoff umfassen, der zum Strippen von mindestens einem Teil des ersten Endgases, insbesondere Kohlendioxid, aus dem ersten Fermenter verwendet werden kann. Die gasförmigen Einsatzstoffe können an unterschiedlichen Stellen in den Fermentern zugeführt werden.

Beispielsweise kann der erste gasförmige Einsatzstoff 10 bis 95 Vol.-% Methan und 5 bis 60 Vol.-% Sauerstoff umfassen. Vorzugsweise umfasst der erste gasförmige Einsatzstoff Methan und Sauerstoff, beispielsweise 40 bis 90 Vol.-% Methan und 10 bis 60 Vol.-% Sauerstoff. Es wurde festgestellt, dass bei Auswahl einer solchen Zusammensetzung eine hohe Wachstumsrate der Zellen, die das erste Produkt umfassen, und eine hohe Ausbeute des ersten Produkts erhalten werden kann. Die genaue Gaszusammensetzung kann von der Zusammensetzung der Fermentationsbrühe (also den verwendeten Mikroorganismen) und dem gewünschten Produkt abhängen.

Der erste Fermenter kann mit einem Methanüberschuss betrieben werden. Dadurch kann die Explosionsgefahr verringert oder vermieden werden. Unverbrauchtes Methan kann im ersten Endgas enthalten sein und dem zweiten Fermenter zugeführt werden, wo es von Kohlendioxid gereinigt und anschließend zum ersten Fermenter zurückgeschickt werden kann, wo es erneut für die aerobe Fermentation verwendet werden kann. Das unverbrauchte Methan kann somit im System zirkulieren.

Um die Explosionsgefahr weiter zu verringern, kann der erste gasförmige Einsatzstoff ein Inertgas, insbesondere Stickstoff, umfassen; und/oder der erste Fermenter kann mit einem Inertgas gespült werden. Es kann eine untere oder obere Explosionsgrenze (UEG, OEG) in einem Kopfraumbereich des ersten Fermenters gemessen und das Inertgas eingeleitet werden, wenn ein bestimmter Wert, z. B. 30 % der UEG oder OEG, erreicht wird.

Der zweite gasförmige Einsatzstoff kann neben Kohlendioxid auch Kohlenmonoxid, Methan, Wasserstoff oder eine Mischung davon umfassen. Da der zweite Fermenter ein anaerober Fermenter ist, wird während der Fermentation Kohlendioxid (und optional Kohlenmonoxid) verbraucht (d.h. abgereichert/reduziert). Es kann im zweiten gasförmigen Einsatzstoff ein Reduktionsmittel enthalten sein. Vorzugsweise umfasst der zweite gasförmige Einsatzstoff Wasserstoff (H_2).

Darüber hinaus bedeutet der Betrieb des zweiten Fermenters im anaeroben Modus typischerweise, dass im Wesentlichen kein Sauerstoff vorhanden ist. Abhängig von der Art der in der Fermentationsbrühe enthaltenen Mikroorganismen kann jedoch eine geringe Menge Sauerstoff toleriert werden, z. B. von aerotoleranten Anaerobiern und Mikroaerophilen. Vorzugsweise beinhaltet das zweite gasförmige Ausgangsmaterial weniger als 1 Vol.-% Sauerstoff.

Der zweite gasförmige Einsatzstoff kann Kohlendioxid und Wasserstoff umfassen, z. B. 20–40 -Vol.-% Kohlendioxid und 60–80 Vol.-% Wasserstoff, insbesondere ein Verhältnis von Kohlendioxid zu Wasserstoff von 1:2. Vorzugsweise umfasst der zweite gasförmige Einsatzstoff Kohlendioxid,

Methan und Wasserstoff. Als Quelle für Methan und Kohlendioxid kann das erste Endgas genutzt werden. Wasserstoff kann entweder im ersten Endgas enthalten sein oder über eine externe Gasquelle zugeführt werden. Vorzugsweise umfasst der zweite gasförmige Einsatzstoff 5–70 Vol.-% Methan, 10–70 Vol.-% Kohlendioxid und 10–70 Vol.-% Wasserstoff; stärker bevorzugt 10–55 Vol.-% Methan, 15–30 Vol.-% Kohlendioxid und 30–60 Vol.-% Wasserstoff. Es wurde festgestellt, dass bei Auswahl einer solchen Zusammensetzung eine hohe Wachstumsrate von Zellen, die das zweite Produkt umfassen, und eine hohe Ausbeute des zweiten Produkts erhalten werden kann.

Der erste und/oder zweite gasförmige Einsatzstoff kann aus verschiedenen fossilen und/oder erneuerbaren Gasquellen stammen. Zum Beispiel synthetisches Gas (Synthesegas; also ein Gas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid), Vergasungsgas, Biogas, (synthetisches) Erdgas, Luft, Abgas (z. B. aus einer Mülldeponie, einem Kohlebergwerk oder einem industriellen Prozess (z.B. Verbrennung, Stahl- oder Zementherstellung) oder eine Mischung davon verwendet werden. Vorzugsweise wird ein fester Ausgangsstoff (wie Biomasse, Abfall oder Kohle) in Methan und Kohlendioxid umgewandelt, um jeweils im ersten und zweiten Fermenter verwendet zu werden.

Als Quelle für Methan kann z. B. diene: Erdgas (das 85 bis 95 % Methan enthalten kann), Biogas (das 50 bis 75 % Methan enthalten kann; und auch Kohlendioxid enthalten kann), Deponiegas (z. B. 50 % Methan, 50 % Methan), Biomassevergasung (z. B. aus trockener Biomasse durch Vergasung gewonnen) und das Sabatier-Verfahren, bei dem CO_2 zu CH_4 reduziert werden kann.

Als Sauerstoffquelle kann z. B. Luft oder Elektrolyse von Wasser gewählt werden. Wasserstoff kann auf verschiedenen Wegen hergestellt werden, z. B. durch Elektrolyse (angetrieben z. B. durch Solarenergie, Windenergie, Kernenergie), Kohlevergasung und Dampfreformierung. Vorzugsweise wird Wasserstoff aus erneuerbarer Energie hergestellt. Weiterhin bevorzugt wird Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser hergestellt.

Kohlendioxid kann beispielsweise aus einem Zementwerk oder einer Müllverbrennungsanlage gewonnen werden. Für CO_2 werden solche Punktquellen der direkten Lufterfassung vorgezogen.

Die ersten und zweiten gasförmigen Einsatzstoffe können beide aus derselben Gasquelle stammen. Dies vereinfacht den Aufbau der Anlage, da in beide Fermenter der gleiche Gasstrom eingeleitet werden kann. Dies ist ein Vorteil gegenüber einem katalytischen Prozess, bei dem Verunreinigungen die Lebensdauer erheblich verkürzen können, was häufige Stopps erforderlich macht. Wenn für beide gasförmigen Einsatzstoffe dieselbe Gasquelle verwendet wird, kann Sauerstoff separat in den ersten Fermenter eingeführt werden, um die aerobe Fermentation durchzuführen, z. B. über eine Düse oder einen Begaser an einer oder mehreren Stellen.

Die Fermenter können je nach verfügbarem gasförmigem Ausgangsmaterial (und auch Mikroorganismen für die Fermentationsbrühen) betrieben werden. Aufgrund einer sich mit fortschreitender Fermentationszeit ändernden Zusammensetzung der Endgase kann auch ein schwankendes gasförmiges Ausgangsmaterial (mit einer im Laufe der Zeit variierenden Gaszusammensetzung) verwendet werden, z. B. direkt aus der Industrie. Dadurch können kostspielige Gaslagertanks vermieden werden. Die Entscheidung, welche gasförmigen Rohstoffe und welche Mikroorganismen eingesetzt werden sollen, kann durch künstliche Intelligenz unter Berücksichtigung von Angebot und Nachfrage getroffen werden, sodass die Erfindung für den Einsatz in einer Bioraffinerie geeignet ist.

In einer Ausführungsform umfasst der erste gasförmige Einsatzstoff Sauerstoff (O_2) und/oder der zweite gasförmige Einsatzstoff umfasst Wasserstoff (H_2). Dies ermöglicht eine effiziente aerobe Fermentation im ersten Fermenter in Gegenwart von Sauerstoff und eine effiziente anaerobe Fermentation im zweiten Fermenter in Gegenwart von Wasserstoff.

Der erste und/oder zweite gasförmige Einsatzstoff kann in einer Gasvorbehandlungseinheit vorbehandelt werden, bevor er in den ersten und/oder zweiten Fermenter eingeführt wird. Die Vorbehandlung der gasförmigen Ausgangsstoffe kann Folgendes umfassen: Umwandlung von Kohlendioxid und Wasserstoff mittels des Sabatier-Verfahrens (in Methan); Anwendung der direkten Luftabscheidung (z. B. um Kohlendioxid und/oder Methan direkt aus der Atmosphäre zu gewinnen); Filtern eines bestimmten Gases; Umwandlung von synthetischem Gas in Methan (SNG); Umwandlung von Synthesegas in Methan (Methanisierung); Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff; und Umwandlung auf thermochemischem, katalytischem und/oder biotechnologischem Wege. Bei der Abtrennung von unerwünschtem Gas (z. B. höhere Kohlenwasserstoffe) bei der Vorbehandlung kann dieses Gas verbrannt werden, um thermische Energie zu erzeugen, die dann zum Betrieb der Anlage, z. B. des ersten Fermenters und des zweiten Fermenters, z. B. durch Erhitzen oder Kühlen, genutzt werden kann.

Mit dem Sabatier-Verfahren können Kohlendioxid und Wasserstoff in Methan und Wasser umgewandelt werden. Zur Beschleunigung der Reaktion kann ein Katalysator eingesetzt werden, beispielsweise ein Nickelkatalysator nach dem Stand der Technik. Das im Sabatier-Verfahren erzeugte Wasser kann anschließend durch Elektrolyse in einem Elektrolyseur in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten werden, wobei anschließend mindestens ein Teil des Sauerstoffs in den ersten Fermenter und mindestens ein Teil des Wasserstoffs in den zweiten Fermenter eingeleitet wird.

Die ersten und zweiten Verbindungselemente sind so konfiguriert, dass sie mindestens einen Teil des ersten Endgases dem zweiten Fermenter und mindestens einen Teil des zweiten Endgases dem

ersten Fermenter zuführen. Die Verbindungselemente können Verbindungsrohre umfassen. Beispielsweise kann das erste Verbindungselement ein erstes Verbindungsrohr und das zweite Verbindungselement ein zweites Verbindungsrohr umfassen. Jedes Verbindungsrohr kann aus zwei oder mehr Segmenten bestehen.

Eine Öffnung des ersten Verbindungselements (z. B. ein Ende eines ersten Verbindungsrohrs) kann eine erste Öffnung des ersten Fermenters umschließen, so dass zumindest ein Teil des ersten Abgases durch diese erste Öffnung aus dem ersten Fermenter austreten und geführt werden kann durch das erste Verbindungselement. Um diesen Teil des ersten Endgases anschließend in den zweiten Fermenter einzuspeisen, kann eine andere Öffnung des ersten Verbindungselements (z. B. das andere Ende des ersten Verbindungsrohrs) eine erste Öffnung des zweiten Fermenters (die in einem Mantel angeordnet sein kann) umschließen oder eine Abdeckung des zweiten Fermenters), durch die der Teil des ersten Endgases in den zweiten Fermenter gelangen kann. Ebenso kann eine Öffnung des zweiten Verbindungselements (z. B. ein Ende eines zweiten Verbindungsrohrs) eine zweite Öffnung des zweiten Fermenters umschließen, so dass zumindest ein Teil des zweiten Endgases durch diese zweite Öffnung aus dem zweiten Fermenter austreten kann durch das zweite Anschlusselement geführt werden. Um diesen Teil des zweiten Endgases anschließend in den ersten Fermenter einzuspeisen, kann eine andere Öffnung des zweiten Verbindungselements (z. B. das andere Ende des zweiten Verbindungsrohrs) eine zweite Öffnung des ersten Fermenters umschließen, durch die der Teil des zweiten Endgas in den ersten Fermenter gelangen kann.

Um einen Gasfluss in die ersten und zweiten Öffnungen des jeweiligen Fermenters zu ermöglichen, können diese Öffnungen über einem Fermentationsvolumen (d.h. dem mit Fermentationsbrühe gefüllten Volumenanteil des jeweiligen Fermenters) angeordnet sein. Beispielsweise können die erste und zweite Öffnung in einem Mantel oder einem Deckel des jeweiligen Fermenters angeordnet sein. Die ersten und zweiten Öffnungen können weiterhin einander gegenüberliegend angeordnet sein, so dass Gasströme durch die jeweiligen Öffnungen sich nicht gegenseitig stören können.

Jede der ersten und zweiten Öffnungen in den jeweiligen Fermentern kann mit einem Verschlusselement, beispielsweise einem Deckel oder einem Ventil, ausgestattet sein. Dies ermöglicht beispielsweise das Verschließen der Öffnungen des ersten Fermenters beim Einleiten des ersten gasförmigen Einsatzstoffs, so dass ein unerwünschter Durchtritt des ersten gasförmigen Einsatzstoffs in Richtung des zweiten Fermenters durch die erste und/oder zweite Öffnung vermieden werden kann. Auch beim Leiten eines Teils des ersten Endgases durch die erste Öffnung des ersten Fermenters in das erste Verbindungselement und in Richtung des zweiten Fermenters kann die zweite Öffnung des ersten Fermenters verschlossen werden, so dass ein unerwünschter Durchtritt eines Teils davon verhindert wird. Das Eindringen des ersten Endgases in das zweite Verbindungselement kann

vermieden werden. Typischerweise werden die Fermenter kontinuierlich betrieben, aber auch eine Batch-Fahrweise (Satzbetrieb) ist möglich.

Das System kann weiterhin ein erstes Zuführelement umfassen, das mit dem ersten Einlass verbunden ist, und ein zweites Zuführelement, das mit dem zweiten Einlass verbunden ist, wobei das erste Verbindungselement mit dem zweiten Zuführelement gekoppelt ist und das zweite Verbindungselement mit dem ersten Zuführelement gekoppelt ist. Dies ermöglicht es, zumindest einen Teil des über das erste Verbindungselement zugeführten ersten Endgases mit extern zugeführtem Gas zu dem zweiten gasförmigen Einsatzstoff zu kombinieren, bevor dieser zweite gasförmige Einsatzstoff in den zweiten Fermenter eingeleitet wird. Dadurch kann die Gaszusammensetzung homogenisiert und die Prozessstabilität erhöht werden. Ebenso kann zumindest ein Teil des durch das zweite Verbindungselement zugeführten zweiten Endgases bereits vor der Einleitung dieses ersten gasförmigen Einsatzstoffes in den ersten Fermenter mit extern zugeführtem Gas zu dem ersten gasförmigen Einsatzstoff kombiniert werden. Das erste Zuführelement kann ein erstes Rohr umfassen und das zweite Zuführelement kann ein zweites Rohr umfassen. Jedes Zuführrohr kann aus zwei oder mehr Segmenten bestehen.

