



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 31 171 T2** 2007.02.22

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 114 485 B1**

(51) Int Cl.⁸: **H01M 8/04** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 31 171.3**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/CA99/00823**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 942 669.5**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2000/016425**

(86) PCT-Anmeldetag: **14.09.1999**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **23.03.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **11.07.2001**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **03.05.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.02.2007**

(30) Unionspriorität:

100091 P	14.09.1998	US
2274240	10.06.1999	CA

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:

Questair Technologies, Inc., Burnaby, CA

(72) Erfinder:

**KEEFER, G., Bowie, Vancouver, British Columbia
V6R 2M1, CA; McLEAN, Christopher, Vancouver,
British Columbia V6R 2L8, CA; BROWN, J.,
Michael, West Vancouver, British Columbia V7T
2H3, CA**

(74) Vertreter:

BOEHMERT & BOEHMERT, 28209 Bremen

(54) Bezeichnung: **STROMERZEUGUNGSSYSTEM**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Brennstoffzelle zur Erzeugung von elektrischem Strom. Genauer gesagt betrifft die vorliegende Erfindung ein Stromerzeugungssystem auf Basis einer Brennstoffzelle, das Druckwechseladsorption zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle benutzt.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Brennstoffzellen liefern eine umweltfreundliche Quelle von elektrischem Strom. Eine Form von Brennstoffzelle, die zur Erzeugung von elektrischer Energie verwendet wird, enthält eine Anode zur Aufnahme von Wasserstoffgas, eine Kathode zur Aufnahme von Sauerstoffgas und einen alkalischen Elektrolyten. Eine andere Form von Brennstoffzelle enthält einen Anodenkanal zur Aufnahme einer Wasserstoffgasströmung, einen Kathodenkanal zur Aufnahme einer Sauerstoffgasströmung und eine Polymerelektrolytmembran (PEM), die den Anodenkanal vom Kathodenkanal trennt. In beiden Fällen reagiert Sauerstoffgas, das in die Kathode eintritt, mit Wasserstoffionen, die den Elektrolyten kreuzen, um eine Elektronenströmung zu erzeugen. Umweltverträglicher Wasserdampf wird auch als ein Nebenprodukt erzeugt. Mehrere Faktoren haben jedoch die weitverbreitete Verwendung von Brennstoffzellen als Energieerzeugungssysteme begrenzt.

[0003] Erstens ist zum Extrahieren einer kontinuierlichen Quelle von elektrischer Energie aus der Brennstoffzelle notwendig, die Brennstoffzelle mit einer kontinuierlichen Quelle von Sauerstoff- und Wasserstoffgas zu versehen. Mit Atmosphärenluft als direkte Quelle von Sauerstoff für den Kathodenkanal wird jedoch die Leistung von PEM-Brennstoffzellen durch den geringen Partialdruck von Sauerstoff und die Konzentrationspolarisation von Stickstoff ernstlich beeinträchtigt, während alkalische Brennstoffzellen ein Vorbehandlungsreinigungssystem zum Entfernen von Kohlendioxid aus der Einsatzluft erfordern. Ferner muß die Größe der Brennstoffzelle, da die mittlere Sauerstoffkonzentration in einem Kathodenkanal mit Atmosphärenluftzufuhr typischerweise nur ungefähr 15% beträgt, unerwünscht groß sein, um für ausreichend Leistung für industrielle Anwendungen zu sorgen.

[0004] Zum Erzielen eines Partialdrucks von Sauerstoff durch den Kathodenkanal, der zum Erzielen von wettbewerbsfähigen Stromdichten aus einem PEM-Brennstoffzellensystem, insbesondere für Fahrzeugantrieb, ausreicht, ist es notwendig, die Luftzufuhr auf wenigstens 3 Atmosphären zu komprimieren, bevor die Luftzufuhr in den Kathodenkanal eingeleitet wird. Wie man erkennen wird, reduziert

die Leistungsaufnahme, die zum ausreichenden Komprimieren der Luftzufuhr notwendig ist, den Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems. Es ist vorgeschlagen worden, Polymerelektrolytmembranen zur Anreicherung des Sauerstoffs zu verwenden, aber derartige Membranen reduzieren eigentlich den Sauerstoffpartialdruck und die Reduzierung des Gesamtdrucks hebt die erreichbare begrenzte Anreicherung mehr als auf.

[0005] Zweitens erfordert eine externe Produktion, Reinigung, Abgabe und Speicherung von Sauerstoff (entweder als komprimiertes Gas oder Kryoflüssigkeit) teure Infrastruktur, während Speicherung von Wasserstofftreibstoff in Fahrzeugen beträchtliche technische und wirtschaftliche Barrieren aufweist. Dementsprechend wird zur stationären Energieerzeugung bevorzugt, Wasserstoff aus Erdgas durch Dampfreformieren oder Teiloxidation gefolgt durch Wassergas-Shift zu erzeugen. Für Brennstoffzellenfahrzeuge, die einen flüssigen Brennstoff verwenden, wird bevorzugt, Wasserstoff aus Methanol durch Dampfreformieren oder aus Benzin durch Teiloxidation oder autotherme Reformierung, wiederum gefolgt durch Wassergas-Shift, zu erzeugen. Der resultierende Wasserstoff enthält jedoch Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidverunreinigungen, die jeweils von den PEM-Brennstoffzellenkatalysatorelektroden und dem alkalischen Brennstoffzellenelektrolyt in mehr als Spuren Mengen nicht toleriert werden können.

[0006] Das herkömmliche Verfahren zum Entfernen von restlichem Kohlenmonoxid aus der Wasserstoffzufuhr zu PEM-Brennstoffzellen ist katalytische selektive Oxidation gewesen, die den Wirkungsgrad beeinträchtigt, da sowohl das Kohlenmonoxid als auch ein Teil des Wasserstoffs durch Oxidation bei niedriger Temperatur ohne eine Rückgewinnung von Verbrennungswärme verbraucht werden. Palladiumdiffusionsmembranen können zur Wasserstoffreinigung verwendet werden, aber weisen die Nachteile von Zuführung von gereinigtem Wasserstoff bei geringem Druck und auch die Verwendung von seltenen und teuren Materialien auf.

[0007] Drittens weisen Druckwechseladsorptionssysteme (PSA) die attraktiven Merkmale auf, daß sie für kontinuierliche Quellen von Sauerstoff- und Wasserstoffgas ohne wesentliche Kontaminationsmengen sorgen können. PSA-Systeme und Vakuumdruckwechseladsorptionssysteme (Vakuum-PSA) trennen Gasfraktionen von einem Gasgemisch durch Koordinieren von Druckkreislauführung und Strömungsumkehrungen über einem Adsorptionsbett, das vorzugsweise eine leichter adsorbierte Gaskomponente relativ zu einer weniger leicht adsorbierten Gaskomponente des Gemisches adsorbiert. Der Gesamtdruck des Gasgemisches in dem Adsorptionsbett wird erhöht, während das Gasgemisch durch das Adsorptionsbett von einem ersten

Ende zu einem zweiten Ende desselben strömt; und wird verringert, während das Gasgemisch durch das Adsorptionsmittel vom zweiten Ende zum ersten Ende zurückströmt. Wenn der PSA-Zyklus wiederholt wird, wird die weniger leicht adsorbierte Komponente benachbart zum zweiten Ende des Adsorptionsbettes konzentriert, während die leichter adsorbierte Komponente benachbart zum ersten Ende des Adsorptionsbettes konzentriert wird. Als Ergebnis wird ein „leichtes“ Produkt (eine Gasfraktion, die an der leichter adsorbierten Komponente verarmt und mit der weniger leicht adsorbierten Komponente angereichert ist) vom zweiten Ende des Bettes zugeführt und wird „schweres“ Produkt (eine Gasfraktion, die mit der stärker adsorbierten Komponente angereichert ist) aus dem ersten Ende des Bettes abgegeben.

[0008] In einer bevorzugten Implementierung der ersten Ausführungsform extrahiert das Druckwechseladsorptionssystem angereichertes Sauerstoffgas aus Luft. Das Sauerstoffdruckwechseladsorptionssystem enthält ein Rotationsmodul mit einem Stator und einem bezüglich des Stators drehbaren Rotor. Der Rotor enthält eine Anzahl von Strömungswegen zur Aufnahme von Adsorptionsmaterial darin, um vorzugsweise eine erste Gaskomponente als Reaktion auf zunehmenden Druck in den Strömungswegen bezüglich einer zweiten Gaskomponente aufzunehmen. Das Druckwechseladsorptionssystem enthält auch eine mit dem Rotationsmodul verbundene Verdichtungsmaschinenanlage, um Gasstrom durch die Strömungswege zum Trennen der ersten Gaskomponente von der zweiten Gaskomponente zu erleichtern. Der Stator enthält eine erste Statorventilfläche, eine zweite Statorventilfläche, und mehrere Funktionskammern, die in die Statorventilflächen münden. Die Funktionskammern enthalten eine Gaszuführungskammer, eine Leichtrückflussauslaßkammer und eine Leichtrückflußrückführkammer.

[0009] In einer Variante umfaßt die Verdichtungsmaschinenanlage einen Kompressor zur Abgabe von Druckluft an die Gaszuführungskammer und einen Leichtrückflußentspanner, der zwischen der Leichtrückflussauslaßkammer und der Leichtrückflußrückführkammer verbunden ist. Das Gasrückführungsmittel umfaßt einen Verdichter, der mit dem Leichtrückflußentspanner zum Zuführen von Sauerstoffgas, das aus dem Kathodengasauslaß abgegeben wird, unter Druck an den Kathodengaseinlaß. Als Ergebnis kann vom Druckwechseladsorptionssystem wiedergewonnene Energie eingesetzt werden, um den Druck von Sauerstoffgas, das vom Kathodengaseinlaß zugeführt wird, zu verstärken.

[0010] In einer weiteren Variante sind Drosselöffnungen zwischen der Leichtrückflussauslaßkammer und der Leichtrückflußrückführkammer für Druckablaß als Ersatz für den Leichtrückflußentspanner angeordnet. Das Gasrückführungsmittel umfaßt den

Verdichter, der mit dem Kathodengasauslaß zum Zuführen von Sauerstoffgas zum Kathodengaseinlaß verbunden ist, und eine Drosselöffnung, die zwischen dem Kathodengasauslaß und einer Druckkammer zum Rückführen eines Teils des Sauerstoffgases als Einsatzgas zum Druckwechseladsorptionssystem angeordnet ist. Als Ergebnis kann vom Kathodengasauslaß rückgewonnene Energie dazu verwendet werden, um den Kathodengaseinlaß durch das PSA-System unter Druck zu setzen.