Das System kann ferner eine Gasverarbeitungseinheit umfassen, die so konfiguriert ist, dass sie eine Zusammensetzung des ersten Endgases ändert, bevor mindestens ein Teil des ersten Endgases in den zweiten Fermenter eingespeist wird, oder eine Zusammensetzung des zweiten Endgases ändert, bevor mindestens ein Teil des zweiten Endgases in den ersten Fermenter zugeführt wird. Dementsprechend kann mindestens eine Komponente/Fraktion des ersten Endgases und des zweiten Endgases durch eine Gasverarbeitungseinheit geleitet werden, um eine Zusammensetzung des ersten Endgases oder des zweiten Endgases zu ändern, bevor mindestens ein Teil des ersten Endgases dem 2. Fermenter oder zumindest ein Teil des zweiten Endgases dem 1. Fermenter zugeführt wird.

Die Gasaufbereitungseinheit kann im ersten Anschlusselement oder im zweiten Anschlusselement angeordnet sein. Wenn die Verbindungselemente beispielsweise Verbindungsrohre umfassen, wobei jedes Verbindungsrohr zwei Segmente umfassen kann, kann die Gasaufbereitungseinheit zwischen zwei Segmenten des ersten oder zweiten Verbindungsrohrs angeordnet sein.

Die Gasverarbeitungseinheit kann einen Filter (z. B. ein Sieb, eine Membran), einen Adsorber (z. B. einen Wäscher), einen Katalysator oder eine Kombination davon umfassen. Dementsprechend kann die Behandlung des ersten Abgases oder des zweiten Abgases Filterung, Adsorption, Adsorption oder eine Kombination davon umfassen.

Beispielsweise kann die Behandlung des ersten Endgases das Filtern und Entfernen von Sauerstoff oder die Verdünnung mit einem anderen Gas zur Reduzierung des Sauerstoffgehalts umfassen, um die

anaerobe Fermentation im zweiten Fermenter nicht zu behindern. Es wurden keine Einschränkungen hinsichtlich der maximalen Gehalte an restlichem Methan, das im ersten Endgas enthalten ist und in den zweiten Fermenter eingespeist wird, und restlichem Kohlendioxid, das im zweiten Endgas enthalten ist und in den ersten Fermenter eingespeist wird, festgestellt.

Die Gasaufbereitungseinheit kann eine Vorrichtung umfassen, um Gase hinsichtlich ihrer Molekülgröße zu filtern. Das Molekularsieb kann bündig mit einer Innenwand des ersten oder zweiten Anschlusselements ausgebildet sein, so dass das Gas zwangsläufig das Element passiert. Ein Gas, das das Element nicht passieren kann, kann abgesaugt werden (z. B. durch Vakuumabsaugung), aus dem ersten oder zweiten Anschlusselement entfernt und gegebenenfalls einer weiteren Behandlung unterzogen werden, während dem Fermenter ein Gas zugeführt werden kann, das das Molekularsieb passieren kann über, mit Zuführung über das jeweilige Verbindungselement zum jeweiligen Fermenter. Alternativ kann ein Gas, das den Molekularfilter nicht passieren kann, durch das jeweilige Verbindungselement dem jeweiligen Fermenter zugeführt werden, während ein Gas, das das Element passieren kann, entnommen und gegebenenfalls einer weiteren Behandlung unterzogen werden kann.

Die Gasaufbereitungseinheit kann auch eine Membran, beispielsweise eine Hohlfasermembran, zur Gastrennung umfassen. Die Membran kann bündig mit einer Innenwand des ersten oder zweiten Anschlusselements abschließen, so dass das Gas zwangsläufig die Membran passiert.

Die Zusammensetzung des ersten oder zweiten Endgases kann nicht nur durch die Trennung verschiedener Gase voneinander (z. B. durch Filterung) verändert werden, sondern auch durch chemische Behandlung, die entweder alternativ oder zusätzlich zur Gastrennung durchgeführt werden kann. Wenn das zweite Endgas Kohlendioxid enthält, kann es durch die Gasverarbeitungseinheit geleitet werden, um das Kohlendioxid in Methan umzuwandeln. Das gebildete Methan kann als erster gasförmiger Einsatzstoff genutzt werden, was eine noch deutlichere Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks ermöglicht.

Die Zusammensetzung des ersten oder zweiten Endgases kann in Gegenwart eines externen Gases geändert werden, das in die Gasverarbeitungseinheit eingeführt wird. Beispielsweise kann Biogas, Erdgas, Deponiegas oder Luft verwendet werden, die vor der Einleitung in die Gasaufbereitungseinheit optional einer Vorbehandlung in einer Gasvorbehandlungseinheit unterzogen werden können.

Das System kann auch zwei Gasverarbeitungseinheiten umfassen, wobei eine Gasverarbeitungseinheit zur Behandlung des ersten Endgases und die andere Gasverarbeitungseinheit zur Behandlung des zweiten Endgases konfiguriert ist.

Das System kann weiterhin einen Elektrolyseur umfassen, der dazu konfiguriert ist, Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufzuspalten, wobei der Elektrolyseur mit dem ersten Einlass und dem zweiten Einlass verbunden werden kann, um mindestens einen Teil des Sauerstoffs in den ersten

Fermenter einzuspeisen und mindestens einen Teil des Wasserstoffs in den zweiten Fermenter. Dementsprechend kann Wasser in dem mit dem ersten Fermenter und dem zweiten Fermenter verbundenen Elektrolyseur in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten werden, wobei zumindest ein Teil des Sauerstoffs in den ersten Fermenter und zumindest ein Teil des Wasserstoffs in den zweiten Fermenter eingespeist wird. Der Elektrolyseur kann in der Gasvorbehandlungseinheit enthalten sein, um von außen zugeführtes Wasser zu behandeln. Beispielsweise kann Grundwasser oder Wasser aus einem Fluss, einem Bach oder einem See verwendet werden, das gegebenenfalls vorbehandelt, z. B. einer Filterung, Entionisierung und/oder Destillation unterzogen werden kann. Auch Wasser, das im ersten Fermenter bei der aeroben Fermentation als Nebenprodukt entstehen kann, kann einer Elektrolyse unterzogen werden. Beispielsweise kann Wasser, das als Wasserdampf im ersten Abgas enthalten ist, mittels einer Gasaufbereitungseinheit abgetrennt und dem Elektrolyseur zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff zugeführt werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Zirkulation bereits im System vorhandener Gase/Dämpfe.

Das System kann weiterhin einen Vorratsbehälter und/oder einen Entladebehälter umfassen, der mit dem ersten Fermenter und/oder dem zweiten Fermenter verbunden werden kann. Dementsprechend kann der erste Fermenter oder der zweite Fermenter mit einem Entleerungsgefäß zum Entleeren des ersten Fermenters oder des zweiten Fermenters verbunden werden; und/oder der erste Fermenter oder der zweite Fermenter können mit einem Vorratsbehälter verbunden werden, der eine Fermentationsbrühe umfasst, um den ersten Fermenter oder den zweiten Fermenter wieder aufzufüllen. Diese Anordnung kann unerwünschte Unterbrechungen verkürzen, wenn die Fermentationsbrühe des ersten oder zweiten Fermenters ruht (d.h. verbraucht ist) und erneuert werden muss, wodurch die Betriebseffizienz verbessert wird. Sowohl der Vorratsbehälter als auch der Austragsbehälter können ähnlich wie die Fermenter aufgebaut sein. Das Füllvolumen jedes Gefäßes kann dem Fermentationsvolumen der Fermenter entsprechen, oder zumindest dem Fermentationsvolumen des größeren der Fermenter (falls der erste und zweite Fermenter nicht die gleiche Größe haben). Dadurch ist sichergestellt, dass der gesamte Inhalt eines beliebigen Fermenters in das Austragsgefäß abgelassen werden kann und dass ein beliebiger Fermenter über das Vorratsgefäß bis zum Maximalfüllstand gefüllt werden kann.

Die Fermentationsbrühe des Vorratsbehälters kann eine ähnliche oder identische Zusammensetzung wie die Fermentationsbrühe des ersten oder zweiten Fermenters haben. Dies gewährleistet eine stabile Verarbeitung, und die Verarbeitungsparameter (z.B. Temperatur, Druck) müssen nicht an eine andere Zusammensetzung angepasst werden.

Im Vorratsgefäß kann die Fermentationsbrühe kontinuierlich gerührt werden. Als vorteilhaft erwies sich die Verwendung einer Rotationsgeschwindigkeit von 1 bis 50 U/min im Vorratsgefäß. Optional

kann eine minimale Gaszufuhr verwendet werden, um die Kulturen in den Vorratsgefäßen aufrechtzuerhalten.

Das System kann auch zwei oder mehr Vorratsbehälter umfassen, die an den ersten Fermenter oder den zweiten Fermenter angeschlossen werden können; und/oder das System kann zwei oder mehr Austragsgefäße umfassen, die an den ersten Fermenter oder den zweiten Fermenter angeschlossen werden können. Einer der Vorratsbehälter kann eine Fermentationsbrühe für die aerobe Fermentation enthalten und der andere kann eine Fermentationsbrühe für die anaerobe Fermentation enthalten. Dadurch wird die Betriebseffizienz weiter verbessert, da beispielsweise sowohl der erste als auch der zweite Fermenter gleichzeitig entleert oder neu befüllt werden können.

Der erste Fermenter und der zweite Fermenter können sowohl im aeroben Modus als auch im anaeroben Modus betrieben werden. Das heißt, beim Wiederbefüllen des ersten und zweiten Fermenters können die jeweiligen Fermentationsbrühen und gasförmigen Einsatzstoffe so gewählt werden, dass der erste Fermenter, der zuvor im aeroben Modus betrieben wurde, anschließend im anaeroben Modus betrieben werden kann, und der zweite Fermenter, der zuvor im anaeroben Modus betrieben wurde, kann dann im aeroben Modus gefahren werden. Dementsprechend können der erste Fermenter und der zweite Fermenter abwechselnd in einem aeroben Modus und in einem anaeroben Modus betrieben werden. Durch die Umkehrung der aeroben/anaeroben Natur der Fermenter kann das Kontaminationsrisiko verringert werden. Wenn beispielsweise zwei Austragsgefäße und zwei Vorratsgefäße verwendet werden, kann die aerobe/anaerobe Natur der Fermenter sogar innerhalb weniger Stunden statt innerhalb einiger Tage umgekehrt werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Flexibilität zur Anpassung an unterschiedliche Einsatzstoffe, wodurch die vorliegende Erfindung für den Einsatz in einer Bioraffinerie geeignet ist.

Der erste und der zweite Fermenter können jeweils ein Schlaufenreaktor, eine Blasensäule oder ein Lufthebereaktor (Airlift-reaktor) sein. Sie können jeweils eine zylindrische Form haben. Bei der Verwendung von zylindrischen Fermentern kann das Durchmesser-Höhe-Verhältnis zwischen 1:3 und 1:50 variieren. Ein Pfropfenströmungsreaktor (PFR, plug flow reactor), eine Art Schlaufenreaktor, kann zu einer höheren Rohstoffumwandlung führen als beispielsweise ein kontinuierlich gerührter Rührkesselreaktor (CSTR, continuously stirred tank reactor).

Im industriellen Maßstab können der erste Fermenter und der zweite Fermenter ein Fermentationsvolumen von 20 bis 2000 m³, vorzugsweise 50 bis 500 m³, aufweisen. Unter Fermentationsvolumen versteht man den Volumenanteil des mit Fermentationsbrühe gefüllten Fermenters, der 65 bis 90 % des Gesamtvolumens des Fermenters betragen kann.

Das Gashalteverhältnis kann zwischen 5 und 30 Vol.-% liegen. Das Gas-Hold-up-Verhältnis soll sich auf den Anteil der Fermentationsbrühe (ohne Kopfraum zur Entgasung/Entschäumung) beziehen, der Gasblasen enthält. Sie kann für beide Fermenter im gleichen Bereich liegen. Im aeroben Fermenter können beispielsweise 30 % erreicht werden, wenn Luft als Oxidationsmittel anstelle von Sauerstoff verwendet wird.

Das Design des ersten und zweiten Fermenters kann aneinander angepasst werden, um eine optimale Umsetzung zu ermöglichen. Beispielsweise können die Fermenter eine ähnliche oder identische Größe und Geometrie, insbesondere ein ähnliches oder identisches Fermentationsvolumen, aufweisen. Alternativ kann der Füllgrad variiert werden, z. B. durch Anpassung des Arbeitsvolumens.

Eine Begasungsrate des ersten Fermenters und des zweiten Fermenters kann 0,05 bis 2,5 Gefäßvolumina pro Minute (vvm, vessel volumes per minute), vorzugsweise 0,2 bis 0,6 vvm betragen. Es wurde festgestellt, dass dadurch optimale Verarbeitungsbedingungen unter Kultivierungsbedingungen erzielt werden. Die Begasungsrate bezeichnet die Menge an gasförmigem Einsatzstoff, die pro Zeit in den ersten oder zweiten Fermenter eingebracht wird. Das Einbringen eines zusätzlichen Inertgases (z. B. Stickstoff) führt zu einer Erhöhung der Begasungsrate. Je niedriger die Begasungsrate, desto weniger Energie kann verbraucht werden und desto höher kann die Gasumwandlungsrate sein, insbesondere in einem Pfropfenströmungssystem wie einem Schlaufenreaktor (loop reactor). Andererseits erhöht eine höhere Begasungsrate die Durchmischung und den Stoffaustausch, sodass ein Gleichgewicht erforderlich ist. Der Begriff „vvm“ steht für „Behältervolumen pro Minute“, was bedeutet, dass beispielsweise bei einem Fermenter von 100 m³ Volumen vorzugsweise 20 bis 60 m³ Gas zugeführt werden, pro Minute. Die vvm werden in Betriebs-m³ berechnet, nicht in Standard-m³ (die bei 1,01325 bar und 273,15 K berechnet würden). Typische Betriebsbedingungen der Fermenter sind 20 bis 40 °C und ein Umgebungsdruck von bis zu einigen bar. Abhängig von der Position einer Gasblase oder eines Volumenelements im Fermenter kann ein unterschiedlicher hydrostatischer Druck auftreten, z. B. + 1 bar (Überdruck) bei 10 m Wassersäule und + 2 bar (Überdruck) bei 20 m Wassersäule. Dadurch werden die Gasblasen in den unteren Bereichen der Fermenter entsprechend komprimiert.