[0011] Gemäß einer zweiten Ausführungsform stellt die vorliegende Erfindung bereit ein Stromerzeugungssystem, umfassend:

eine Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslaß enthält, einem Kathodenkanal, der einen Kathodengaseinlaß und einen Kathodengasauslaß enthält, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und

ein Sauerstoffgaszuführungssystem, das mit dem Kathodengaseinlaß verbunden ist, um dem Kathodenkanal einen Gasstrom mit Sauerstoffgas zuzuführen, und

ein Wasserstoffgaszuführungssystem, das mit dem Anodengaseinlaß verbunden ist, um dem Anodenkanal einen mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstrom zuzuführen, wobei es ein Wasserstoffrotationsdruckwechseladsorptionssystem zur Wasserstoffanreicherung in einer Gaszufuhr enthält.

[0012] Das herkömmliche System zur Implementierung von Druckwechseladsorption oder Vakuumdruckwechseladsorption verwendet jedoch zwei oder mehr stationäre Adsorptionsbetten parallel, mit Wegeventilen an jedem Ende jedes Adsorptionsbettes zum Verbinden der Betten in abwechselnder Reihenfolge mit Druckquellen und -senken. Dieses System ist häufig aufgrund der Komplexität der erforderlichen Ventile schwierig und teuer zu implementieren.

[0013] Ferner macht das herkömmliche PSA-System ineffizienten Gebrauch von eingesetzter Energie, da Einsatzgasdruckbeaufschlagung durch einen Verdichter vorgesehen ist, dessen Zufuhrdruck der höchste Druck des Zyklus ist. In PSA wird Energie, die beim Verdichten des zum Druckbeaufschlagen verwendeten Einsatzgases aufgewandt wird, dann beim Drosseln über Ventile über die momentane Druckdifferenz zwischen dem Adsorber und der Hochdruckzuführung umgewandelt. In ähnlicher Weise wird in Vakuum-PSA, bei der der niedrige Druck des Zyklus durch eine Vakuumpumpe erzeugt wird, die das Gas bei dem Druck abgibt, Energie beim Drosseln über Ventile während Gegenstrom-Blowdown von Adsorbern umgewandelt, deren Druck reduziert wird. Eine weitere Energieumwandlung in beiden Systemen findet beim Drosseln von Leichtrück-

flußgas statt, das für Spül-, Angleichungs-, Gleichstrom-Blowdown und Produktdruckbeaufschlagungs- oder -auffüllschritte verwendet wird. Diese Energiesenken reduzieren den gesamten Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems.

[0014] Zusätzlich können herkömmliche PSA-Systeme allgemein nur bei relativ niedrigen Taktfrequenzen arbeiten, die die Verwendung von großen Adsorptionsmittelvorräten erfordern. Die sich daraus ergebende große Größe und das große Gewicht von derartigen PSA-Systemen macht sie für Brennstoffzellenanwendungen bei Fahrzeugen ungeeignet.

[0015] Dementsprechend besteht ein Bedarf an einem effizienten Stromerzeugungssystem auf Basis einer Brennstoffzelle, das ausreichend Leistung für industrielle Anwendungen erzeugen kann und für Fahrzeuganwendungen geeignet ist.

[0016] Die DE 3913581 beschreibt einen Prozeß zum Rückführen von Anodenabgas zu einer Brennstoffzellenanode, worin das Anodenabgas durch ein Druckwechseladsorptionssystem zum Trennen von Wasserstoff vom Anodenabgas geleitet wird. Der getrennte Wasserstoff wird danach mit dem Zuführstrom für die Brennstoffzellenanode gemischt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0017] Gemäß der Erfindung wird ein Stromerzeugungssystem auf der Basis einer Brennstoffzelle bereitgestellt, das sich mit den Nachteilen der Brennstoffzellenstromerzeugungssysteme im Stand der Technik befaßt.

[0018] Gemäß einer ersten Ausführungsform liefert die vorliegende Erfindung ein Stromerzeugungssystem, das folgendes umfaßt:

eine Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodenkanal, der einen Kathodengaseinlass und einen Kathodengasauslass enthält, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und ein Sauerstoffgaszuführungssystem, das mit dem Kathodengaseinlass verbunden ist, um dem Kathodenkanal einen mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstrom zuzuführen, wobei das Sauerstoffgaszuführungssystem ein Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zur Sauerstoffanreicherung in einer Gaszufuhr enthält.

[0019] Vorzugsweise enthält das Wasserstoffgaszuführungssystem einen Wasserstoffgaseinlaß zur Aufnahme einer ersten Wasserstoffgaszufuhr vom Anodengasauslaß und einen Wasserstoffauslaß, der zur Zufuhr von Wasserstoffgas, das von der ersten Was-

serstoffgaszufuhr aufgenommen ist, zum Anodenkanal mit erhöhter Reinheit verbunden ist.

[0020] In einer bevorzugten Implementierung der zweiten Ausführungsform umfaßt das Sauerstoffgaszuführungssystem ein Sauerstoffdruckwechselabsorptionssystem und umfaßt das Wasserstoffgaszuführungssystem einen Reaktor zum Erzeugen einer zweiten Wasserstoffgaszufuhr aus Kohlenwasserstofftreibstoff, und ist das Wasserstoffdruckwechselabsorptionssystem mit dem Reaktor zur Reinigung von Wasserstoffgas verbunden, das aus den ersten und zweiten Wasserstoffgaszufuhren aufgenommen wird. Beide Druckwechselabsorptionssysteme enthalten ein Rotationsmodul mit einem Stator und einem bezüglich des Stators drehbaren Rotor. Der Rotor enthält eine Anzahl von Strömungswegen zur Aufnahme von Adsorptionsmaterial darin zum bevorzugten Adsorbieren einer ersten Gaskomponente als Reaktion auf Erhöhen von Druck in den Strömungswegen bezüglich einer zweiten Gaskomponente. Die Funktionskammern enthalten eine Gaszufuhrkammer und eine Schwerproduktkammer.

[0021] In einer Variante enthält das Sauerstoffdruckwechseladsorptionssystem einen Verdichter, der mit der Gaszufuhrkammer zur Zuführung von Druckluft zur Gaszufuhrkammer verbunden ist, und eine Vakuumpumpe, die mit dem Verdichter zum Extrahieren von Stickstoffproduktgas aus der Schwerproduktkammer verbunden ist. Der Reaktor umfaßt einen Dampfreformer, der einen Brenner enthält, zur Erzeugung von Syngas, und einen Wassergas-Shiftreaktor, der mit dem Dampfreformer zur Umwandlung des Syngases in die zweite Wasserstoffgaszufuhr verbunden ist. Das Wasserstoffdruckwechseladsorptionssystem enthält eine Vakuumpumpe zur Zuführung von Brenngas aus der Schwerproduktkammer zum Brenner. Das Brenngas wird in dem Brenner verbrannt und die daraus erzeugte Wärme wird verwendet, um die endotherme Reaktionswärme zu liefern, die für die Dampfreformerreaktion notwendig ist. Das resultierende Syngas wird dem Wassergas-Shiftreaktor zum Entfernen von Verunreinigungen zugeführt und danach als die zweite Wasserstoffgaszufuhr dem Wasserstoffdruckwechseladsorptionssystem zugeführt.

[0022] In einer weiteren Variante enthält die Erfindung einen Brenner zum Verbrennen von Brennstoff. Der Reaktor umfaßt einen autothermen Reformer zur Erzeugung von Syngas und einen Wassergas-Shiftreaktor, der mit dem autothermen Reformer zur Umwandlung des Syngases in die zweite Wasserstoffgaszufuhr verbunden ist. Der Verdichter des Sauerstoffdruckwechseladsorptionssystems führt dem Brenner Druckluft zu und das schwere Produktgas wird aus dem Wasserstoffdruckwechseladsorptionssystem als in dem Brenner zu verbrennendes Abgas zugeführt. Die Verdichteranlage des Sauerstoff-

druckwechseladsorptionssysteme enthält auch einen Entspanner, der mit dem Verdichter zum Betreiben des Verdichters mit heißem Verbrennungsgas, das vom Brenner emittiert wird, verbunden ist. Wärme vom Brenner kann auch verwendet werden, um Luft und/oder Brennstoff, die bzw. der dem autothermen Reformers zugeführt wird, vorzuheizen.

[0023] Gemäß einer dritten Ausführungsform liefert die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung eines elektrischen Potentials, das die folgenden Schritte umfaßt:

Bereitstellen einer Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodengaseinlass und einem Kathodengasauslass, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und

Versorgen des Kathodengaseinlasses mit einem mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstrom, wobei der Versorgungsschritt die Schritte der Versorgung einer Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung mit einer ersten Gaszufuhr zur Erzeugung eines mit Sauerstoffgas angereicherten Produktgasstroms und der Zuführung des Produktgasstroms zum Kathodengaseinlaß umfaßt.

[0024] Gemäß einer vierten Ausführungsform liefert die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung eines elektrischen Potentials, das die folgenden Schritte umfaßt:

Bereitstellen einer Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodengaseinlass und einem Kathodengasauslass, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und Versorgen des Anodengaseinlasses mit einem mit Wasserstoffgas angereicherten ersten Gasstrom, wobei der Versorgungsschritt die Schritte der Versorgung einer Rotationswasserstoffdruckwechseladsorptionsvorrichtung mit einer ersten Gaszufuhr zur Erzeugung eines mit Wasserstoffgas angereicherten ersten Produktgasstroms und der Zuführung des ersten Produktgasstroms zum Anodengaseinlaß umfaßt; und Versorgen des Kathodengaseinlasses mit einem mit Sauerstoffgas angereicherten zweiten Gasstrom.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0025] Die bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird nun lediglich beispielhaft unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben werden, in denen:

[0026] [Fig. 1](#) eine Schnittansicht eines für die Ver-

wendung mit der vorliegenden Erfindung geeigneten Rotations-PSA-Moduls ist, die den Stator und in dem Stator befindlichen Rotor zeigt;

[0027] [Fig. 2](#) eine Schnittansicht des Moduls von [Fig. 1](#) zeigt, wobei der Stator der Klarheit halber entfernt ist;

[0028] [Fig. 3](#) eine Schnittansicht des in [Fig. 1](#) gezeigten Stators zeigt, wobei der Rotor der Klarheit halber entfernt ist;

[0029] [Fig. 4](#) einen Axialschnitt des Moduls von [Fig. 1](#) zeigt;

[0030] [Fig. 5](#) einen typischen PSA-Zyklus zeigt, der mit dem in den [Fig. 1](#) bis [Fig. 4](#) gezeigten PSA-System erzielbar ist;

[0031] [Fig. 6](#) eine Variante des PSA-Zyklus mit schweren Rückfluß zeigt, die mit dem in den [Fig. 1](#) bis [Fig. 4](#) gezeigten PSA-System erzielbar ist;

[0032] [Fig. 7](#) eine Druckwechseladsorptionsvorrichtung zum Trennen von Sauerstoffgas von Luft zeigt, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet ist, und das in [Fig. 1](#) gezeigte Rotationsmodul und eine mit dem Rotationsmodul verbundene Verdichtungsanlage darstellt;

[0033] [Fig. 8](#) eine Druckwechseladsorptionsvorrichtung zur Reinigung von Wasserstoffgas zeigt, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet ist und das in [Fig. 1](#) gezeigte Rotationsmodul und eine mit dem Rotationsmodul verbundene Verdichtungsanlage darstellt;

[0034] [Fig. 9](#) ein Stromerzeugungssystem gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt, das ein Sauerstofftrennungs-PSA-System zum Versorgen des Brennstoffzellenkathodenkanals mit angereichertem Sauerstoff mit Energierückgewinnung aus Leichterückflußentspannung zum Verstärken des Drucks von Sauerstoff, der in dem Brennstoffzellenkathodenkreislauf zirkuliert, enthält;

[0035] [Fig. 10](#) eine erste Variante des in [Fig. 9](#) gezeigten Stromerzeugungssystems, wobei aber das PSA-System einen Gegenstrom-Blowdown-Entspanner enthält, der eine Absaugvakuumpumpe mit freiem Rotor für einen Vakuum-PSA-Betrieb antreibt;

[0036] [Fig. 11](#) eine zweite Variante des in [Fig. 9](#) gezeigten Stromerzeugungssystems zeigt, wobei ein Teil des mit Sauerstoff angereicherten Gases, das von der Brennstoffzellenkathode abgegeben wird, für einen Druckbeaufschlagungsschritt für das PSA-System verwendet wird;

[0037] [Fig. 12](#) ein Stromerzeugungssystem gemäß

einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt, das ein Sauerstofftrennungs-PSA-System zum Versorgen des Brennstoffzellenkathodenkanals mit angereichertem Sauerstoff und ein Wasserstofftrennungs-PSA-System zum Versorgen des Brennstoffzellenanodenkanals mit angereichertem Wasserstoff enthält, wobei das Wasserstofftrennungs-PSA-System Einsatzgas von einem Dampfreformer aufnimmt; und

[0038] **Fig. 13** ein Stromerzeugungssystem gemäß einer Variante des in **Fig. 12** gezeigten Stromerzeugungssystems zeigt, wobei aber das Wasserstofftrennungs-PSA-System Einsatzgas von einem autothermen Reformer aufnimmt.

[0039] **Fig. 14** zeigt ein Stromerzeugungssystem mit Kohlendioxidentfernung und Sauerstoffanreicherung für eine alkalische Brennstoffzelle und mit einem Sauerstoffakkumulator.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0040] Um zum Verständnis der vorliegenden Erfindung beizutragen, werden ein Druckwechseladsorptionsprozeß und eine zugehörige Vorrichtung, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet ist, als erstes unter Bezugnahme auf die **Fig. 1** bis **Fig. 6** beschrieben. Danach werden ein sauerstofftrennendes Druckwechseladsorptionssystem und ein wasserstofftrennendes Druckwechseladsorptionssystem unter Bezugnahme jeweils auf die **Fig. 7** und **Fig. 8** beschrieben. Zwei Ausführungsformen der Erfindung werden danach gemeinsam mit Varianten beginnend mit **Fig. 9** beschrieben.

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 und **Fig. 4**

[0041] Ein Rotationsmodul **10**, das zur Verwendung als Teil der vorliegenden Erfindung geeignet ist, ist in den **Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3** und **Fig. 4** gezeigt.

[0042] Das Modul enthält einen Rotor **11**, der sich um eine Achse **12** in der durch den Pfeil **13** gezeigten Richtung in einem Stator **14** dreht.

[0043] Allgemein kann das Rotationsmodul **10** für eine Strömung durch die Adsorberelemente in den radialen, axialen oder schief verlaufenden konischen Richtungen bezüglich der Rotorachse konfiguriert sein. Für einen Betrieb bei hoher Zyklusfrequenz weist eine radiale Strömung den Vorteil auf, daß die Zentrifugalbeschleunigung parallel zum Strömungsweg zum günstigsten Stabilisieren von durch Auftrieb angetriebener freier Konvektion sowie zentrifugalen Klemmen von granulärem Adsorptionsmittel mit gleichmäßiger Strömungsverteilung liegen wird. Andererseits werden Konfigurationen mit axialer Strömung für geringe Modulkapazitäten bevorzugt, wäh-

rend Konfigurationen mit radialer Strömung für große Modulkapazitäten bevorzugt werden.

[0044] Wie in **Fig. 2** gezeigt ist, weist der Rotor **11** einen ringförmigen Querschnitt auf, der konzentrisch zur Achse **12** eine äußere Zylinderwand **20**, deren Außenfläche eine erste Ventilfläche **21** ist, und eine innere Zylinderwand **22** aufweist, deren Innenfläche eine zweite Ventilfläche **23** ist. Der Rotor weist (in der Ebene des durch die Pfeile **15** und **16** in **Fig. 4** definierten Schnitts) insgesamt „N“ Adsorberelemente **24** für radiale Strömung auf. Ein benachbartes Paar von Adsorberelementen **25** und **26** ist durch eine Trennwand **27** getrennt, die mit der Außenwand **20** und der Innenwand **22** baulich und abdichtend verbunden ist. Benachbarte Adsorberelemente **25** und **26** sind relativ zur Achse **12** um einen Winkel $[360^\circ/N]$ winkelförmig beabstandet. Da die Adsorberelemente und die Ventilflächen dadurch in eine einzige Einheit integriert werden und sich die Adsorberelemente in dichter Nähe der Ventilflächen mit minimalem Totvolumen befinden, ist das Rotationsmodul **10** kompakter und effizienter als herkömmliche PSA-Systeme.

[0045] Das Adsorberelement **24** weist ein erstes Ende **30**, das durch ein Stützsieb **31** definiert ist, und ein zweites Ende **32** auf, das durch ein Stützsieb **33** definiert ist. Der Adsorber kann als granulöses Adsorbens vorgesehen sein, dessen Packungsporosität einen Strömungsweg definiert, der das Adsorbens zwischen den ersten und zweiten Enden des Adsorbers berührt. Vorzugsweise ist das Adsorberelement als eine Anordnung von laminierten dünnen Schichten vorgesehen, die sich zwischen den ersten und zweiten Enden des Adsorbers erstrecken, wobei die Schichten ein Adsorbens, wie zum Beispiel Zeolith, das auf einer Verstärkungsmatrix gehalten wird, aufweisen und die Strömungskanäle durch Abstandhalter zwischen den Schichten erzeugt sind. Der Adsorber mit laminierten Schichten, wobei die Schichtdicke näherungsweise 150 Mikron beträgt und unter Verwendung von Typ X-Zeolithen, weist im Vergleich mit herkömmlichen granulösen Adsorbentien einen erheblich verringerten Massenübergang und Druckabfallfestigkeiten auf, so daß ein zufriedenstellender Sauerstoffanreicherungsbetrieb mit PSA-Zyklusperioden in der Größenordnung von 1 Sekunde und hinab auf 0,4 Sekunden erzielt worden ist. Demzufolge wird der Adsorbensvorrat im Vergleich mit herkömmlichen PSA-Zyklusperioden von ungefähr 1 Minute radikal verringert, wobei die Größe des Moduls um etwa zwei Größenordnungen im Vergleich mit einer herkömmlichen PSA-Anlage mit äquivalenter Kapazität geringer ist. Als Ergebnis kann ein außergewöhnlich kompaktes PSA-Modul verwendet werden, was die Erfindung für Brennstoffzellenantriebsaggregate für Fahrzeuge besonders geeignet macht.

[0046] Eine erste Apertur oder Öffnung **34** liefert eine Strömungsverbindung von einer ersten Ventilflä-

che **21** durch die Wand **20** zum ersten Ende **30** des Adsorbers **24**. Eine zweite Apertur oder Öffnung **35** liefert eine Strömungsverbindung von der zweiten Ventilfläche **23** durch die Wand **22** zum zweiten Ende **31** des Adsorbers **24**. Die Stützsiebe **31** und **33** sorgen jeweils für Strömungsverteilung **32** zwischen der ersten Apertur **34** und dem ersten Ende **30** und zwischen der zweiten Apertur **35** und dem zweiten Ende **32** des Adsorberelements **24**.

[0047] Wie in [Fig. 3](#) gezeigt, ist der Stator **14** ein Druckbehälter, der eine äußere Zylinderschale oder einen ersten Ventilstator **40** außerhalb des ringförmigen Rotors **11** und eine innere Zylinderschale oder einen zweiten Ventilstator **41** innerhalb des ringförmigen Rotors **11** enthält. Die äußere Schale **40** trägt sich axial erstreckende Streifendichtungen (z.B. **42** und **43**), die die erste Ventilfläche **21** abdichtend eingreifen, während die innere Schale **41** sich axial erstreckende Streifendichtungen (z.B. **44** und **45**) trägt, die die zweite Ventilfläche **23** abdichtend eingreifen. Vorzugsweise ist die azimuthale Dichtungsbreite der Streifendichtungen größer als die Durchmesser oder azimuthalen Breiten der ersten und zweiten Aperturen **34** und **35**, die sich durch die ersten und zweiten Ventilflächen öffnen.

[0048] Eine Gruppe von ersten Kammern in der äußeren Schale mündet jeweils in einem Winkelsektor zur ersten Ventilfläche und jede sorgt für eine Flüssigkeitsverbindung zwischen ihrem Winkelsektor der ersten Ventilfläche und einem Verteiler außerhalb des Moduls. Die Winkelsektoren der Kammern sind viel breiter als der Winkelabstand der Adsorberelemente. Die ersten Kammern sind auf der ersten Abdichtfläche durch die Streifendichtungen (z.B. **42**) getrennt. In [Fig. 3](#) im Uhrzeigersinn, in der Richtung der Rotordrehung, voranschreitend, steht eine erste Zufuhrdruckbeaufschlagungskammer **46** durch die Leitung **47** mit einem ersten Zufuhrdruckbeaufschlagungsverteiler **48** in Verbindung, der auf einem ersten Zwischenzufuhrdruck gehalten wird. In ähnlicher Weise steht eine zweite Zufuhrdruckbeaufschlagungskammer **50** mit einem zweiten Zufuhrdruckbeaufschlagungsverteiler **51** in Verbindung, der auf einem zweiten Zwischenzufuhrdruck gehalten wird, der höher als der erste Zwischenzufuhrdruck, aber niedriger als der höhere Arbeitsdruck ist.