Eine Gasphasenkopplungsrate zwischen dem ersten Fermenter und dem zweiten Fermenter kann 0,05 bis 2,5 Gefäßvolumina pro Minute (vvm), vorzugsweise 0,1 bis 0,4 vvm, betragen. Dies bedeutet, dass ein Gasstrom zwischen den beiden Fermentern (wobei der Gasstrom die Summe der Ströme ist, die durch erste und zweite Verbindungselemente fließen) typischerweise 10 bis 40 % des Volumens des zweiten Fermenters (d. h. des Volumens des gesamten Fermenters und nicht nur des aktives Volumens) beträgt.

Der erste Fermenter und der zweite Fermenter können jeweils einen Schlaufenfermenter umfassen. Es wurde festgestellt, dass dies die besten Fermentationsergebnisse liefert (hohe Ausbeute, hohe Wachstumsrate). Beispielsweise können der erste und der zweite Fermenter Airlift-Reaktoren mit einem externen Kreislauf sein. Die Schlaufenfermenter können mit einer Pumpe (z. B. einer Axialpumpe oder einer Kreispumpe) betrieben werden. Der erste und zweite Fermenter können auch jeweils eine Blasensäule oder einen Rührkessel umfassen. Die Reaktorlänge jedes Schlaufenfermenters kann im industriellen Maßstab für jeden Zweig oder „Ast“ (d.h. in x-, y- und z-Richtung) zwischen 10 und 60 m liegen. Eine gefaltete Bauweise, wie sie bei Schlaufenreaktoren zur Polyolefinpolymerisation üblich ist, ist möglich. Der Innendurchmesser jedes Schlaufenfermenters kann im Bereich von 0,1 bis 2,5 m liegen. Der Einlass zum Einleiten des ersten oder zweiten gasförmigen Einsatzstoffs kann auf einer Seite des Schlaufenfermenters angeordnet sein, die einer Seite gegenüberliegt, auf der ein Auslass angeordnet ist, der den Austritt des ersten oder zweiten Endgases aus dem jeweiligen Fermenter ermöglicht. Daher können sich die Gasströme des eingeführten gasförmigen Ausgangsmaterials und des den Fermenter verlassenden Endgases nicht gegenseitig beeinträchtigen. Es wurde festgestellt, dass eine Gasströmungsrate von 0,05 bis 2,5 vvm, vorzugsweise von 0,2 bis 0,6 vvm in jedem Schlaufenfermenter optimale Verarbeitungsbedingungen liefert.

Der erste Fermenter und der zweite Fermenter können jeweils bei einer erhöhten Temperatur betrieben werden, beispielsweise bis zu 65 °C, vorzugsweise von 20 bis 55 °C, weiter bevorzugt von 30 bis 45 °C, besonders bevorzugt von 25 bis 40 °C. Es wurde festgestellt, dass die Verwendung einer Temperatur im angegebenen Bereich ein gutes Gleichgewicht zwischen Verarbeitungseffizienz (Zeit, Kosten) und Ausbeute ergibt. Thermophile Stämme sind wirtschaftlich vorteilhaft, da im anaeroben Fermenter heiße Einsatzgase (z. B. aus einem Vergasungsprozess) verwendet werden können und im aeroben Fermenter weniger Kühlung erforderlich ist. Den Kosteneinsparungen für die Kühlung steht eine geringere Gaslöslichkeit bei erhöhten Temperaturen gegenüber, sodass ein Gleichgewicht hergestellt werden muss, das von den Mikroorganismen abhängt und typischerweise zwischen 25 und 40 °C liegt. Der zweite Fermenter kann bei einer höheren Temperatur als der erste Fermenter betrieben werden, beispielsweise bei 10 bis 40 °C höher, oder bei 20 bis 30 °C höher, insbesondere wenn die Fermentationsbrühe des zweiten Fermenters thermophile Acetogene enthält. Das erste Endgas kann eine hohe spezifische Wärmekapazität aufweisen, so dass ein Teil der im zweiten Fermenter benötigten Wärmeenergie über dieses erste Endgas eingebracht werden kann, wodurch eine Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs erreicht wird. Die Temperaturkontrolle ist wichtig, um eine reibungslose Gärung zu ermöglichen. Die gewählte Temperatur bleibt vorzugsweise in einem Bereich von +/- 3 °C, besonders bevorzugt +/- 1 °C.

Weiterhin können der erste Fermenter und der zweite Fermenter jeweils bei einem Druck von 0,1 bis 10 bar (Überdruck), vorzugsweise 1 bis 5 bar (Überdruck), betrieben werden. Es wurde festgestellt, dass ein Druck in diesem Bereich zu einem guten Gleichgewicht zwischen Investitionskosten, Verarbeitungseffizienz (Zeit, Kosten) und Ertrag führt. Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass eine höhere Temperatur die Löslichkeit von Gas in Wasser verringert, während festgestellt wurde, dass der volumenbezogene Stoffübergangskoeffizient (k_{La} -Wert) mit zunehmender Energieaufnahme und zunehmendem Druck zunimmt.

Für eine optimierte Verarbeitung können sowohl der erste Fermenter als auch der zweite Fermenter bei einer Temperatur von 20 bis 65 °C und einem Druck von 0,1 bis 10 bar (Überdruck), also 1,1 bis 11 bar (atmosphärisch), betrieben werden.

Der kontinuierliche Betrieb ist dem Batch-Betrieb vorzuziehen, da dadurch eine höhere Raum-Zeit-Ausbeute erzielt werden kann. Es wurde festgestellt, dass eine kontinuierliche Fermentation über mehr als 30 Tage aufrechterhalten werden kann. Insbesondere kann die Fermentation 15 bis 60 Tage lang durchgeführt werden, gefolgt von einer Spülung, Reinigung und einem Neustart der Fermentation. Dies kann verhindern, dass sich zufällige Mutationen der Stämme manifestieren.

Der pH-Wert der im ersten Fermenter enthaltenen Fermentationsbrühe kann im Bereich von 3,0 bis 7,5, vorzugsweise 5,5 bis 6,5 liegen, während der pH-Wert der im zweiten Fermenter enthaltenen Fermentationsbrühe im Bereich von 3 bis 7,5 liegen kann. Der pH-Wert kann mit Säuren oder Basen eingestellt werden. Der pH-Wert kann mit Ammoniak (NH_3), seinen Ammoniumsalzen oder NaOH erhöht werden (das gelöste CO_2 senkt automatisch den pH-Wert). Eine pH-Senkung kann beispielsweise mit Salzsäure (HCl) erreicht werden. Besonders wichtig ist die Kontrolle des pH-Wertes beim Einbringen von Kohlendioxid in die Fermentationsbrühe (die Löslichkeit von $\text{CO}_{2(g)}$ in Wasser beträgt 1,45 g/l bei 25 °C und 1 bar).

Vorzugsweise wird die gekoppelte Gasfermentation im kontinuierlichen Modus bei einer Temperatur von 20 bis 65 °C, einer Begasungsrate von 0,05 bis 2,5 vvm, einem pH-Wert von 3,5 bis 7,5 und einem Druck von 0,1 bis 10 bar (Überdruck) durchgeführt. Dies entspricht 1,1 bis 11 bar (Atmosphärendruck) für jeden Fermenter.

Der Gasausnutzungsgrad kann sowohl für Methan in der aeroben Fermentation als auch für Kohlendioxid in der anaeroben Fermentation 80 bis 99,9 Vol.-%, vorzugsweise 95 bis 99 Vol.-% betragen. Die Angaben in Vol.-% beziehen sich auf den Anteil an gasförmigem Einsatzstoff, der in den jeweiligen Fermenter eingeleitet wird, bis hin zum Anteil an Endgas, der während der Fermentation nicht verbraucht wurde.

Die spezifische Energieaufnahme bei der gekoppelten Gasfermentation kann 0,1 bis 10 kW/m^3 , vorzugsweise 0,5 bis 5 kW/m^3 betragen. Im Allgemeinen kann in einem kontinuierlichen Rührkesselreaktor (CSTR) der Energieeintrag über einen Rührer erfolgen, während in einem

Blasensäulenreaktor der Energieeintrag aus einer Gasphase erfolgen kann. In einem Schlaufenreaktor kann der Energieeintrag in das System über eine externe Pumpe und eine Gasphase erfolgen. Um eine gute Durchmischung und damit einen hohen k_{La} -Wert zu erreichen, ist Energieeintrag erforderlich.

Im Allgemeinen ist der Massenstrom (mol/h) des Eduktgases, das von einer externen Gasquelle einem Fermenter zugeführt wird (bestehend aus Methan für den ersten Fermenter und Kohlendioxid für den zweiten Fermenter), höher als der Massenstrom (mol/h) von Endgas aus dem jeweils anderen Fermenter. Verhältnisse von 100:1 bis 3:1 wurden getestet und haben sich bewährt. Wenn ein großer Massenstrom an unverbrauchtem Methan den ersten Fermenter verlässt, im zweiten Fermenter von Kohlendioxid gereinigt wird und wieder in den ersten Fermenter eingespeist wird, kann dieser erste Fermenter mit einem Überschuss an Methan betrieben werden, was im Hinblick auf die Sicherheit (Betrieb außerhalb der oberen Explosionsgrenze) und Produktivität (da der Fermenter dann nicht durch die Methanzufuhr begrenzt ist) vorteilhaft sein kann. Ebenso kann der zweite, anaerobe Fermenter mit einem Überschuss an Wasserstoff und/oder einem Überschuss an Kohlendioxid betrieben werden, die aus dem ersten Fermenter zurückgespeist werden können.

Das erste Produkt kann Einzellerprotein (SCP) umfassen, das von Methanotrophen gebildet wird. Aufgrund des hohen Proteingehalts (Aminosäuren) kann ein solches SCP für Futtermittel- (Tiere) oder Lebensmittelanwendungen (Menschen) verwendet werden. Ein Beispiel einer chemischen Gleichung für die Produktion von Einzellerprotein mit 70 Gew.-% SCP ($\text{CH}_{1,8}\text{O}_{0,5}\text{N}_{0,2}$), bezogen auf die Trockenmasse, im ersten Fermenter mit einer Fermentationsbrühe, die *Methylococcus capsulatus* enthält, kann wie folgt angegeben werden:

$\text{CH}_4 + 1,52 \text{ O}_2 + 0,09 \text{ NH}_3 \rightarrow 0,456 \text{ CH}_{1,8} \text{O}_{0,5} \text{N}_{0,2} + 0,544 \text{ CO}_2 + 1,72 \text{ H}_2\text{O}$ (Molverhältnisse); In diesem Fall kann das erste gasförmige Ausgangsmaterial Methan und Sauerstoff umfassen, während Ammoniak direkt zur ersten Fermentationsbrühe hinzugefügt werden kann, um den notwendigen Stickstoff bereitzustellen. Beachten Sie, dass die Zusammensetzung der SCP-Biomasse variieren kann. $\text{CH}_{1,8}\text{O}_{0,5}\text{N}_{0,2}$ erwies sich als typische Zusammensetzung (ohne Berücksichtigung anderer Elemente wie Schwefel). Das Verhältnis von C:H:O:N beträgt 1:1,8:0,5:0,2, es wurden aber auch Zusammensetzungen von 1,0:1,5-2,1:0,4-0,6:0,15-0,25 gefunden.

Unter Berücksichtigung der Molmasse der Bestandteile kann die obige Formel auf Massenbasis neu berechnet werden:

$16 \text{ CH}_4 + 48,64 \text{ O}_2 + 1,62 \text{ NH}_3 \rightarrow 11,218 \text{ CH}_{1,8} \text{O}_{0,5} \text{N}_{0,2} + 23,94 \text{ CO}_2 + 30,96 \text{ H}_2\text{O}$ (Gewichtsverhältnisse); Das bedeutet, dass aus 16 g Methan und 48,64 g Sauerstoff 23,94 g Kohlendioxid entstehen. Mengenmäßig bedeutet dies, dass aus 22,35 l Methan und 43,01 l Sauerstoff 11,97 l Kohlendioxid entstehen.

Diese Formel kann auf das Zielprodukt (SCP) wie folgt umgeschrieben werden:

$1,43 \text{ CH}_4 + 4,34 \text{ O}_2 + 0,14 \text{ NH}_3 \rightarrow 1 \text{ CH}_{1,8} \text{ O}_{0,5} \text{ N}_{0,2} + 2,13 \text{ CO}_2 + 2,76 \text{ H}_2\text{O}$ (Gewichtsverhältnisse); Das bedeutet, dass zur Herstellung von 1 t SCP theoretisch (Optimalfall, also ohne Stoffwechselverluste) 1,43 t Methan benötigt werden und 2,13 t Kohlendioxid als Nebenprodukt entstehen. Da Methanotrophe jedoch während der aeroben Fermentation atmen, verringern sich diese theoretischen Zahlen in der Realität, sodass eine größere Menge Methan in Kohlendioxid umgewandelt wird. Dementsprechend kann eine schnellere Wachstumsrate im ersten Fermenter einer höheren SCP-Ausbeute entsprechen.

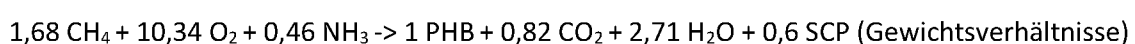
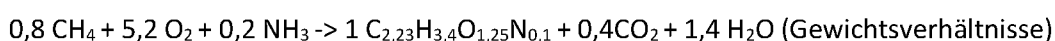
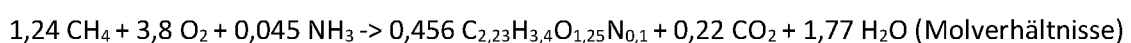
Es kann geschätzt werden, dass in der Realität zur Herstellung von 1 t SCP ein Einsatz von etwa 2 t Methan erforderlich ist (also etwa 40 % mehr als theoretisch erforderlich). Dieses Verhältnis kann durch Prozessoptimierung verbessert werden, z. B. durch den Einsatz eines Schlaufenfermenters mit Pfropfenströmungsprofil, bei dem das Methan am Ende jedes Zyklus vollständig verbraucht werden kann. Bei optimierten Verarbeitungsparametern kann eine Produktivität von 0,2 bis 20 g Biomasse (Trockenzellgewicht (dcw, dry cell weight)) pro Liter und Stunde erzielt werden, insbesondere 1 bis 10 g Biomasse pro Liter und Stunde, oder typischerweise 3 bis 7 g Biomasse pro Stunde Liter und pro Stunde.

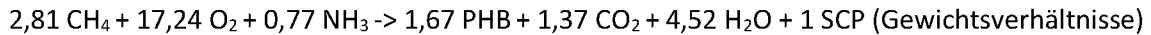
Bei der Verwendung von Methan aus Erdgas kann folgende Berechnung durchgeführt werden: Methan hat eine Dichte von etwa 660 g/m^3 . Demnach entspricht 1 t Methan 1.520 m^3 Methan, somit entsprechen 2 t Methan 3.040 m^3 Methan. Erdgas kann 85 bis 95 Gew.-% Methan enthalten, so dass zur Herstellung von 1 t SCP etwa 3.200 bis 3.600 m^3 Erdgas benötigt werden ($3.040/0,95 = 3.200 \text{ m}^3$; $3.040/0,85 = 3.600 \text{ m}^3$).

Um eine Explosionsgefahr zu vermeiden, kann die im ersten gasförmigen Einsatzstoff enthaltene Methanmenge verdoppelt werden:

$2 \text{ CH}_4 + 1,52 \text{ O}_2 + 0,09 \text{ NH}_3 \rightarrow 0,456 \text{ CH}_{1,8} \text{ O}_{0,5} \text{ N}_{0,2} + 0,707 \text{ CO}_2 + 1,72 \text{ H}_2\text{O} + 0,7 \text{ CH}_4$ (Molverhältnisse); Der erste gasförmige Einsatzstoff besteht somit aus 57 Vol.-% Methan und 43 Vol.-% Sauerstoff. Das erste Endgas besteht aus unverbrauchtem Methan, das dem zweiten Fermenter zugeführt und anschließend zur weiteren Teilnahme an der aeroben Reaktion zum ersten Fermenter zurückgeführt werden kann.

Das erste Produkt kann auch SCP und Polyhydroxybutyrat (PHB) umfassen. Beispielsweise kann eine chemische Gleichung für die Produktion von Biomasse (Zellen, auf Basis dcw) mit 50 Gew.-% PHB und 30 Gew.-% SCP ($\text{C}_{2,23}\text{H}_{3,4} \text{ O}_{1,25} \text{ N}_{0,1}$) im ersten Fermenter wie folgt aufgestellt werden:

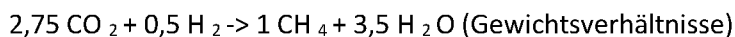
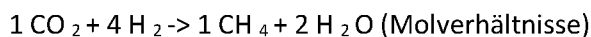




Das bedeutet, dass zur Herstellung von 1 t Trockenzellen theoretisch 0,8 t Methan benötigt werden und 0,4 t Kohlendioxid als Nebenprodukt entstehen. Auch hier wird in der Realität eine größere Menge Methan in Kohlendioxid umgewandelt, und die Ausbeute an SCP und PHB ist geringer. Man kann abschätzen, dass anstelle von 1,68 t Methan zur Herstellung von 1 t PHB und 0,6 t SCP etwa 2 bis 2,3 t Methan benötigt werden, was 3.030 bis 3.480 m³ Methan entspricht, bzw. bezogen auf einen Methangehalt von 85 to 95 Gew.-% in Erdgas, etwa 3.100 bis 4.100 m³ Erdgas.

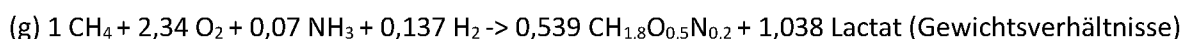
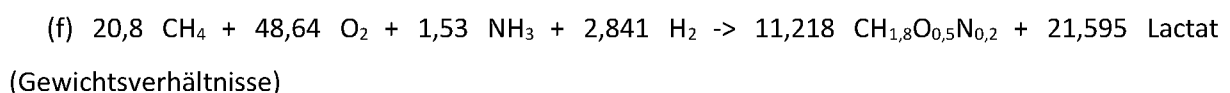
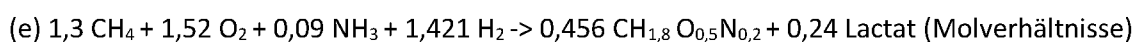
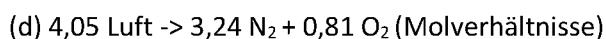
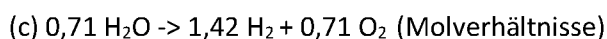
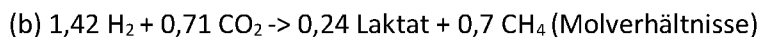
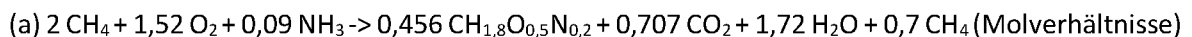
Die PHB Produktion wurde festgestellt, dass die typische Zusammensetzung der Biomasse (dcw) C_{2,23}H₃, O_{1,25}N_{0,1} beträgt, d. h. ein Verhältnis von C:H:O:N von 1:2,23:3,4:1,25:0,1. Die tatsächliche Zusammensetzung kann vom Stamm und der PHB-Ausbeute abhängen, und es wurden Zusammensetzungen von C:H:O:N von 2,18–2,18:3,3–3,5:1,2–1,3:0,05–0,15 gefunden. Bei anderen Zielprodukten wie Ectoin können die Berechnungen entsprechend erfolgen.

Bezüglich der Methanproduktion mit dem Sabatier-Verfahren kann 1 t Methan aus 2,75 t Kohlendioxid hergestellt werden, wie unten dargestellt:



Zusammenfassend lassen sich für eine gekoppelte Gasfermentation gemäß der vorliegenden Erfindung die folgenden chemischen Gleichungen aufstellen, wobei (a) die aerobe Fermentation, (b) die anaerobe Fermentation, (c) Elektrolyse in einem Elektrolyseur, (d) Luft-Aufspaltung in einer Gasvorbehandlungseinheit und (e)–(f) der Nettoprozess sind.

In diesem Beispiel enthält die erste Fermentationsbrühe *Methylococcus capsulatus*, um im ersten Fermenter Einzellerprotein zu produzieren, und die zweite Fermentationsbrühe enthält *Acetobacterium woodii* zur Produktion von Laktat. Es können jedoch auch andere Stämme und Mischkulturen verwendet werden. Laktat ist von Interesse, weil es in Polymilchsäure (PLA), ein beliebtes Biopolymer, umgewandelt werden kann.



Dementsprechend können aus 1 t Methan 0,539 t SCP und 1,038 t Laktat ohne Emissionen kohlenstoffbasierter Gase gewonnen werden.

Um beispielsweise das erste Produkt und das zweite Produkt zu erhalten, können die Fermentationsbrühen einer Konzentration und Trocknung unterzogen werden, wobei im Stand der Technik bekannte Einheitsoptionen (unit operations) zum Einsatz kommen, z. B. im Fall von SCP Zentrifugation und anschließende Sprühtrocknung. Um Energie zu sparen, können auch Flockung, Dekantierung und Trommeltrocknung oder Vakuumtrocknung eingesetzt werden. Im Falle einer intrazellulären Verbindung wie PHB können Zelllyse und Trennung/Reinigung durchgeführt werden, z. B. unter Verwendung von Lösungsmitteln, wie sie im Stand der Technik bekannt sind. Mit einer extrazellulären Verbindung kann die Weiterverarbeitung erleichtert werden.

Das im ersten Produkt enthaltene Einzelzellprotein kann dann für Lebensmittelanwendungen verwendet werden, während das im zweiten Produkt enthaltene Laktat zur Herstellung von Polymilchsäure (PLA) verwendet werden kann, die beispielsweise für die Herstellung von Polymerfolien, Fasern, Flaschen usw. verwendet werden kann, oder für biologisch abbaubare medizinische Geräte oder andere Artikel.

Alle Ausführungsformen dieser Erfindung, wie sie in der vorliegenden Anmeldung offenbart werden, hängen miteinander zusammen, und jede Ausführungsform und/oder jedes offenbarte charakteristische Merkmal kann miteinander und auch als beliebige Kombination von zwei oder mehr Ausführungsformen/charakteristischen Merkmalen kombiniert werden.

Kurze Beschreibung der Figuren

Jede der Fig. 1-6 zeigt eine schematische Visualisierung eines Systems zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation, wie hierin offenbart. Aus Gründen der Übersichtlichkeit besteht jedes System aus unterschiedlichen Komponenten (z.B. Elektrolyseur, Gasvorbehandlungseinheit, Vorratsgefäß, Entladungsgefäß), es ist jedoch leicht ersichtlich, dass jede der Komponenten in Kombination verwendet werden kann.

Fig. 7 zeigt eine schematische Visualisierung eines Systems zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation bestehend aus mehreren Komponenten und Gasquellen.

Fig. 8 und 9 zeigen Ternärdiagramme für eine aerobe Fermentation, während Fig. 10 und 11 Ternärdiagramme für eine anaerobe Fermentation zeigen.

Fig. 1a zeigt ein schematisches System 1a zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation, bestehend aus einem ersten Fermenter 2a, der im aeroben Modus betrieben wird, und einem zweiten Fermenter 2b, der im anaeroben Modus betrieben wird. Ein erstes gasförmiges Ausgangsmaterial, das Methan und Sauerstoff umfasst, wird in den ersten Fermenter 2a eingeführt, während ein zweites gasförmiges Ausgangsmaterial, das Wasserstoff und optional Kohlendioxid umfasst, in den zweiten Fermenter 2b eingeführt wird. Wie weiter aus Fig. 1 ersichtlich ist, wird mindestens ein Teil eines ersten Abgases, das Kohlendioxid umfasst, dem zweiten Fermenter 2b zugeführt, während mindestens ein Teil eines zweiten Abgases, das Methan umfasst, dem ersten Fermenter 2a zugeführt wird. Optional kann auch Methan im zweiten gasförmigen Einsatzstoff enthalten sein und in den zweiten Fermenter 2b eingeleitet werden. Da Methan im zweiten Fermenter 2b nicht verbraucht werden kann, wird es Teil des zweiten Endgases und wird dem ersten Fermenter 2a zugeführt. Optional kann auch Kohlendioxid im ersten gasförmigen Ausgangsmaterial enthalten sein und in den ersten Fermenter 2a eingeleitet werden. Da Kohlendioxid im ersten Fermenter 2a nicht verbraucht werden kann, wird es Teil des ersten Endgases und wird in den zweiten Fermenter 2b eingeleitet.

Alternativ wird, wie aus Fig. 1b ersichtlich, das System 1a nur mit einem ersten gasförmigen Einsatzmaterial betrieben, das Methan, Wasserstoff und Sauerstoff aus einer externen Quelle umfasst. Somit besteht das zweite gasförmige Ausgangsmaterial aus dem ersten Endgas; oder die zweiten gasförmigen Einsatzstoffe bestehen zumindest aus einem Teil des ersten Endgases, wenn das erste Endgas einer ersten Gasverarbeitungseinheit (nicht gezeigt) unterzogen wird, z.B. um jeglichen Sauerstoff zu entfernen, der im ersten Fermenter nicht verbraucht wurde.

Fig. 2 zeigt ein weiteres schematisches System 1b zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation. Zusätzlich zum System 1a (Fig. 1a-b) umfasst das System 1b eine erste Gasverarbeitungseinheit 3a, die dazu konfiguriert ist, eine Zusammensetzung eines ersten Endgases zu ändern, bevor mindestens ein Teil des ersten Endgases, das Kohlendioxid umfasst, in das System des zweiten Fermenters 2b eingespeist wird. Das System 1b umfasst weiterhin eine zweite Gasverarbeitungseinheit 3b, die dazu konfiguriert ist, die Zusammensetzung eines zweiten Endgases zu ändern, bevor zumindest ein Teil des zweiten Endgases, das Methan umfasst, in den ersten Fermenter 2a eingespeist wird.

Eine weitere schematische Anlage 1c zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation ist in Fig. 3 dargestellt. Zusätzlich zur Anlage 1a (Fig. 1a-b) umfasst die Anlage 1c eine Gasvorbehandlungseinheit 4. Zumindest ein Teil davon ist extern eingebrachtes Gas wird durch die Gasvorbehandlungseinheit 4 geleitet, um ein erstes gasförmiges Ausgangsmaterial zu erzeugen, das

Methan und Sauerstoff umfasst und in den ersten Fermenter 2a eingeführt wird, sowie ein zweites gasförmiges Ausgangsmaterial, das Wasserstoff und optional Kohlendioxid umfasst und in den zweiten Fermenter 2b eingeführt wird. Die gestrichelten Pfeile bedeuten, dass neben der Vorbehandlung des Gases auch direkt Gas in den ersten Fermenter 2a oder den zweiten Fermenter 2b eingeleitet werden kann, um einen Teil des ersten/zweiten gasförmigen Einsatzmaterials zu bilden.

In Fig. 4 ist ein weiteres schematisches System 1d zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation visualisiert. Im Gegensatz zum System 1c aus Fig. 3 umfasst das System 1d eine erste Gasvorbehandlungseinheit 4a zur Herstellung eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials, das Methan und Sauerstoff umfasst und eine zweite Gasvorbehandlungseinheit 4b zur Herstellung eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials mit Herstellung von Wasserstoff und gegebenenfalls Kohlendioxid. Außerdem kann Gas aus der ersten Gasvorbehandlungseinheit 4a in den zweiten Fermenter 2b eingeleitet werden, und/oder Gas aus der zweiten Gasvorbehandlungseinheit 4b kann in den ersten Fermenter 2a eingeleitet werden, wie durch die gestrichelten Pfeile angedeutet.

Fig. 5 zeigt eine weitere schematische Anlage 1e zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation. Zusätzlich zum System 1a (Fig. 1a-b) umfasst das System 1e einen Elektrolyseur 5, der zur Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff konfiguriert ist. Zumindest ein Teil des Sauerstoffs wird in den ersten Fermenter 2a und zumindest ein Teil des Wasserstoffs wird in den zweiten Fermenter 2b eingespeist. Das der Elektrolyse unterzogene Wasser wird von außen zugeführt. Ergänzend oder alternativ kann im ersten Fermenter 2a als Nebenprodukt entstehendes Wasser einer Elektrolyse unterzogen werden, wie mit dem gestrichelten Pfeil angedeutet.