[0049] Zur größeren Verallgemeinerung ist das Modul **10** mit Berücksichtigung von sequentieller Beaufschlagung mit zwei Zufuhrgemischen gezeigt, wobei das erste Einsatzgas eine geringere Konzentration der leichter adsorbierten Komponente bezüglich des zweiten Einsatzgases aufweist. Die erste Zufuhrkammer **52** steht mit dem ersten Zufuhrverteiler **53** in Verbindung, der auf im wesentlichen dem hohen Arbeitsdruck gehalten wird. In gleicher Weise steht die zweite Zufuhrkammer **54** mit dem zweiten Zufuhrverteiler **55** in Verbindung, der auf im wesentlichen dem höhe-

ren Arbeitsdruck gehalten wird. Eine erste Gegenstrom-Blowdown-Kammer **56** steht mit einem ersten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **57** in Verbindung, der auf einem ersten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck gehalten wird. Eine zweite Gegenstrom-Blowdown-Kammer **58** steht mit einem zweiten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **59** in Verbindung, der auf einem zweiten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck über dem niedrigeren Arbeitsdruck gehalten wird. Eine Schwerproduktkammer **60** steht mit einem Schwerproduktabgabeverteiler **61** in Verbindung, der auf im wesentlichen dem niedrigeren Arbeitsdruck gehalten wird. Man wird bemerken, daß die Kammer **58** durch Streifendichtungen **42** und **43** begrenzt ist und in ähnlicher Weise alle Kammern begrenzt und wechselseitig durch Streifendichtungen getrennt sind.

[0050] Eine Gruppe von zweiten Kammern in der inneren Schale mündet jeweils in einen Winkelsektor zur zweiten Ventilfläche und liefert jeweils eine Flüssigkeitsverbindung zwischen ihrem Winkelsektor der zweiten Ventilfläche und einem Verteiler außerhalb des Moduls. Die zweiten Kammern sind an der zweiten Dichtfläche durch Streifendichtungen (z.B. **44**) getrennt. In [Fig. 3](#) im Uhrzeigersinn, wieder in Richtung der Rotordrehung, voranschreitend, steht eine Leichtproduktkammer **70** mit einem Leichtproduktverteiler **71** in Verbindung und nimmt sie leichtes Produktgas auf im wesentlichen dem höheren Arbeitsdruck nimmt Reibungsdruckverluste durch die Adsorber und die ersten und zweiten Öffnungen auf. Gemäß der Winkelerstreckung der Kammer **70** bezüglich der Kammern **52** und **54** kann das leichte Produkt nur von Adsorbern, die das erste Einsatzgas von Kammer **52** simultan aufnehmen, oder von Adsorbern erhalten werden, die sowohl das erste als auch das zweite Einsatzgas aufnehmen.

[0051] Eine erste Leichtrückflußauslaßkammer **72** steht mit einem ersten Leichtrückflußauslaßverteiler **73** in Verbindung, der auf einem ersten Leichtrückflußauslaßdruck gehalten wird, der hier im wesentlichen der höhere Arbeitsdruck minus Reibungsdruckverlusten ist. Eine erste Gleichstrom-Blowdown-Kammer **74** (die eigentlich die zweite Leichtrückflußauslaßkammer ist) steht mit einem zweiten Leichtrückflußauslaßverteiler **75** in Verbindung, der auf einem ersten Gleichstrom-Blowdown-Druck gehalten wird, der geringer als der höhere Arbeitsdruck ist. Eine zweite Gleichstrom-Blowdown-Kammer oder eine dritte Leichtrückflußauslaßkammer **76** steht mit dem dritten Leichtrückflußauslaßverteiler **77** in Verbindung, der auf einem zweiten Gleichstrom-Blowdown-Druck gehalten wird, der geringer als der erste Gleichstrom-Blowdown-Druck ist. Eine dritte Gleichstrom-Blowdown-Kammer oder eine vierte Leichtrückflußauslaßkammer **78** steht mit einem vierten Leichtrückflußauslaßverteiler **79** in Verbindung, der auf einem dritten Gleichstrom-Blow-

down-Druck gehalten wird, der geringer als der zweite Gleichstrom-Blowdown-Druck ist.

[0052] Eine Reinigungskammer **80** steht mit einem vierten Leichtrückflußrückführverteiler **81** in Verbindung, der das vierte Leichtrückflußgas zuführt, das vom dritten Gleichstrom-Blowdown-Druck auf im wesentlichen den niedrigeren Arbeitsdruck unter Einräumung von Reibungsdruckverlusten entspannt worden ist. Die Reihenfolge der Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsschritte ist gegenüber der Reihenfolge der Leichtrückflußauslaß- oder Gleichstrom-Blowdown-Schritte umgedreht, um eine gewünschte „Last out – first in“-Schichtung der Leichtrückflußgaspakete zu erhalten. Somit steht eine erste Leichtrückflußdruckbeaufschlagungskammer **82** mit einem dritten Leichtrückflußrückführverteiler **83** in Verbindung, der das dritte Leichtrückflußgas zuführt, das vom zweiten Gleichstrom-Blowdown-Druck auf einen ersten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck entspannt worden ist, der größer als der niedrigere Arbeitsdruck ist. Eine zweite Leichtrückflußdruckbeaufschlagungskammer **84** steht mit einem zweiten Leichtrückflußrückführverteiler **85** in Verbindung, der das zweite Leichtrückflußgas zuführt, das vom ersten Gleichstrom-Blowdown-Druck auf einen zweiten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck entspannt worden ist, der größer als der erste Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck ist. Schließlich steht eine dritte Leichtrückflußdruckbeaufschlagungskammer **86** mit einem ersten Leichtrückflußrückführverteiler **87** in Verbindung, der das erste Leichtrückflußgas zuführt, das vom näherungsweise höheren Druck auf einen dritten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck entspannt worden ist, der größer als der zweite Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck ist und in diesem Beispiel geringer als der erste Zufuhrdruckbeaufschlagungsdruck ist.

[0053] Zusätzliche Details sind in [Fig. 4](#) gezeigt. Leitungen **88** verbinden eine erste Kammer **60** mit einem Verteiler **61**, wobei mehrere Leitungen für eine gute axiale Strömungsverteilung in der Kammer **60** sorgen. In ähnlicher Weise verbinden Leitungen **89** eine zweite Kammer **80** mit einem Verteiler **81**. Der Stator **14** weist eine Basis **90** mit Lagern **91** und **92** auf. Der ringförmige Rotor **11** wird auf einer Schlußscheibe **93** gehalten, deren Welle **94** von Lagern **91** und **92** gestützt wird. Ein Motor **95** ist mit der Welle **94** zum Antreiben des Rotors **11** verbunden. Der Rotor könnte alternativ als eine ringförmige Trommel rotieren, die von Rollen an mehreren Winkelpositionen um ihren Rand gestützt und auch an ihrem Rand so angetrieben wird, daß keine Welle erforderlich wäre. Ein Randantrieb könnte durch einen im Rotor angebrachten Zahnkranz oder durch einen linearen Elektromotor bereitgestellt werden, dessen Stator einen Bogen des Randes eingreifen würde. Speziell für Wasserstofftrennanwendungen kann der Rotorantrieb in dem Statorgehäuse hermetisch gekapselt

sein, um Schädigungen bezüglich Dichtungsverlust zu beseitigen. Äußere umlaufende Dichtungen **96** dichten die Enden von äußeren Streifendichtungen **43** und die Kanten der ersten Ventilfläche **21** ab, während innere umlaufende Dichtungen **97** die Enden von inneren Streifendichtungen **44** und die Kanten der zweiten Ventilfläche **23** abdichten. Der Rotor **11** weist einen Zugangsstöpsel **98** zwischen der äußeren Wand **20** und der inneren Wand **22** auf, der für einen Zugang zur Installation und zur Herausnahme des Adsorbens in Adsorbern **24** sorgt.

[Fig. 5](#) und [Fig. 6](#)

[0054] [Fig. 5](#) zeigt einen typischen PSA-Zyklus, der unter Verwendung des vorangehenden Gastrennsystems erhalten würde, während [Fig. 6](#) einen ähnlichen PSA-Zyklus mit Schwerrückflußrekompensation eines Teils des ersten Produktgases zum Liefern eines zweiten Einsatzgases für den Prozeß zeigt.

[0055] In den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) gibt die vertikale Achse **150** den Arbeitsdruck in den Adsorbern und die Drücke in den ersten und zweiten Kammern an. Druckverluste aufgrund von Strömung in den Adsorberelementen sind vernachlässigt. Die höheren und niedrigeren Arbeitsdrücke werden jeweils durch Punktlinien **151** und **152** angegeben. Der niedrigere Arbeitsdruck kann nominell oder näherungsweise umgebender Atmosphärendruck oder ein Unterdruck sein, der durch Vakuumpumpen erzeugt ist. Der höhere Arbeitsdruck kann typischerweise im Bereich vom doppelten bis vierfachen des niedrigeren Arbeitsdrucks, auf der Basis des Verhältnisses von Absolutdrücken sein.

[0056] Die horizontale Achse **155** der [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) gibt die Zeit an, wobei die PSA-Zyklusdauer durch den zeitlichen Abstand zwischen Punkten **156** und **157** definiert ist. Zu den Zeitpunkten **156** und **157** ist der Arbeitsdruck in einem bestimmten Adsorber der Druck **158**. Zum Zeitpunkt **156** startend, beginnt der Zyklus für einen bestimmten Adsorber (z.B. **24**), wenn die erste Öffnung **34** des Adsorbers zur ersten Zufuhrdruckbeaufschlagungskammer **46** geöffnet wird, die vom ersten Beschickungszuführungsmittel **160** beim ersten Zwischenzufuhrdruck **161** gespeist wird. Der Druck in dem Adsorber steigt von Druck **158** zum Zeitpunkt **157** auf den ersten Zwischenzufuhrdruck **161**. Voranschreitend tritt die erste Öffnung über einen Dichtungsstreifen, wobei sie als erstes den Adsorber **24** zur Kammer **46** verschließt und danach diesen zur zweiten Zufuhrdruckbeaufschlagungskammer **50** öffnet, die von einem zweiten Beschickungszuführungsmittel **162** auf dem zweiten Zwischenzufuhrdruck **163** gespeist wird. Der Adsorberdruck steigt auf den zweiten Zwischenzufuhrdruck an.