Ein weiteres schematisches System 1f ähnlich dem System 1a (Fig. 1a-b) ist in Fig. 6 dargestellt. Das System 1f umfasst zwei Entladungsgefäße (Austragsbehälter) 6a, 6b und zwei Vorratsgefäße 7a, 7b. Jedes dieser Gefäße ist mit dem ersten Fermenter 2a oder dem zweiten Fermenter 2b verbindbar. Demnach kann der erste Fermenter 2a oder der zweite Fermenter 2b jeweils durch Anschluss an einen der Austragsbehälter 6a, 6b entleert werden. Darüber hinaus kann der erste Fermenter 2a oder der zweite Fermenter 2b jeweils durch Anschluss an einen der Vorratsbehälter 7a, 7b wiederbefüllt werden. Einer der Vorratsbehälter 7a, 7b kann eine anaerobe Fermentationsbrühe enthalten, während der andere eine aerobe Fermentationsbrühe enthalten kann. Durch das Nachfüllen kann entweder der aerobe/anaerobe Charakter des jeweiligen Fermenters aufrechterhalten oder umgedreht werden, was zur Vermeidung von Kontaminationen von Vorteil sein kann.

Fig. 7 zeigt ein komplexeres, schematisches System 1g zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation. Dieses System 1g umfasst einen ersten Fermenter 2a und einen zweiten Fermenter 2b. Gas aus einer externen Gasquelle, beispielsweise Erdgas oder Biogas, oder SNG aus Biomasse oder Kohle, wird in einer ersten Gasvorbehandlungseinheit 4a vorbehandelt, um Methan von anderen Kohlenwasserstoffen zu trennen. Anschließend wird Methan als Teil eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials in den ersten Fermenter 2a eingeleitet, während die anderen Kohlenwasserstoffe verbrannt werden können, um Energie für den Betrieb der Fermenter zu erzeugen. Wie aus Fig. 7 weiter ersichtlich ist, wird Luft in einer ersten Gasvorbehandlungseinheit 4a vorbehandelt, um Sauerstoff zur Verwendung im ersten gasförmigen Einsatzmaterial abzutrennen; optional kann für den ersten gasförmigen Einsatzstoff auch Stickstoff verwendet werden.

Wasser aus einer Wasserquelle und/oder aus dem ersten Fermenter 2a (wo bei der aeroben Fermentation Wasser als Nebenprodukt entsteht) wird in einen Elektrolyseur 5 eingeleitet, um das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Zumindest ein Teil des Sauerstoffs wird dann als Teil des ersten gasförmigen Einsatzmaterials in den ersten Fermenter 2a eingeleitet. Zumindest ein Teil des Wasserstoffs wird als Teil eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials in den zweiten Fermenter 2b und in eine erste Gasverarbeitungseinheit 3a eingeleitet. In die erste Gasverarbeitungseinheit 3a wird auch Kohlendioxid eingeleitet, das aus dem ersten Fermenter 2a (wo Kohlendioxid in einem ersten Endgas enthalten ist) und/oder aus einer externen Kohlendioxidquelle stammt, nachdem es einer Vorbehandlung in einer zweiten Gasvorbehandlungseinheit 4b unterzogen wurde. Vorbehandeltes Kohlendioxid, das aus einer externen Kohlendioxidquelle gewonnen wird, kann ebenfalls in den zweiten Fermenter 2b eingeleitet werden, um einen Teil des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials zu bilden.

In der ersten Gasverarbeitungseinheit 3a, wie in Fig. 7 dargestellt, reagieren Wasserstoff und Kohlendioxid über den Sabatier-Prozess oder einen verwandten Prozess zu Methan. Das gebildete Methan wird dann zusammen mit Methan aus dem zweiten Fermenter 2b (wo Methan in einem zweiten Endgas enthalten ist) in den ersten Fermenter 2a eingespeist, wobei das Methan als Teil des ersten gasförmigen Ausgangsmaterials verwendet wird.

Bei der aeroben Fermentation im ersten Fermenter 2a entsteht ein erstes Produkt, das beispielsweise Einzellerprotein (Single Cell Protein, SCP) und/oder Polyhydroxybutyrat (PHB) und/oder andere interessierende Produkte umfassen kann. Bei der anaeroben Fermentation im zweiten Fermenter 2b entsteht ein zweites Produkt, das beispielsweise Lactat und/oder Acetat und/oder andere interessierende Produkte umfassen kann.

Fig. 8 zeigt ein Ternärdiagramm für eine aerobe Fermentation. Reaktion A verläuft von Punkt a zu Punkt a', wobei ein erstes gasförmiges Ausgangsmaterial verwendet wird, das 40 Vol.-% Methan und

60 Vol.-% Sauerstoff umfasst, und (theoretisch) 100 Vol.-% Kohlendioxid ergibt, d. h. eine vollständige Umwandlung (alle Mengen in Vol.-% sind gleich den jeweiligen Mol% in erster Näherung). Reaktion B beginnt am Punkt b unter Verwendung eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials, das 46 Vol.-% Methan und 54 Vol.-% Sauerstoff umfasst, und schreitet zum Punkt b' fort, der mit Punkt a' identisch ist, d. h. es wird (theoretisch) eine vollständige Umwandlung in Kohlendioxid erreicht. Punkt b'' bezeichnet einen Zwischenzeitpunkt bzw. einen Endpunkt der Reaktion B im Falle einer unvollständigen Umsetzung. Reaktion C beginnt am Punkt c unter Verwendung eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials, das 57 Vol.-% Methan und 43 Vol.-% Sauerstoff umfasst, und geht bis zum Punkt c' (50 Vol.-% CO₂, 50 Vol.-% CH₄).

Wie aus Fig. 8 ersichtlich ist, gibt ein mit X markierter Bereich im Ternärdiagramm (grau schattiert) die Explosionsgrenze von Methan in Sauerstoff an, nämlich 5–60 Vol.-% Methan in reinem Sauerstoff (das entspricht 5–15 Vol.-% Methan in 20 Vol.-% Sauerstoff, z. B. in Luft). Dementsprechend ist die Reaktion C aus sicherheitstechnischer Sicht vorteilhaft, da sie bei ihrem Verlauf die Explosionsgrenze verlässt. Beachten Sie, dass dieses Diagramm für den atmosphärischen Druck gilt. Beispielsweise liegen bei Umgebungsdruck und -temperatur die unteren und oberen Explosionsgrenzen (UEG und OEG) für Methan in der Luft bei 5 bis 15 %, während bei 300 bar UEG und OEG jeweils 3 bis 60 % betragen. Außerdem beginnen UEG und OEG mit steigender Temperatur, in magerere und fetttere Gemischbereiche überzugehen. Die Reaktionen A, B und C sind drei typische Beispiele, und die Startpunkte a, b und c sind ebenfalls drei typische Beispiele.

Fig. 9 zeigt das Ternärdiagramm von Fig. 8 bezüglich einer aeroben Fermentation, enthält jedoch zusätzlich einen mit Y markierten Bereich, der die Zusammensetzungen des ersten Endgases abdeckt, das 0–20 Vol.-% Sauerstoff, 0–60 Vol.-% Methan und 40–100 Vol.-% Kohlendioxid umfasst (alle Angaben in Vol.-% entsprechen in erster Näherung den Angaben in Mol-%). Da Sauerstoff die anaerobe Fermentation im zweiten Fermenter behindert, sollte versucht werden, den Restsauerstoffgehalt im ersten Endgas zu minimieren. Das Erreichen eines Endreaktionspunkts in einem mit Y'' markierten Bereich wird bevorzugt, wobei dieser Bereich Zusammensetzungen des ersten Endgases abdeckt, die 0–20 Vol.-% Sauerstoff, 0–60 Vol.-% Methan und 40–100 Vol.-% Kohlendioxid umfassen. Der Bereich Y' ist ein Teil von Y, das ein bevorzugtes „Landefeld“ ist und 0–20 Vol.-% O₂, 0–60 Vol.-% CH₄ und 40–100 Vol.-% CO₂ enthält. Die Fläche Y'' ist ein Teil von Y und auch ein Teil von Y'. Sie reicht von 0–5 Vol.-% O₂, 10–60 Vol.-% CH₄ und 40–90 Vol.-% CO₂.

Fig. 10 zeigt ein Ternärdiagramm für eine anaerobe Fermentation bei Verwendung eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials bestehend aus Wasserstoff, Methan und Kohlendioxid. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Zusammensetzung zur Vereinfachung gewählt wurde und um die anaerobe

Fermentation in einem ternären Diagramm visualisieren zu können. Enthält der zweite Einsatzstoff weitere Gase, z. B. Kohlenmonoxid, müssen die jeweiligen Mengenverhältnisse entsprechend angepasst werden, wie es für den Fachmann ohne weiteres ersichtlich ist.

Punkt A in Fig. 10 bezeichnet eine Zusammensetzung des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials mit einem Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlendioxid von 2:1 Vol.-%/Vol.-%, was im Fall der Milchsäureproduktion geeignet ist.

Punkt c' bezeichnet eine Zusammensetzung bestehend aus 50 Vol.-% Methan und 50 Vol.-% Kohlendioxid (alle Mengenangaben in Vol.-% entsprechen in erster Näherung den Mengenangaben in Mol-%), was eine typische Zusammensetzung eines Biogases als externe Gasquelle bzw. des ersten Endgases darstellt. Punkt b' ist reines Kohlendioxid, während Punkt D reinen Wasserstoff bedeutet. Beim Mischen der Zusammensetzung von Punkt c' mit der von Punkt D erhält man eine Zusammensetzung gemäß Punkt B, die 50 Vol.-% Wasserstoff, 25 Vol.-% Methan und 25 Vol.-% Sauerstoff umfasst und als zweiter gasförmiger Einsatzstoff verwendet werden kann. Bei der anaeroben Fermentation wird Punkt E erreicht, d. h. es verbleibt ein zweites Endgas bestehend aus Methan (wenn kein Stickstoff im System vorhanden ist und eine vollständige Umwandlung erreicht ist). Der Pfad dieser Reaktion ist B → E.

Wenn die anaerobe Fermentation mit einem Überschuss an Wasserstoff durchgeführt wird, liegt der Endpunkt auf der Linie DE in den mit X und Y markierten Bereichen des Diagramms von Fig. 10. Beispielsweise befindet sich ab Punkt H kein Methan mehr im System, und am Ende bleibt nur Wasserstoff übrig, daher ist der Endpunkt D. Wenn jedoch Wasserstoff mit einer Zusammensetzung gemäß Punkt c' gemischt wird, entspricht die Ausgangsmischung des zweiten Fermenters dem Punkt C, und der Pfad der Reaktion ist C → F.

In Bezug auf den mit X gekennzeichneten Bereich, er umfasst Zusammensetzungen des zweiten Endgases mit weniger als 10% CO₂, bis zu 50% (vol) H₂ und 50-100% CH₄ (vol%). Der mit Y gekennzeichnete Bereich umfasst Zusammensetzungen mit 0–20 -Vol.-% Wasserstoff und 0–10 -Vol.-% Kohlendioxid, der Rest ist Methan. Dementsprechend kann Kohlendioxid (nahezu) vollständig verbraucht werden, sodass ein Endpunkt im mit Y gekennzeichneten Bereich bevorzugt wird. Beispielsweise kann ein zweites gasförmiges Ausgangsmaterial mit einer Zusammensetzung gemäß Punkt H verwendet werden (76 Vol.-% Wasserstoff und 23 Vol.-% Kohlendioxid), und die Reaktion kann bis zum Erreichen von Punkt F fortgesetzt werden, d. h. ein zweites Endgas mit 33 Vol.-% Wasserstoff und 67 Vol.-% Methan.

Übrig gebliebener Wasserstoff und Kohlendioxid können zusammen mit nicht verbrauchtem Methan (als zweites Endgas) in den ersten Fermenter eingeleitet werden. Im ersten Fermenter kann das Methan verbraucht und Kohlendioxid erzeugt werden. Das erste Endgas, bestehend aus Wasserstoff, Kohlendioxid und optional unverbrauchtem Methan, kann dann in den zweiten

Fermenter eingespeist werden. Im Sinne der vorliegenden Erfindung wird der nicht verbrauchte Gasanteil dem anderen Fermenter zur Nutzung zugeführt, so dass die gesamten Kohlendioxid- und Methanemissionen des Prozesses minimiert und im Idealfall vollständig vermieden werden können.

Fig. 11 zeigt das Ternärdiagramm von Fig. 10 bezüglich einer anaeroben Fermentation, enthält aber zusätzlich einen mit Z markierten Bereich (schattiert), der die Zusammensetzungen des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials abdeckt, wie es dem Fermenter zugeführt wird (möglicherweise nach dem Mischen des „Rücklauf“-Stroms vom ersten Fermenter mit zusätzlichem Ausgangsmaterial, z. B. Synthesegas) mit 0–50 -Vol.-% Methan, 10–70 Vol.-% Kohlendioxid und 30–90 Vol.-% Wasserstoff, wobei die Zusammensetzung Wasserstoff und mindestens einen Teil des ersten Endgases umfassen kann. Eine typische Zusammensetzung des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials ist in Punkt B dargestellt und besteht aus 25 Vol.-% Methan, 25 Vol.-% Kohlendioxid und 50 Vol.-% Wasserstoff.

Beispiele

Die folgenden Beispiele sollen die in dieser Anmeldung beschriebene Erfindung weiter veranschaulichen, ohne den Umfang der Erfindung einzuschränken.

Beispiel 1 – Wachstumsratenkonstanten in Abhängigkeit von der Fermentationszeit und der Zusammensetzung des gasförmigen Ausgangsmaterials

Eine gekoppelte Gasfermentation wurde mit *Methylocystis sp.* durchgeführt. GB25 als methantropher Produzent von PHB und *Acetobacterium woodii* als acetogener Stamm zur Herstellung von Acetat. Das Fermentationsvolumen in jedem Fermenter betrug 30 l (das Verfahren ist jedoch auch im industriellen Maßstab durchführbar). Die Zusammensetzung der Fermentationsbrühen war wie folgt (in mg/l): KH_2PO_4 – 3400; K_2HPO_4 – 4350; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 712; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 7,85; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 8,12; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 49,8; ZnSO_4 – 4,4; $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,36; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 50,47; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 2,52; H_3BO_3 – 12,8. Der Gehalt der Mikroorganismen in jeder Fermentationsbrühe betrug 20 g/l Fermentationsbrühe.

Es wurden verschiedene Zusammensetzungen des ersten und zweiten gasförmigen Einsatzmaterials verwendet. Die Fermentation wurde 100 Stunden lang durchgeführt. Während der Fermentation wurde der erste Fermenter bei einer Temperatur von 30 °C und einem Druck von 2 bar (Atmosphäre) betrieben, während der zweite Fermenter bei einer Temperatur von 35 °C und einem Druck von 1,5 bar (Atmosphäre) betrieben wurde. Der pH-Wert der Fermentationsbrühe im ersten Fermenter wurde mit Ammoniak auf 6,5 eingestellt, während der pH-Wert der Fermentationsbrühe im zweiten Fermenter bei 6,3 lag. Die Begasungsraten wurden zwischen 0,2 und 0,6 vvm variiert.

Die Wachstumsgeschwindigkeitskonstanten der Zellen, aus denen das Endprodukt besteht, in Abhängigkeit von der Fermentationszeit und der Zusammensetzung des ersten und zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials sind in den Tabellen 1 bzw. 2 aufgeführt. Im Allgemeinen ahmt eine Bakterienkultur während der Wachstumsphase eine chemische Reaktion erster Ordnung nach, d.h. die Wachstumsrate der Zellen ist proportional zur Anzahl der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Bakterien. Die Proportionalitätskonstante μ ist ein Index der Wachstumsrate und wird Wachstumsratenkonstante genannt. Der Wert von μ kann aus den folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$\ln N_t - \ln N_0 = \mu (t - t_0)$$

$$\mu = [(\log_{10} N - \log_{10} N_0) * 2,303] / (t - t_0)$$

Durch Messung der Zunahme der Zellzahl während eines bestimmten Zeitraums kann die Wachstumsratenkonstante berechnet werden. Darüber hinaus wurde die maximale Wachstumsratenkonstante $\mu_{\max}$ für jede Zusammensetzung des ersten und zweiten gasförmigen Einsatzmaterials anhand der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\mu_{\max} = [\ln (\mu_{(t=75h)}) - \ln (\mu_{(t=5h)})] / (75-5)$$

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist, wird die Wachstumsrate während der aeroben Fermentation durch die Anwesenheit von 10–50 Vol.-% Kohlendioxid kaum beeinflusst. Bezüglich der anaeroben Fermentation ist aus Tabelle 2 ersichtlich, dass die Anwesenheit von 10 bzw. 25 Vol.-% Methan keine signifikante Reduzierung der Wachstumsrate bewirkt, während ein höherer Methangehalt von 45 bzw. 55 Vol.-% zu einer verringerten Wachstumsrate führt.

Tabelle 1: Wachstumsratenkonstanten während der aeroben Fermentation in Abhängigkeit von der Fermentationszeit und der Zusammensetzung des ersten gasförmigen Einsatzmaterials

Fermentationszeit (h)	Zusammensetzung des ersten gasförmigen Einsatzstoffs			
	100 Vol.-% CH ₄	90 Vol.-% CH ₄ + 10 Vol% CO ₂	75 Vol.-% CH ₄ + 25 Vol% CO ₂	50 Vol.-% CH ₄ + 50 Vol% CO ₂
0	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,080	0,096	0,096	0,050
20	0,640	0,720	0,560	0,480
30	1,120	1,280	1,200	0,960
50	1,440	1,360	1,440	1,120
75	1,760	1,840	1,840	1,600
100	1,920	2,000	1,840	1,840
$\mu_{\max}$	0,601	0,643	0,643	0,513

Tabelle 2: Wachstumsratenkonstanten während der anaeroben Fermentation in Abhängigkeit von der Fermentationszeit und der Zusammensetzung des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials

Fermentationszeit (h)	Zusammensetzung des zweiten gasförmigen Einsatzstoffs			
	33,3 Vol.-% CO ₂ + 66 Vol.-% H ₂	30 Vol.-% CO ₂ + 60 Vol.-% H ₂ + 10 Vol.-% CH ₄	25 Vol.-% CO ₂ + 50 Vol.-% H ₂ + 25 Vol.-% CH ₄	15 Vol.-% CO ₂ + 30 Vol.-% H ₂ + 55 Vol.-% CH ₄

0	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,040	0,050	0,070	0,040
20	0,450	0,400	0,400	0,250
30	0,650	0,730	0,800	0,450
50	0,950	0,800	0,850	0,750
75	1,150	1,150	1,100	0,990
100	1,280	1,200	1,150	1,000
$\mu_{\max}$	0,186	0,183	0,133	0,036

Beispiel 2 – Maximale Wachstumsratenkonstanten in Abhängigkeit vom pH-Wert

Die maximalen Wachstumsratenkonstanten wurden in Abhängigkeit vom pH-Wert der ersten Fermentationsbrühe, die *Methylocystis sp. GB25* enthielt, bestimmt. Der pH-Wert wurde durch Zugabe von Ammoniak zwischen 7,0 und 5,5 variiert. Es wurden die Zusammensetzung der Fermentationsbrühe und die Verarbeitungsparameter gemäß Beispiel 1 verwendet. Der eingestellte pH-Wert wurde während des gesamten Versuchs 100 Stunden lang beibehalten. Die erste gasförmige Einspeisung enthielt Methan und Luft im Verhältnis 1:5 (Vol.-%/Vol.-%), was ca. $\text{CH}_4:\text{O}_2=1:1$ entspricht.

Es wurden die maximalen Wachstumsratenkonstanten gemäß Tabelle 3 erhalten, die einen Anstieg der maximalen Wachstumsratenkonstanten mit steigendem pH-Wert zeigen.

Tabelle 3: Wachstumsratenkonstanten während der aeroben Fermentation in Abhängigkeit vom pH-Wert

pH Wert	7,0	6,5	6,0	5,5
$\mu_{\max}$	0,643	0,640	0,630	0,600

Beispiel 3 – Maximale Wachstumsratenkonstanten in Abhängigkeit von der Temperatur

Die maximalen Wachstumsratenkonstanten wurden in Abhängigkeit von der Fermentationstemperatur im zweiten Fermenter bestimmt, wobei die Fermentationsbrühe *Acetobacterium woodii* enthielt. Die Temperatur wurde zwischen 25 und 40 °C variiert. Es wurden die Zusammensetzung der Fermentationsbrühe und die Verarbeitungsparameter gemäß Beispiel 1 verwendet. Der eingestellte Temperaturwert wurde während des gesamten Experiments 100 Stunden lang beibehalten. Das zweite gasförmige Ausgangsmaterial bestand aus 20 Vol.-% CH_4 , 40 Vol.-% CO_2 und 40 Vol.-% H_2 .

Es wurden die maximalen Wachstumsratenkonstanten gemäß Tabelle 4 erhalten, die einen Anstieg der maximalen Wachstumsratenkonstanten mit steigender Temperatur zeigen. Zwischen 0 und 30 % CH_4 wurde kein markanter Unterschied im $\mu_{\max}$ festgestellt.

Tabelle 4: Wachstumsratenkonstanten während der anaeroben Fermentation in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperatur (°C)	25	30	35	40
$\mu_{\max}$	0,160	0,170	0,186	0,175

Beispiel 4 – Einfluss der Rohstoffquelle

Es wurden gasförmige Ausgangsstoffe aus unterschiedlichen Quellen und damit unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt, um den Einfluss der Ausgangsstoffzusammensetzung auf die Ausbeute an Einzellerprotein (SCP), das im ersten Fermenter produziert wurde, und Milchsäure, die im zweiten Fermenter produziert wurde, und die Effizienz der Fermenter zu bewerten, in der gekoppelten Gasfermentation. Zur Vergleichbarkeit der in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse wurden die gekoppelten Gasfermentationen mit unterschiedlichen Rohstoffquellen alle auf der Grundlage verglichen, dass 1 Tonne Methan in den ersten Fermenter eingeführt und eine entsprechende Menge Wasserstoff hinzugefügt wurde, um den gesamten Kohlenstoff (auch als Kohlendioxid im zweiten Fermenter) zu verbrauchen. In allen Fällen wurde die gekoppelte Gasfermentation CO₂-neutral durchgeführt. Wenn beispielsweise Biogas als externe Gasquelle verwendet wird, ist eine vergleichsweise große Menge Wasserstoff erforderlich, um das Kohlendioxid sowohl aus dem ersten Endgas als auch aus dem Biogas zu verbrauchen.

Methan kann aus Erdgas, Biogas oder aus einem Methanisierungsprozess, z. B. aus Kohle oder Biomasse, gewonnen werden. Als Beispiel für ein organisches Non-Food-Abfallmaterial wurde Oliventrester verwendet. SNG (synthetisches Erdgas) ist durch Synthesegas mit einem Technologiereifegrad (TRL) von 9 oder durch direkte Methanisierung von Kohle/Biomasse zugänglich, die einen niedrigeren TRL aufweisen. Im Allgemeinen basieren TRLs auf einer Skala von 1 bis 9, wobei 9 die ausgereifteste Technologie darstellt. Die Vergasung und Methanisierung von Oliventrester wurde im Labor demonstriert, aber noch nicht kommerzialisiert. Im Gegensatz zu SNG aus Kohle wurde auch die SNG-Produktion aus Biomasse in großem Maßstab noch nicht kommerzialisiert.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann ein TRL von bis zu 9 erreicht werden, was bedeutet, dass sich das Verfahren im Betriebsumfeld gut bewährt hat und eine sehr große Flexibilität bei den Rohstoffen besteht, wodurch der Prozess sowohl bei erneuerbaren als auch bei fossilen Rohstoffen CO₂-neutral durchgeführt werden kann.

Bei einem gegebenen Energiegehalt eines Rohstoffs (abhängig von seiner chemischen Zusammensetzung) ist die tatsächlich erzielte Ausbeute geringer als die theoretisch erreichbare Ausbeute, da ein Teil der Energie durch den Stoffwechsel (z. B. Atmung der Mikroorganismen in der Fermentationsbrühe) verbraucht wird. Demnach ist der Wirkungsgrad der tatsächlich erzielte Ertrag in % bezogen auf den theoretischen Ertrag. Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, weist das erfindungsgemäße Verfahren bei Verwendung von Kohle oder Biogas als gasförmigem Einsatzstoff einen Wirkungsgrad von bis zu 52,3 % auf.

Tabelle 5 zeigt zwei Spalten für Kohlendioxid. Die erste Spalte gibt die Menge an Kohlendioxid an, die von einer externen Gasquelle, z. B. Biogas, zugeführt wird. Die zweite Spalte gibt die Menge an Kohlendioxid an, die bei der Gärung (Fermentation) entsteht und von außen kommt. Wie man sieht, entstehen bei allen Rohstoffquellen unterschiedliche Mengen an Zielprodukten, es ergibt sich jedoch kein Kohlendioxidausstoß, da die beiden Fermentationsprozesse so aufeinander abgestimmt sind, dass das gesamte Kohlendioxid verbraucht werden kann. Da das erfindungsgemäße Verfahren auch auf null Methan-Ausstoß abzielt, werden durch die Einspeisung von unverbrauchtem Methan aus dem ersten Fermenter in den zweiten Fermenter und dann wieder zurück in den ersten Fermenter Null-Kohlendioxid-Äquivalente angestrebt und können mit diesem Verfahren realisiert werden. Dies ist eine wichtige Errungenschaft bei der Herstellung von Massengütern wie SCP, PHB und LA und/oder Spezialprodukten wie Ectoine. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden kann der ökologische Fußabdruck in Bezug auf Energieverbrauch, Landnutzung und Wasserverbrauch bei der (gekoppelten) Gasfermentation stark reduziert werden, was die vorliegende Erfindung zu einem wichtigen Baustein einer zirkulären, CO₂-reduzierten Wirtschaft macht.

Tabelle 5: Ausbeute, Effizienz und Technologiereifegrad (TRL) in Abhängigkeit von der Quelle des gasförmigen Einsatzmaterials

		Gasförmiger Rohstoff				SCP- Ausbeute (t)	Milchsäureertrag (t)	Effizienz (%)
Quelle	Menge	CH ₄ (t)	CO ₂ (t)		H ₂ (t)			
			Von externer Quelle	Im zweiten Fermenter umgebaut				
Erdgas	1400 m³	1	-	1,5	0,135	0,54	0,795	34,7
Biogas	2800 m³	1	1,5	2,5	0,225	0,54	1,325	42,4
CO ₂ aus einer Punktquelle	2,75 t	1	2,75	2,75	0,135	0,54	0,795	24,5
Kohle	3,21 t	1		7,0	0,63	0,54	3,71	52,3
Oliventrester	14,9 t	1		7,7	0,684	0,54	4,028	23,6

Ansprüche

1. System zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation bestehend aus einem ersten Fermenter, der für den Betrieb in einem aeroben Modus konfiguriert ist, und einem zweiten Fermenter, der für den Betrieb in einem anaeroben Modus konfiguriert ist,

wobei der erste Fermenter einen ersten Einlass zum Einführen eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials umfasst und der zweite Fermenter einen zweiten Einlass zum Einführen eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials umfasst, und

wobei der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein erstes Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das erste Verbindungselement so konfiguriert ist, dass es zumindest einen Teil eines ersten Endgases aus dem ersten Fermenter in den zweiten Fermenter zur Verwendung als zumindest ein Teil des zweiten gasförmigen Einsatzmaterials einspeist,

dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter und der zweite Fermenter durch ein zweites Verbindungselement miteinander gekoppelt sind, wobei das zweite Verbindungselement dazu konfiguriert ist, zumindest einen Teil eines zweiten Endgases aus dem zweiten Fermenter in den ersten Fermenter zur Verwendung als mindestens ein Teil des ersten gasförmigen Einsatzmaterials einzuspeisen.

2. System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das System weiterhin ein erstes Zuführelement, das mit dem ersten Einlass verbunden ist, und ein zweites Zuführelement, das mit dem zweiten Einlass verbunden ist, umfasst, wobei das erste Verbindungselement mit dem zweiten Zuführelement gekoppelt ist, und das zweite Anschlusselement mit dem ersten Zuführelement gekoppelt ist.

3. System nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das System ferner eine Gasverarbeitungseinheit umfasst, die dazu konfiguriert ist, die Zusammensetzung des ersten Endgases vor der Einspeisung mindestens eines Teils des ersten Endgases in den zweiten Fermenter zu, oder die Zusammensetzung des zweiten Endgases zu verändern, bevor mindestens ein Teil des zweiten Endgases in den ersten Fermenter eingespeist wird.