[0057] Die erste Öffnung **34** des Adsorbers **24** wird

neben der ersten Zufuhrkammer **52** geöffnet, die auf im wesentlichen dem höheren Druck durch ein drittes Beschickungszuführungsmittel **165** gehalten wird. Wenn der Adsorberdruck auf im wesentlichen den höheren Arbeitsdruck angestiegen ist, öffnet sich seine zweite Öffnung **35** (die seit dem Zeitpunkt **156** zu allen zweiten Kammern geschlossen gewesen ist) zur Leichtproduktkammer **70** und führt Leichtprodukt **166** zu.

[0058] In dem Zyklus von [Fig. 6](#) wird die erste Öffnung **34** des Adsorbers **24** neben der zweiten Zufuhrkammer **54** geöffnet, die auch auf im wesentlichen dem höheren Druck durch ein viertes Beschickungszuführungsmittel **166** gehalten wird. Allgemein führt das vierte Beschickungszuführungsmittel ein zweites Einsatzgas zu, das typischerweise reicher an der leichter adsorbierten Komponente als das erste Einsatzgas ist, das von den ersten, zweiten und dritten Beschickungszuführungsmitteln geliefert wird. In dem in [Fig. 6](#) dargestellten speziellen Zyklus ist das vierte Beschickungszuführungsmittel **167** ein „Schwerrückfluß“-Verdichter, der einen Teil des schweres Produkts in die Vorrichtung zurück neu verdichtet. In dem in [Fig. 5](#) dargestellten Zyklus gibt es kein viertes Beschickungszuführungsmittel und könnte die Kammer **54** beseitigt oder mit der Kammer **52** vereinigt werden, die sich über einen größeren Winkelbogen des Stators erstreckt.

[0059] Während Einsatzgas dem ersten Ende des Absorbers **24** von entweder Kammer **52** oder **54** unverändert zugeführt wird, wird das zweite Ende des Adsorbers **24** zur Leichtproduktkammer **74** geschlossen und öffnet es zur ersten Leichtrückflußauslaßkammer **72**, während es „Leichtrückfluß“-Gas (mit der weniger leicht adsorbierten Komponente angereichert, ähnlich wie zweites Produktgas) dem ersten Leichtrückflußdruckablaßmittel (oder Entspanner) **170** zuführt. Die erste Öffnung **34** des Adsorbers **24** wird dann zu allen ersten Kammern geschlossen, während die zweite Öffnung **35** aufeinanderfolgend zur (a) zweiten Leichtrückflußauslaßkammer **24**, den Adsorberdruck auf den ersten Gleichstrom-Blowdown-Druck **171** senkend, während Leichtrückflußgas dem zweiten Leichtrückflußdruckablaßmittel **172** zugeführt wird, (b) dritten Leichtrückflußauslaßkammer **76**, den Adsorberdruck auf den zweiten Gleichstrom-Blowdown-Druck **173** senkend, während Leichtrückflußgas dem dritten Leichtrückflußdruckablaßmittel **174** zugeführt wird, und (c) vierten Leichtrückflußauslaßkammer **78**, den Adsorberdruck auf den dritten Gleichstrom-Blowdown-Druck **175** senkend, während Leichtrückflußgas dem vierten Leichtrückflußdruckablaßmittel **176** zugeführt wird, geöffnet wird. Die zweite Öffnung **35** wird dann für ein Intervall geschlossen, bis sich die Leichtrückflußrückfuhrschriffe den Gegenstrom-Blowdown-Schritten anschließen.

[0060] Die Leichtrückflußdruckablaßmittel können mechanische Entspanner oder Entspannungsstufen für Entspannungsenergieerückgewinnung sein oder können Drosselöffnungen oder Drosselventile für irreversiblen Druckablaß sein.

[0061] Entweder wenn die zweite Öffnung nach dem letzten Leichtrückflußauslaßschritt (wie in [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) gezeigt) geschlossen wird oder vorher, während die Leichtrückflußauslaßschritte unverändert im Gange sind, wird die erste Öffnung **34** zur ersten Gegenstrom-Blowdown-Kammer **56** geöffnet, den Adsorberdruck auf den ersten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck **180** senkend, während „schweres“ Gas (mit der stärker adsorbierten Komponente angereichert) zum ersten Abgabemittel **181** freigegeben wird. Danach wird die erste Öffnung **34** zur zweiten Gegenstrom-Blowdown-Kammer **58** geöffnet, den Adsorberdruck auf den ersten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck **182** senkend, während schweres Gas zum zweiten Abgabemittel **183** freigegeben wird. Schließlich wird bei Erreichen des niedrigeren Arbeitsdrucks die erste Apertur **34** zur Schwerproduktkammer **60** geöffnet, den Adsorberdruck auf den niedrigeren Druck **152** senkend, während schweres Gas zum dritten Abgabemittel **184** freigegeben wird. Wenn der Adsorberdruck den niedrigeren Druck im wesentlichen erreicht hat, während die erste Öffnung **34** zur Kammer **60** offen ist, öffnet die zweite Öffnung **35** zur Reinigungskammer **80**, die viertes leichtes Rückflußgas vom vierten Leichtrückflußdruckablaßmittel **176** aufnimmt, um mehr schweres Gas in die erste Produktkammer **60** zu verschieben.

[0062] In [Fig. 5](#) wird das schwere Gas von den ersten, zweiten und dritten Abgabemitteln als das schwere Produkt **185** zugeführt. In [Fig. 6](#) wird dieses Gas als das schwere Produkt **185** teilweise freigesetzt, während das Gleichgewicht als „schwerer Rückfluß“ **187** zum Schwerrückflußverdichter als viertes Beschickungszuführungsmittel **167** umgelenkt wird. Genau wie leichter Rückfluß eine Annäherung an hohe Reinheit der weniger leicht adsorbierten („leichten“) Komponente in dem leichten Produkt ermöglicht, ermöglicht schwerer Rückfluß eine Annäherung an hohe Reinheit der leichter adsorbierten („schweren“) Komponente in dem schweren Produkt, so daß eine hohe Rückgewinnung des weniger leicht adsorbierten („leichten“) Produkts erzielt werden kann.

[0063] Der Adsorber wird danach erneut durch leichtes Rückflußgas mit Druck beaufschlagt, nachdem die ersten und zweiten Öffnungen zu den Kammern **60** und **80** schließen. Während die erste Öffnung **34** zumindest zu Beginn geschlossen bleibt, wird in Abfolge (a) die zweite Öffnung **35** zur ersten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungskammer **82** geöffnet, um den Adsorberdruck auf den ersten Leicht-

rückflußdruckbeaufschlagungsdruck **190** anzuheben, während drittes leichtes Rückflußgas vom dritten Leichtrückflußdruckablaßmittel **174** aufgenommen wird, (b) die zweite Öffnung **35** zur zweiten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungskammer **84** geöffnet, um den Adsorberdruck auf den zweiten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **191** anzuheben, während zweites leichtes Rückflußgas vom zweiten Leichtrückflußdruckablaßmittel **172** aufgenommen wird, und (c) die zweite Öffnung **35** zur dritten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungskammer **86** geöffnet, um den Adsorberdruck auf den dritten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **192** zu heben, während das erste leichte Rückflußgas vom ersten Leichtrückflußdruckablaßmittel **170** aufgenommen wird. Sofern nicht die Zufuhrdruckbeaufschlagung bereits gestartet worden ist, während unverändert Leichtrückflußrückführung für Leichtrückflußdruckbeaufschlagung durchgeführt wird, beginnt der Prozeß (basierend auf den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#)) mit Zufuhrdruckbeaufschlagung für den nächsten Zyklus nach dem Zeitpunkt **157**, sobald der dritte Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsschritt beendet worden ist.

[0064] Die Druckänderungskurvenform in jedem Adsorber würde eine rechteckige Treppe sein, wenn keine Drosselung in den ersten und zweiten Ventilen erfolgen würde. Genannte Drosselung wird benötigt, um Druck- und Strömungsübergänge zu glätten. Zum Liefern einer ausgeglichenen Leistung sind vorzugsweise alle Adsorberelemente und die Öffnungen nahezu identisch miteinander.

[0065] Die Druckänderungsrate in jedem Druckbeaufschlagungs- oder Blowdown-Schritt wird durch Drosselung in Öffnungen (oder in Spielraum oder Labyrinthdichtungslücken) der ersten und zweiten Ventilmittel oder durch Drosselung in den Öffnungen der ersten und zweiten Enden der Adsorber begrenzt, die zu einer typischen Druckkurvenform führen, die in den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) dargestellt ist. Alternativ können die Öffnungen von den Dichtungstreifen langsam geöffnet werden, um für Strömungsbegrenzungs-drosselung zwischen den Öffnungen und den Dichtungstreifen zu sorgen, die schmale verjüngte Spielraumkanäle aufweisen können, so daß die Öffnungen nur für Vollströmung graduell geöffnet werden. Übermäßig schnelle Druckänderungsraten würden den Adsorber einer mechanischen Spannung aussetzen, während sie auch Strömungsübergänge verursachen, die dazu neigen würden, axiale Streuung der Konzentrationswellenfront im Adsorber zu erhöhen. Pulsationen von Strömung und Druck werden minimiert, indem mehrere Adsorber simultan jeden Schritt des Zyklus durchlaufen und indem genug Volumen in den Funktionskammern und zugehörigen Verteilern bereitgestellt wird, so daß sie als Ausgleichsadsorber zwischen der Verdichtungsanlage und der ersten und zweiten Ventilmitteln effektiv wirken.

[0066] Es wird ersichtlich sein, daß der Zyklus in vielen Varianten verallgemeinert werden könnte, daß er mehr oder weniger Zwischenstufen in jedem Hauptschritt der Zufuhrdruckbeaufschlagung, Gegenstrom-Blowdown-Abgabe oder leichtem Rückfluß aufweist. Falls gewünscht, können kombinierte Zufuhr- und Produktdruckbeaufschlagungsschritte (oder kombinierte Gleichstrom- oder Gegenstrom-Blowdown-Schritte) bei Zwischendrücken von sowohl ersten als auch zweiten Ventilen simultan durchgeführt werden. Der Druck, bei dem Zufuhrdruckbeaufschlagung beginnt, kann sich vom Druck unterscheiden, bei dem Gegenstrom-Blowdown beginnt. Ferner könnte bei Lufttrenn- oder Luftreinigungsanwendungen eine Stufe der Zufuhrdruckbeaufschlagung (typischerweise die erste Stufe) durch Ausgleichen mit Atmosphäre als einem Zwischen-druck des Zyklus durchgeführt werden. In ähnlicher Weise könnte eine Stufe von Gegenstrom-Blowdown durch Ausgleich mit Atmosphäre als einem Zwischendruck des Zyklus durchgeführt werden.