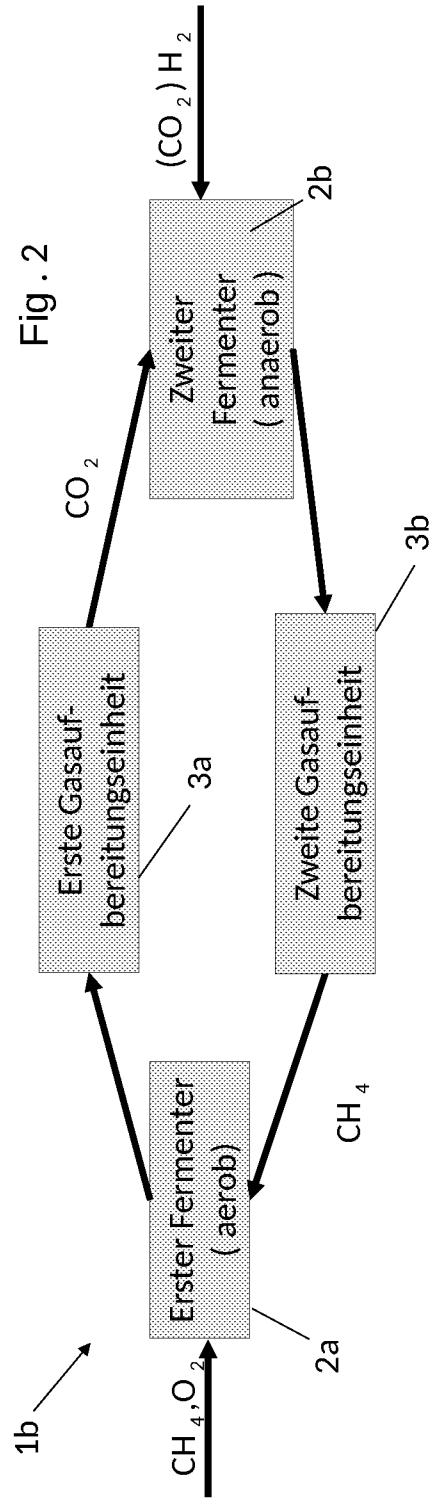
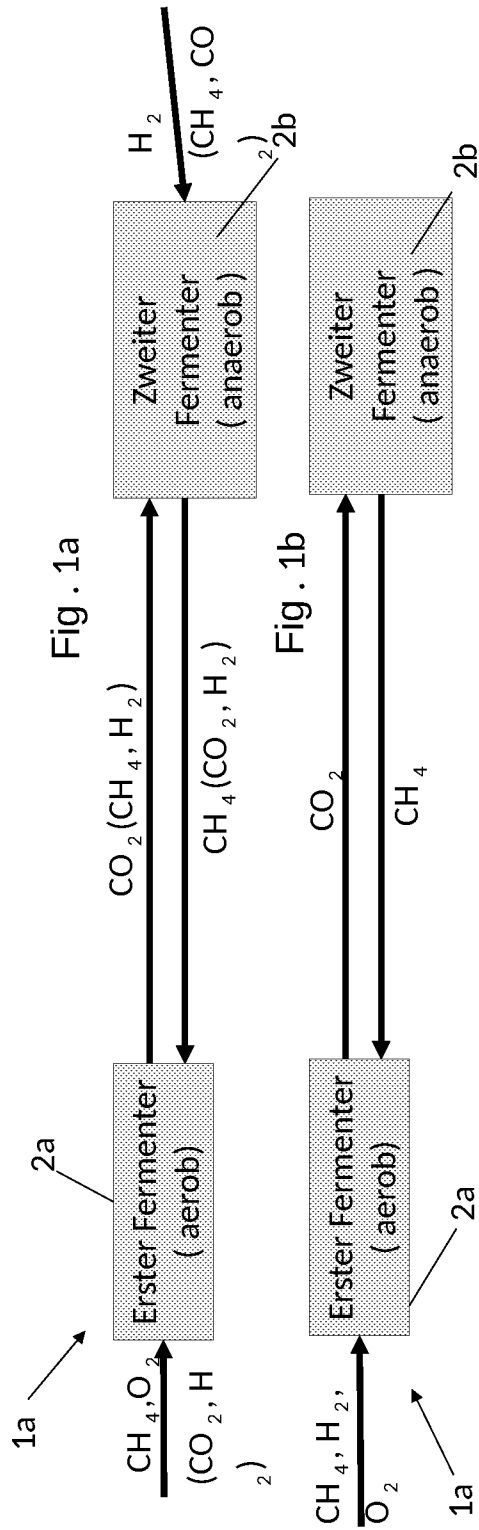
4. System nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das System außerdem einen Elektrolyseur umfasst, der dazu konfiguriert ist, Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufzuspalten, wobei der Elektrolyseur mit dem ersten Einlass und dem zweiten Einlass verbunden ist, um zumindest einen Teil des Sauerstoffs in den ersten Fermenter und zumindest einen Teil des Wasserstoffs in den zweiten Fermenter zu führen.

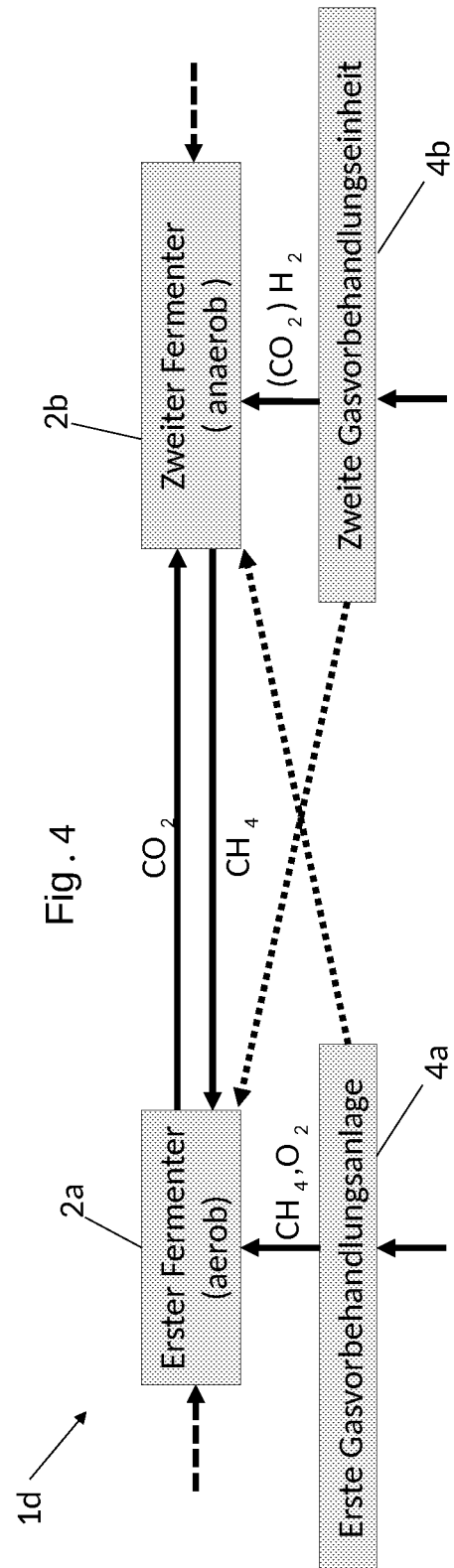
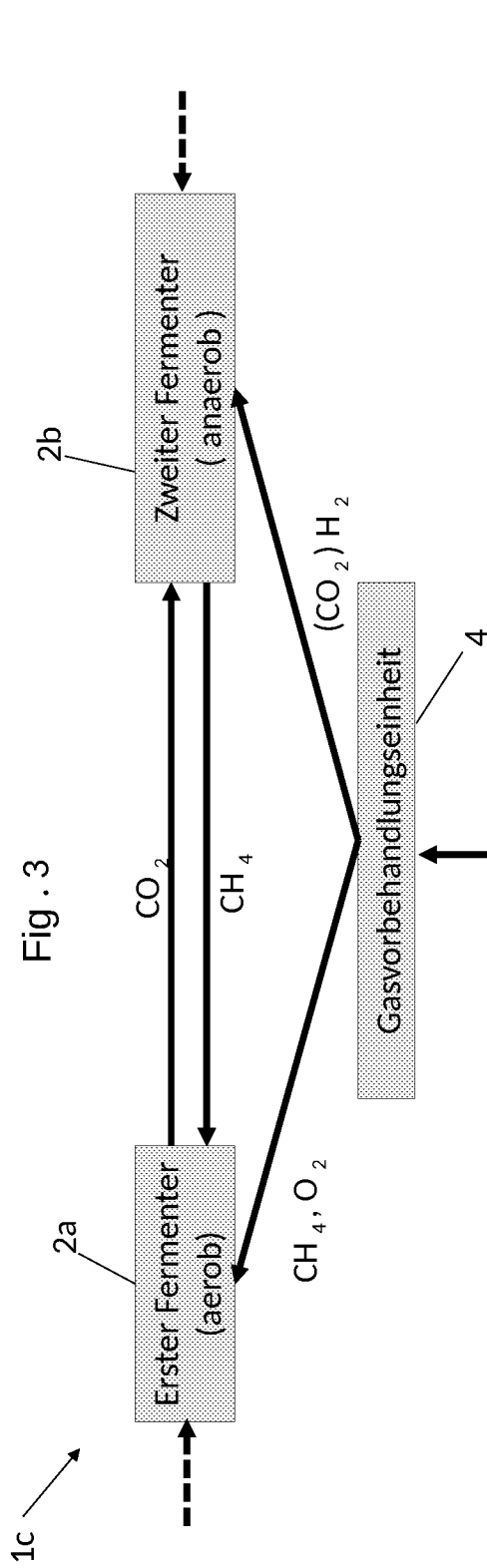
5. System nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das System weiterhin einen Vorratsbehälter und/oder einen Entleerungsbehälter umfasst, der mit dem ersten Fermenter und/oder dem zweiten Fermenter verbindbar ist.
6. System nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter und der zweite Fermenter jeweils einen Schlaufenfermenter (loop reactor) umfassen.
7. Verfahren zur Durchführung einer gekoppelten Gasfermentation, umfassend die Schritte:
 - (a) Bereitstellen eines ersten Fermenters und eines zweiten Fermenters, die jeweils eine Fermentationsbrühe umfassen, wobei der erste Fermenter in einem aeroben Modus betrieben wird und der zweite Fermenter in einem anaeroben Modus betrieben wird und wobei der erste und zweite Fermenter über die Gasphase gekoppelt sind,
 - (b) Einleiten eines ersten gasförmigen Ausgangsmaterials, das Methan umfasst, in den ersten Fermenter und Umwandeln des ersten gasförmigen Ausgangsmaterials in ein erstes Produkt und ein erstes Endgas, und Einführen eines zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials, das Kohlendioxid umfasst, in den zweiten Fermenter und Umwandeln des zweiten gasförmigen Ausgangsmaterials in ein zweites Produkt und ein zweites Endgas,

wobei mindestens ein Teil des ersten Endgases durch ein erstes Verbindungselement in den zweiten Fermenter eingespeist wird, um als mindestens ein Teil des zweiten gasförmigen Einsatzmaterials verwendet zu werden,

dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Teil des zweiten Endgases durch ein zweites Verbindungselement in den ersten Fermenter eingespeist wird, um als mindestens ein Teil des ersten gasförmigen Einsatzmaterials verwendet zu werden.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Endgas Kohlendioxid und das zweite Endgas Methan umfasst.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eines von dem ersten Endgas und dem zweiten Endgas durch eine Gasverarbeitungseinheit geleitet wird, um eine Zusammensetzung des ersten Endgases oder des zweiten Endgases vor der Zuführung zu ändern und mindestens einen Teil des ersten Endgases und/oder des zweiten Endgases dem zweiten Fermenter oder dem ersten Fermenter zuzuführen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der erste gasförmige Einsatzstoff 40 bis 90 Vol.-% Methan und 10 bis 60 Vol.-% Sauerstoff umfasst und/oder der zweite gasförmige Einsatzstoff 10 bis 55 Vol.-% Kohlenmonoxid umfasst, sowie 15 bis 30 Vol.-% Kohlendioxid und 30 bis 60 Vol.-% Wasserstoff.
11. Verfahren zur Gasfermentation nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass Wasser in einem mit dem ersten Fermenter und dem zweiten Fermenter verbundenen Elektrolyseur in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird, wobei zumindest ein Teil des Sauerstoffs dem ersten Fermenter zugeführt wird und zumindest ein Teil des Wasserstoffs in den zweiten Fermenter eingespeist wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter oder der zweite Fermenter mit einem Entleerungsgefäß zum Entleeren des Inhalts des ersten Fermenters oder des zweiten Fermenters verbunden wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter oder der zweite Fermenter mit einem Vorratsbehälter mit einer Fermentationsbrühe zum Nachfüllen des ersten Fermenters oder des zweiten Fermenters verbunden wird.
14. Verfahren zur Gasfermentation nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der erste gasförmige Einsatzstoff Sauerstoff und/oder der zweite gasförmige Einsatzstoff Wasserstoff umfasst.
15. Verfahren zur Gasfermentation nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Fermenter und der zweite Fermenter jeweils einen Schlaufenfermenter umfassen.