[Fig. 7](#)

[0067] [Fig. 7](#) zeigt eine vereinfachte Schematik eines PSA-Systems zur Trennung von Sauerstoff von Luft unter Verwendung von stickstoffselektiven Zeolith-Adsorbentien. Das leichte Produkt ist konzentrierter Sauerstoff, während das schwere Produkt mit Stickstoff angereicherte Luft ist, die gewöhnlich als Abgas abgelassen wird. Der niedrigere Druck **152** des Zyklus ist als nomineller Atmosphärendruck dargestellt, obwohl ein Vakuumdruck **152** verwendet werden könnte, wie dies in [Fig. 8](#) dargestellt wird. Einsatzluft wird durch Filtereinlaß **200** in einen Zufuhrverdichter **201** eingeleitet. Der Zufuhrverdichter enthält eine erste Verdichterstufe **202**, einen Zwischenkühler **203**, eine zweite Verdichterstufe **204**, einen zweiten Zwischenkühler **205**, eine dritte Verdichterstufe **206**, einen dritten Zwischenkühler **207** und eine vierte Verdichterstufe **208**. Der beschriebene Zufuhrverdichter **201** kann ein Vierstufen-Axialverdichter mit einem Motor **209** als durch eine Welle **210** gekoppelte Antriebsmaschine sein. Die Zwischenkühler sind optional. Unter Bezugnahme auf [Fig. 5](#) sind die ersten und zweiten Stufen des Zufuhrverdichters die ersten Beschickungszuführungsmittel **160**, die Einsatzgas dem ersten Zufuhrdruckbeaufschlagungsverteiler **48** bei dem ersten Zwischen-zufuhrdruck **161** über eine Leitung **212** und einen Wasserkondensatabscheider **213** zuführen. Die dritte Stufe **206** des Zufuhrverdichters ist das zweite Beschickungszuführungsmittel **162**, das Einsatzgas dem zweiten Zufuhrdruckbeaufschlagungsverteiler **51** bei dem zweiten Zwischen-zufuhrdruck **163** über Leitung **216** und Wasserkondensatabscheider **215** zuführt. Die vierte Stufe **208** des Zufuhrverdichters ist das dritte Beschickungszuführungsmittel **165**, das Einsatzgas dem Zufuhrverteiler **53** bei dem höheren Druck **151** über Leitung **216** und Wasserkondensat-

abscheider **217** zuführt. Die Leichtproduktsauerstoffströmung wird vom Leichtproduktverteiler **170** durch Leitung **218** zugeführt, auf im wesentlichen dem höheren Druck minus Reibungsdruckverlusten gehalten.

[0068] Das PSA-System von [Fig. 7](#) enthält Energierückgewinnungsentspanner, die einen Leichtrückflußentspanner **220** (hier vier Stufen enthaltend) und einen Gegenstrom-Blowdown-Entspanner **221** (hier zwei Stufen enthaltend) enthalten, die mit dem Zufuhrentspanner **201** durch die Welle **222** verbunden sind. Die Entspannerstufen können zum Beispiel als Turbinenstufen mit radialer Einstromung, als Axialturbinenstufen mit voller Beaufschlagung mit separaten Rädern oder als Impulsturbinenstufen mit Teilbeaufschlagung in Kombination mit einem einzigen Rad vorgesehen sein.

[0069] Leichtes Rückflußgas vom ersten Leichtrückflußauslaßverteiler **73** strömt bei dem höheren Druck über die Leitung **224** und eine Heizvorrichtung **225** zum ersten Leichtdruckablaßmittel **170**, das hier eine erste Leichtrückflußentspannerstufe **226** ist, und strömt danach bei dem dritten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **192** durch Leitung **227** zum ersten Leichtrückflußrückführverteiler **87**. Leichtes Rückflußgas vom zweiten Leichtrückflußauslaßverteiler **75** strömt bei dem ersten Gleichstrom-Blowdown-Druck **171** über die Leitung **228** und die Heizvorrichtung **225** zum zweiten Leichtrückflußdruckablaßmittel **171**, hier die zweite Entspannerstufe **230**, und strömt dann bei dem zweiten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **191** durch die Leitung **231** zum zweiten Leichtrückflußrückführverteiler **85**. Leichtes Rückflußgas vom dritten Leichtrückflußauslaßverteiler **77** strömt bei dem zweiten Gleichstrom-Blowdown-Druck **173** über die Leitung **232** und die Heizvorrichtung **225** zum dritten Leichtrückflußdruckablaßmittel **174**, hier die dritte Entspannerstufe **234**, und strömt danach bei dem ersten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **190** durch Leitung **235** zum dritten Leichtrückflußrückführverteiler **83**. Schließlich strömt Leichtrückflußgas vom vierten Leichtrückflußauslaßverteiler **79** bei dem dritten Gleichstrom-Blowdown-Druck **175** über die Leitung **236** und die Heizvorrichtung **225** zum vierten Leichtrückflußdruckablaßmittel **176**, hier die vierte Leichtrückflußentspannerstufe **238**, und dann bei im wesentlichen dem niedrigen Druck **152** durch Leitung **239** zum vierten Leichtrückflußrückführverteiler **81**.

[0070] Schweres Gegenstrom-Blowdown-Gas aus dem ersten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **57** strömt bei einem ersten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck **180** durch Leitung **240** zur Heizvorrichtung **241** und von dort zu einer ersten Stufe **242** des Gegenstrom-Blowdown-Entspanners **221** als erstes Abgabemittel **181** und wird vom Entspanner zum Abgabeverteiler **243** bei im wesentlichen dem niedrige-

ren Druck **152** abgegeben. Gegenstrom-Blowdown-Gas vom zweiten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **59** strömt beim zweiten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck **182** durch Leitung **244** zur Heizvorrichtung **241** und von dort zu einer zweiten Stufe **245** des Gegenstrom-Blowdown-Entspanners **221** als zweites Abgabemittel **183** und wird vom Entspanner zum Abgabeverteiler **243** bei im wesentlichen dem niedrigen Druck **152** abgelassen. Schließlich strömt schweres Gas aus dem Schwerproduktabgabeverteiler **61** durch Leitung **246** als drittes Abgabemittel **184** zum Abgabeverteiler **243**, der das abzulassende schwere Produktgas **185** bei im wesentlichen dem niedrigen Druck **152** abgibt.

[0071] Optionale Heizvorrichtungen **225** und **241** heben die Temperaturen von in die Entspanner **220** und **221** eintretenden Gasen an, wodurch somit die Rückgewinnung von Entspannungsenergie gesteigert wird und die von der Welle **222** von den Entspannern **220** und **221** auf den Zufuhrverdichter **201** übertragene Kraft erhöht wird und die von der Antriebsmaschine **209** verlangte Leistung reduziert wird. Während die Heizvorrichtungen **225** und **241** Mittel sind, um die Entspanner mit Wärme zu versorgen, sind die Zwischenkühler **203**, **205** und **207** Mittel, um Wärme vom Zufuhrverdichter zu entfernen, und dienen zum Reduzieren der erforderlichen Leistung der höheren Verdichterstufen. Die Zwischenkühler **203**, **205** und **207** stellen optionale Einrichtungen dar.

[0072] Wenn eine Leichtrückflußheizvorrichtung **249** bei einer ausreichend hohen Temperatur in Betrieb ist, so daß die Auslaßtemperatur der Leichtrückflußentspannungsstufen höher als die Temperatur ist, bei der Einsatzgas den Zufuhrverteilern durch Leitungen **212**, **214** und **216** zugeführt wird, kann die Temperatur der zweiten Enden **35** der Adsorber **24** höher als die Temperatur von deren ersten Enden **34** sein. Somit weisen die Adsorber einen Temperaturgradienten entlang des Strömungswegs auf, wobei die höhere Temperatur an deren zweiten Ende bezüglich des ersten Endes vorliegt. Dies stellt eine Erweiterung des Prinzips von „thermisch gekoppelter Druckwechseladsorption“ (thermally coupled pressure swing adsorption (TCPISA)) dar, die von Keefer im US-Patent Nr. 4,702,903 eingeführt wurde. Der Adsorberrotor **11** wirkt dann als ein thermischer Rotationsregenerator, wie in regenerativen Gasturbomotoren mit einem Verdichter **201** und einem Entspanner **220**. Die dem PSA-Prozeß durch die Heizvorrichtung **225** zur Verfügung gestellte Wärme hilft dabei, den Prozeß gemäß einem regenerativen thermodynamischen Arbeitszyklus anzutreiben, ähnlich wie weiterentwickelte regenerative Gasturbinenmotoren, die näherungsweise den Ericsson-Thermodynamikzyklus mit Zwischenkühlen auf der Verdichterseite und Zwischenerwärmen auf der Entspannungsseite realisieren. In dem Fall des Anwendens von PSA beim Sauerstofftrennen von Luft ist der gesamte Leicht-

rückflußdurchfluß viel geringer als der Zufuhrdurchfluß aufgrund der starken Massenadsorption von Stickstoff. Dementsprechend ist die aus den Entspannern wiedergewinnbare Energie viel geringer als die von dem Verdichter benötigte Energie, aber wird sie unverändert zum verbesserten Wirkungsgrad der Sauerstoffproduktion wesentlich beitragen.

[0073] Wenn ein hoher Energiewirkungsgrad nicht die höchste Wichtigkeit besitzt, können die Leicht-rückflußentspannerstufen und die Gegenstrom-Blowdown-Entspannerstufen durch Drosselöffnungen oder Drosselventile zum Ablassen von Druck ersetzt werden. Das Schemadiagramm von [Fig. 7](#) zeigt eine einzige Welle, die die Verdichterstufen, die Gegenstrom-Blowdown- oder für Entspannerstufen und die Leichtrückflußstufen unterhält sowie den Verdichter mit dem Antriebsaggregat verbindet. Es sollte jedoch verständlich sein, daß separate Wellen und sogar separate Antriebsmaschinen für die verschiedenen Verdichtungs- und Entspannungsstufen innerhalb des Schutzbereiches der vorliegenden Erfindung verwendet werden können.

[Fig. 8](#)

[0074] [Fig. 8](#) zeigt ein Vakuum-PSA-System, wobei auch ein Schwerprodukt rückfluß verwendet werden könnte, um hohe Rückgewinnung bei Wasserstoffreinigung für ein Brennstoffzellenantriebssystem zu erzielen. Der Rohwasserstoff kann in bestimmten stationären Anwendungen aus chemischen Prozessen oder Erdölraffinerieabgasen bereitgestellt werden. In den meisten Brennstoffzellenanwendungen wird jedoch die Rohwasserstoffgaszufuhr durch Verarbeiten eines Kohlenwasserstoff- oder kohlenstoffhaltigen Brennstoffs, zum Beispiel durch Dampfreformieren von Erdgas oder durch autothermes Reformieren oder Teiloxidation von flüssigen Brennstoffen bereitgestellt werden. Derartige Wasserstoffzufuhr gases enthalten typischerweise 30% bis 74% Wasserstoff. Bei Verwendung von typischen Adsorbentien, wie zum Beispiel Zeolith, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, werden Stickstoff und Wasserstoffsulfid oder andere Spurenverunreinigungen viel leichter als Wasserstoff adsorbiert werden, so daß der gereinigte Wasserstoff das leichte Produkt sein wird, das bei dem höheren Arbeitsdruck zugeführt wird, der nur etwas geringer als der Beschickungszuführungsdruck sein kann, während sich die Verunreinigungen als das schwere Produkt konzentrieren und aus dem PSA-Prozeß als „PSA tail gas“ bei dem niedrigen Arbeitsdruck abgegeben werden. Dieses Abgas (Tail gas) wird als Brenngas für die Brennstoffverarbeitungsreaktionen zum Erzeugen von Wasserstoff oder anderenfalls für eine Verbrennungsturbine zum Antreiben der PSA-Verdichtungsanlage für das Brennstoffzellenantriebssystem verwendet werden.

[0075] Das PSA-System von [Fig. 8](#) weist eine Zu-

führungsleitung **300** zum Einleiten des Einsatzgases bei im wesentlichen dem höheren Druck zum ersten Zufuhrverteiler **53** auf. In diesem Beispiel werden alle mit Ausnahme der letzten Druckbeaufschlagungsschritte mit leichtem Rückflußgas erzielt, wobei der letzte Zufuhrdruckbeaufschlagungsschritt durch Verteiler **55** erzielt wird.

[0076] Das PSA-System enthält eine Mehrstufenvakuumpumpe **301**, die von einer Antriebsmaschine **209** durch eine Welle **210** und optional durch einen Leichtrückflußentspanner **220** durch eine Welle **309** angetrieben wird. Die Vakuumpumpe **301** enthält eine erste Stufe **302**, die schweres Gas durch Leitung **246** aus dem ersten Produktabgabeverteiler **61** saugt und dieses Gas durch den Zwischenkühler **203** zu einer zweiten Stufe **304** verdichtet. Die zweite **304** der Vakuumpumpe saugt schweres Gas aus dem zweiten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **59** durch Leitung **244** und gibt dieses Gas durch Zwischenkühler **305** an eine dritte Stufe **306**, die auch schweres Gas aus dem ersten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **57** durch Leitung **240** saugt. Die Stufe **306** der Vakuumpumpe verdichtet das schwere Gas auf einen Druck ausreichend oberhalb Umgebungsdruck für einen Teil dieses Gases (schweres Produktgas oder PSA-Abgas), das zur Verwendung als Brenngas in der Schwerproduktzuführungsleitung **307** zuzuführen ist. Das verbleibende schwere Gas schreitet von der Vakuumpumpe **301** zum Schwerrückflußverdichter **308** voran, der im wesentlichen den höheren Arbeitsdruck des PSA-Zyklus erreicht.

[0077] Das verdichtete schwere Gas wird von der vierten Stufe **308** des Verdichters durch Leitung **310** zum Kondensatabscheider **311** gefördert. Falls gewünscht (wie für Verbrennung in einer Expansionsturbine wie in der Ausführungsform von [Fig. 13](#)) könnte der gesamte Schwerproduktstrom durch Verdichter **308** verdichtet werden, so daß das Schwerproduktbrenngas bei dem höchsten Arbeitsdruck durch die alternative Schwerproduktzuführungsleitung **312** zugeführt werden kann, die extern auf im wesentlichen dem höheren Druck minus Reibungsdruckverluste gehalten wird. Kondensierte Dämpfe (wie zum Beispiel Wasser) werden durch die Leitung **313** auf im wesentlichen demselben Druck wie das Schwerprodukt in der Leitung **312** entfernt. Der verbleibende Schwergasstrom strömt nach Entfernen des ersten Produktgases durch Leitung **314** zum zweiten Zufuhrverteiler **55** als schwerer Rückfluß zu den Adsorbern im Anschluß an den Zufuhrschritt für jeden Adsorber. Das schwere Rückflußgas ist ein zweites Einsatzgas mit höherer Konzentration an der leichter adsorbierten Komponente oder Fraktion als das erste Einsatzgas.

[Fig. 9](#) und [Fig. 10](#)

[0078] Nunmehr den [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) zuwen-

dend, sind Stromerzeugungssysteme auf der Basis einer Brennstoffzelle gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Verwendung eines Rotations-PSA-Systems ähnlich wie das in [Fig. 7](#) gezeigte als der grundlegende Baustein gezeigt. Es versteht sich jedoch, daß die Erfindung nicht auf Stromerzeugungssysteme mit Rotations-PSA-Modulen begrenzt ist. Stattdessen können andere Anordnungen verwendet werden, ohne aus dem Schutzbereich der Erfindung zu gelangen.

[0079] In [Fig. 9](#) trennt das PSA-System Sauerstoff von Luft unter Verwendung von stickstoffselektiven Zeolith-Adsorbentien, wie vorangehend beschrieben. Das leichte Produkt ist konzentrierter Sauerstoff, während das schwere Produkt mit Stickstoff angereicherte Luft ist, die gewöhnlich als Abgas abgelassen wird. Der niedrigere Druck **152** des Zyklus ist normalerweise Atmosphärendruck, wenn nicht eine optionale Vakuumpumpe wie in [Fig. 8](#) vorgesehen ist. Einsatzluft wird durch einen Filtereinlaß **200** in einen Zufuhrverdichter **201** eingeleitet. Der Zufuhrverdichter enthält eine erste Verdichterstufe **202**, zweite Verdichterstufe **204**, dritte Verdichterstufe **206** und vierte Verdichterstufe **208**. Wie beschrieben, kann der Zufuhrverdichter **201** ein Vierstufenaxialverdichter mit Motor **209** als durch eine Welle **210** verbundene Antriebsmaschine sein. Die Verdichterstufen können, wie gezeigt, in Reihe oder alternativ parallel vorliegen. Zwischenkühler zwischen Verdichterstufen sind optional. Die ersten und zweiten Zufuhrverdichterstufen führen Einsatzgas bei dem ersten Zwischenzufuhrdruck **161** über Leitung **212** und Wasserkondensatabscheider **213** einem ersten Zufuhrdruckbeaufschlagungsverteiler **48** zu. Die dritte Zufuhrverdichterstufe **206** führt Einsatzgas bei dem zweiten Zwischenzufuhrdruck **163** über Leitung **214** und Wasserkondensatabscheider **215** dem zweiten Zufuhrdruckbeaufschlagungsverteiler **51** zu. Die vierte Zufuhrverdichterstufe **208** führt Einsatzgas bei dem höheren Druck **151** über Leitung **216** und Wasserkondensatabscheider **217** dem Zufuhrverteiler **53** zu. Leichtproduktsauerstoffströmung wird vom Leichtproduktverteiler **71** durch Leitung **218** zugeführt, auf im wesentlichen dem höheren Druck minus Reibungsverlusten gehalten.

[0080] Die Vorrichtung von [Fig. 9](#) enthält Energierückgewinnungsentspanner, die Leichtrückflußentspanner **220** (hier vier Stufen enthaltend) und Gegenstrom-Blowdown-Entspanner **221** (hier zwei Stufen enthaltend) enthalten. Der Entspanner **221** ist mit dem Zufuhrverdichter **201** durch eine Welle **222** verbunden. Die Entspannerstufen können zum Beispiel als Radialeinströmturbinenstufen, als Axialturbinenstufen mit voller Beaufschlagung und mit separaten Rädern oder als Turbinenstufen mit Teilbeaufschlagung, kombiniert in einem einzigen Rad, vorgesehen sein. Wenn hoher Energiewirkungsgrad nicht die höchste Bedeutung aufweist, könnten die Leichtrück-

flußentspannerstufen und/oder die Gegenstrom-Blowdown-Entspannerstufen durch Drosselöffnungen oder Drosselventile für Druckablaß ersetzt werden.

[0081] Leichtes Rückflußgas aus dem ersten Leichtrückflußauslaßverteiler **73** strömt bei dem höheren Druck über Leitung **224** und Heizvorrichtung **225** zur ersten Leichtrückflußentspannerstufe **226** und strömt danach bei dem dritten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **192** durch Leitung **227** zum ersten Leichtrückflußrückführverteiler **87**. Leichtes Rückflußgas vom zweiten Leichtrückflußauslaßverteiler **75** strömt bei dem ersten Gleichstrom-Blowdown-Druck **171** über Leitung **228** und Heizvorrichtung **225** zur zweiten Entspannerstufe **230** und danach bei dem zweiten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **191** durch Leitung **231** zum zweiten Leichtrückflußrückführverteiler **85**. Leichtes Rückflußgas vom dritten Leichtrückflußauslaßverteiler **77** strömt bei dem zweiten Gleichstrom-Blowdown-Druck **173** über Leitung **232** und Heizvorrichtung **225** zur dritten Entspannerstufe **234** und strömt dann bei dem ersten Leichtrückflußdruckbeaufschlagungsdruck **190** durch Leitung **235** zum dritten Leichtrückflußrückführverteiler **83**. Schließlich strömt leichtes Rückflußgas aus dem vierten Leichtrückflußauslaßverteiler **79** bei dem dritten Gleichstrom-Blowdown-Druck **175** über Leitung **236** und Heizvorrichtung **225** zur vierten Leichtrückflußentspannerstufe **238** und strömt danach bei im wesentlichen dem niedrigen Druck **251** durch Leitung **239** zum vierten Leichtrückflußrückführverteiler **81**.

[0082] Schweres Gegenstrom-Blowdown-Gas vom ersten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **57** strömt beim ersten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck **180** durch Leitung **240** zur Heizvorrichtung **241** und von dort zur ersten Stufe **242** des Gegenstrom-Blowdown-Entspanners **221** und wird vom Entspanner zum Abgabeverteiler **243** bei im wesentlichen dem niedrigeren Druck **251** abgegeben. Gegenstrom-Blowdown-Gas vom zweiten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **59** strömt beim zweiten Gegenstrom-Blowdown-Zwischendruck **182** durch Leitung **244** zur Heizvorrichtung **241** und von dort zur zweiten Stufe **245** des Gegenstrom-Blowdown-Entspanners **221** und wird aus dem Entspanner zum Abgabeverteiler **243** bei im wesentlichen dem niedrigen Druck **152** abgelassen. Schließlich strömt schweres Gas aus dem Schwerproduktabgabeverteiler **61** durch Leitung **246** zu Abführverteiler **243**, der das abzulassende schwere Produktgas **185** bei im wesentlichen dem niedrigen Druck **152** abläßt.