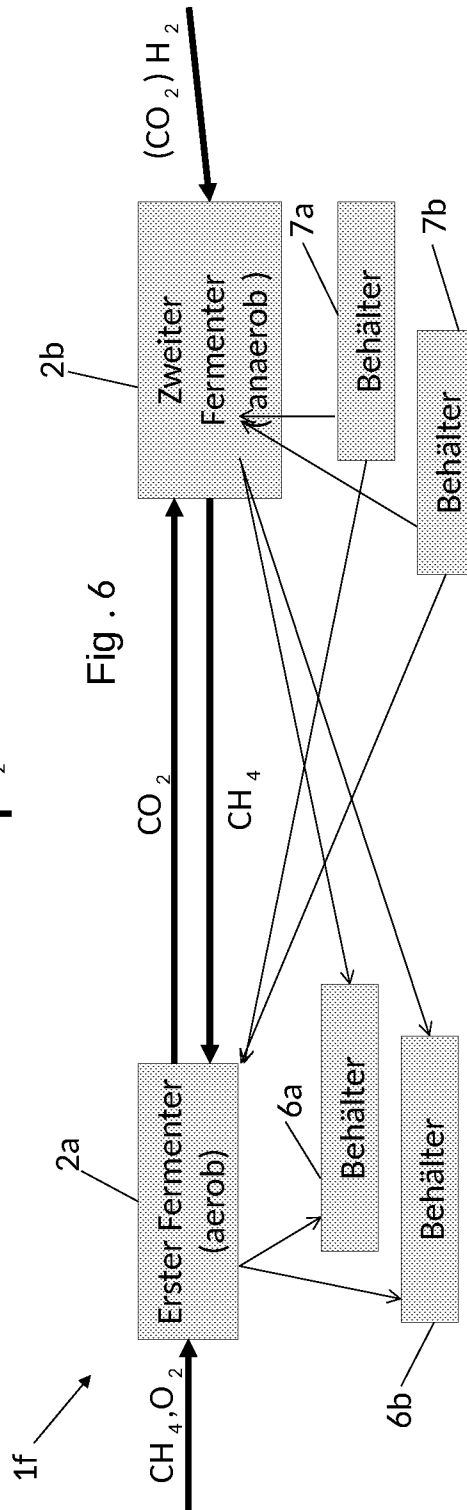
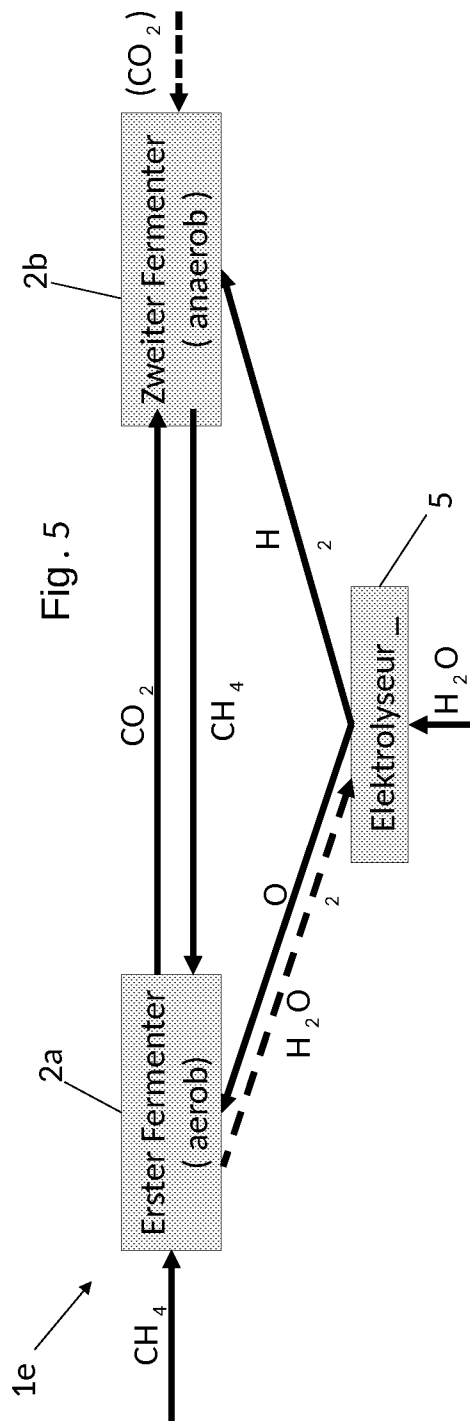


Fig. 7

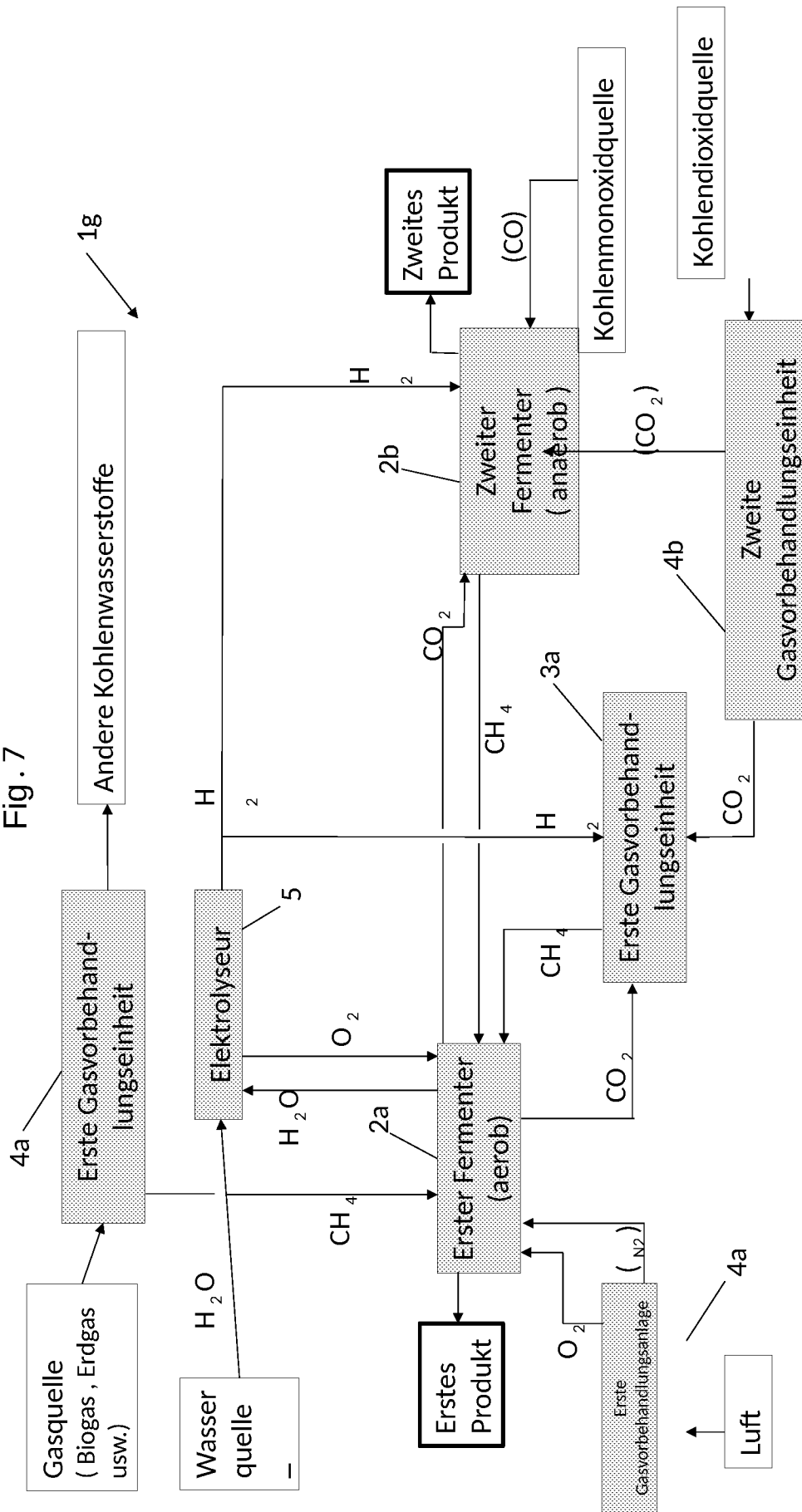


Fig . 9

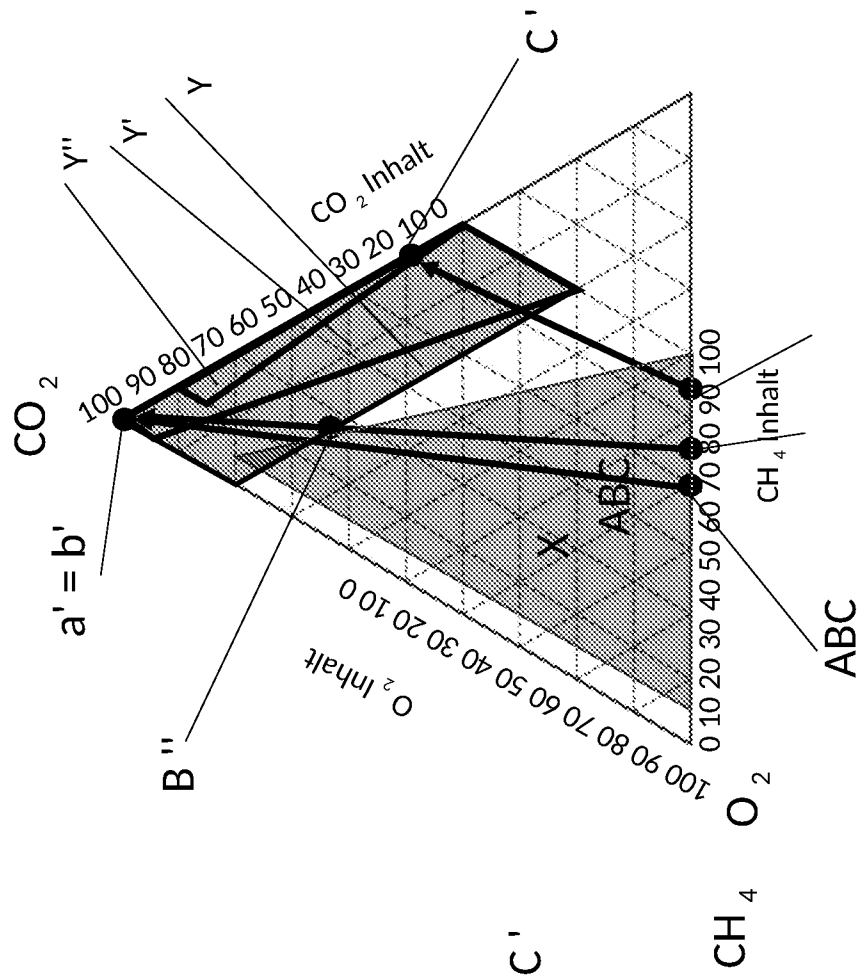


Fig . 8

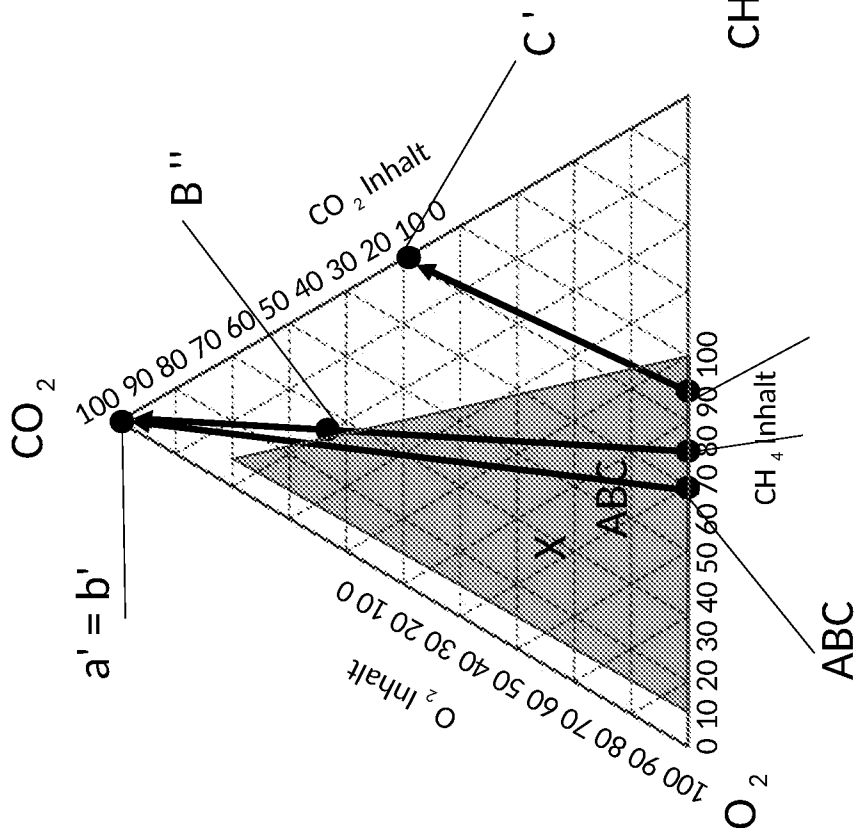


Fig . 11

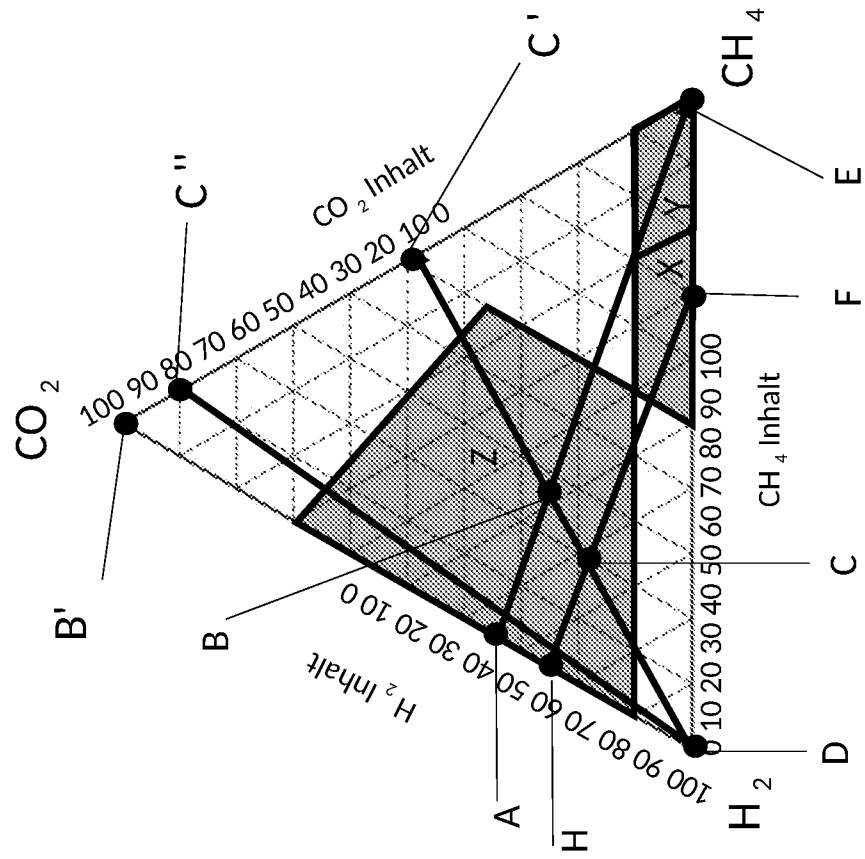


Fig . 10