[0083] Optionale Heizvorrichtungen **225** und **241** heben die Temperaturen von in die Entspanner **220** und **221** eintretenden Gasen an, wodurch somit die Rückgewinnung von Entspannungsenergie gesteigert und die von der Welle **222** von den Entspannern

220 und **221** auf den Zufuhrverdichter **201** übertragene Kraft erhöht und die von der Antriebsmaschine **209** verlangte Leistung reduziert wird.

[0084] Im Falle des Anwendens von PSA auf Sauerstofftrennung von Luft ist der gesamte Leichtrückflußdurchfluß viel geringer als der Zufuhrdurchfluß aufgrund der starken Massenadsorption von Stickstoff. Dementsprechend ist die von den Entspannern wiedergewinnbare Energie viel geringer als die von dem Verdichter verlangte Energie, aber wird sie unverändert zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Sauerstoffproduktion wesentlich beitragen. Durch Betreiben der Adsorber bei mäßig erhöhter Temperatur (z.B. 40° bis 60°C) und Verwendung von stark stickstoffselektiven Adsorbentien, wie zum Beispiel Ca-X, Li-X oder Lithiumchabasit-Zeolithen kann das PSA-Sauerstofferzeugungssystem mit günstiger Leistung und Wirkungsgrad arbeiten. Durch Kalzium-oder-Strontiumausgetauschtes Chabasit kann bei höheren Temperaturen, sogar von mehr als 100°C, verwendet werden, was die außergewöhnliche Kapazität dieser Adsorbentien hinsichtlich Stickstoff reflektiert, wobei deren Stickstoffaufnahme zu nahe bei Sättigung bei niedrigen Temperaturen nahe Umgebung für einen zufriedenstellenden Betrieb liegen.

[0085] Während eine höhere Temperatur des Adsorbens die Stickstoffaufnahme und -selektivität für jedes Zeolithadsorbens reduzieren wird, werden die Isothermen linearer sein und wird Feuchtigkeitsabweisung leichter sein: Beim Arbeiten mit Adsorbentien, wie zum Beispiel Ca-X und Li-X ist die neueste herkömmliche Praxis so gewesen, daß Umgebungstemperatur-PSA bei subatmosphärischen niedrigen Drücken bei sogenannter „Vakuumwechseladsorption“ (vacuum swing adsorption (VSA)) betrieben wurde, so daß die hochselektiven Adsorbentien ausreichend unterhalb von Sättigung bei der Stickstoffaufnahme arbeiten und eine große Arbeitskapazität in einem relativ linearen isothermen Bereich aufweisen. Bei höheren Temperaturen wird die Sättigung der Stickstoffaufnahme zu höheren Drücken verschoben, so daß die optimalen höheren und niedrigeren Drücke des PSA-Zyklus auch nach oben verschoben werden.

[0086] Das mit Sauerstoff angereicherte Produktgas wird durch Leitung **218**, Rückschlagventil **250** und Leitung **251** dem Einlaß des Sauerstoffproduktverdichters **252** zugeführt, der den Druck vom Produktsauerstoff, der von der Leitung **253** zugeführt wird, verstärkt. Der Verdichter **252** kann ein Einstufenzentrifugalverdichter sein, der durch eine Welle **254** durch den Leichtrückflußentspanner **220** oder alternativ durch einen Motor direkt angetrieben wird. Der Leichtrückflußentspanner **220** kann die einzige Antriebsquelle für den Verdichter **252** sein, wobei in dem Fall Entspanner **220** und der Verdichter **252** zu-

sammen einen Turbobooster **255** mit freiem Rotor bilden. Da das Arbeitsfluid in sowohl dem Entspanner **220** als auch dem Verdichter **252** angereicherter Sauerstoff ist, weist die Ausführungsform mit Turbobooster mit freiem Rotor das wichtige Sicherheitsmerkmal auf, daß sie keine Wellendichtung zu einem externen Motor erfordert. Vorzugsweise wird die Energierückgewinnung von der Leichtrückflußentspannung dazu verwendet, den Lieferdrucks des leichten Produkts, hier Sauerstoff, zu erhöhen.

[0087] Der verdichtete angereicherte Sauerstoff wird einer Brennstoffzelle **260** durch Leitung **253** zum Kathodeneinlaß **261** des Brennstoffzellenkathodenkanals **262** zugeführt. Die Brennstoffzelle **260** kann eine Polymerelektrolytmembran (polymer electrolyte membrane (PEM)) sein, wobei das Elektrolyt **265** den Kathodenkanal **262** vom Anodenkanal **266** trennt. Wasserstoffbrennstoff wird dem Anodeneinlaß **267** des Anodenkanals **266** durch die Wasserstoffzufuhrleitung **268** zugeführt.

[0088] Der angereicherte Sauerstoff tritt durch den Kathodenkanal **262** zum Kathodenauslaß **270**, wenn eine Fraktion des Sauerstoffs mit Wasserstoffionen reagiert, die die Membran durchqueren, um elektrischen Strom zu erzeugen und zur Bildung des Nebenprodukts Wasser reagieren. Das Kathodenauslaßgas, das den Kathodenkanal in Leitung **280** vom Kathodenauslaß **270** (in dieser bevorzugten Ausführungsform) verläßt, ist weiterhin mit Sauerstoff bezüglich der Umgebungsluftkonzentration von näherungsweise 21% erheblich angereichert. Ein kleinerer Teil dieses Gases wird als Kathodenreinigungsgas aus der Leitung **280** durch Entleerventil **285** und Entleerabgabe **286** gereinigt und das Gleichgewicht des Kathodenauslaßgases wird als Kathodenrückführgas aufrechterhalten. Das Kathodenrückführgas wird durch Leitung **281** zum Wasserkondensatabscheider **282** befördert, wo überschüssiges flüssiges Wasser aus dem Kathodenauslaßgas entfernt wird, das in Wasserdampf gesättigt bleibt. Das feuchte Kathodenrückführgas wird danach mit einkommendem angereichertem Sauerstoff aus dem PSA-System durch Leitung **283**, die mit der Leitung **251** in Verbindung steht, gemischt.

[0089] Die Leitungen **251**, **253**, **280**, **281** und **283** bilden somit einen Kathodenkreislauf mit Kathodenkanal **262**, Verdichter **252** und Wasserkondensatabscheider **282**. Ein Wärmetauscher **225** kann das mit Sauerstoff angereicherte Gas, das vom Verdichter **252** verdichtet werden soll, durch Entfernen von Abwärme aus dem Brennstoffzellenkathodenkreislauf zum Erwärmen von leichtem Rückflußgas vor Entspannung im Entspanner **220** kühlen. Es wird genügend Kathodenauslaßgas durch Entleerventil **285** gereinigt, um einen übermäßigen Aufbau von Argon- und Stickstoffverunreinigungen im Kathodenkreislauf zu vermeiden. In einem praktizierbaren Beispiel kann

die Produktsauerstoffkonzentration in Leitung **280** 90% Sauerstoff mit gleichen Mengen von Argon- und Stickstoffverunreinigungen betragen. Mit einer geringen Spülströmung können Sauerstoffkonzentrationen am Kathodeneinlaß **261** und am Kathodenauslaß **270** jeweils 60% und 50% betragen.

[0090] Wie oben erörtert, kann eine PEM-Brennstoffzelle, die mit atmosphärischer Luft als Oxidationsmittel arbeitet, typischerweise Luftverdichtung auf wenigstens drei Atmosphären fordern, um einen ausreichend hohen Sauerstoffpartialdruck über der Kathode für wettbewerbsfähige Stromdichte in dem Brennstoffzellenstapel zu erzielen. Die Sauerstoffkonzentration am Kathodeneinlaß würde 21% und am Kathodenauslaß typischerweise nur ungefähr 10% Sauerstoff betragen. Die vorliegende Erfindung kann eine viel höhere mittlere Sauerstoffkonzentration über dem Brennstoffkathodenkanal, z.B. 55% im Vergleich zu näherungsweise 15%, erzielen. Somit kann der Arbeitsdruck auf ungefähr 1,5 Atmosphären reduziert werden, während weiterhin eine wesentliche Verbesserung des Sauerstoffpartialdrucks über der Kathode beibehalten wird. Mit einem höheren Sauerstoffpartialdruck über der Kathode können die Brennstoffzellenstapelleistungsdichte und der Wirkungsgrad verbessert werden, was besonders entscheidend bei Anwendungen bei Antriebssystemen für Automobile ist. Eine mechanische Verdichtungskraft, die von der Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung verlangt wird (unter Verwendung von Hochleistungsadsorbenzien, wie zum Beispiel Li-X) wird geringer als diejenige sein, die für einen Luftverdichter eines PEM-Brennstoffzellensystems erforderlich ist, das bei einem Luftzufuhrdruck von 3 Atmosphären arbeitet, was den Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems weiter verbessern wird.

[0091] Ein wichtiger Vorteil in dieser beispielhaften Vorrichtung besteht darin, daß das mit Sauerstoff angereicherte Gas, das in den Kathodeneinlaß **261** eintritt, durch Mischen mit dem viel stärkeren Strom von gesättigtem Kathodenrückführgas befeuchtet wird. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die Energierückgewinnung aus der PSA-Einheit zum Verstärken des Drucks und zum Antreiben des Rückführkreislaufes in der Kathodenschleife verwendet werden kann, während Brennstoffzellenabwärme bei Wärmetauschern **225** und **241** verwendet werden kann, um Spannungsenergieerückgewinnung in der PSA-Einheit zu steigern. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß geeignete Kathodenkanalkreislaufströmungsgeschwindigkeiten zur Sicherstellung von zufriedenstellender Wasserentfernung aus PEM-Brennstoffzellen leicht erzielt werden.

[0092] Der [Fig. 10](#) zuwendend, ist dort ein Sauerstoff trennendes PSA-basiertes Brennstoffzellensystem gezeigt, das dem Brennstoffzellensystem von [Fig. 9](#) ähnelt, wobei aber ein Gegenstrom-Blow-

down-Entspanner eine Absaugvakuumpumpe mit freiem Rotor antreibt. In der Ausführungsform von [Fig. 10](#) ist die Welle **222**, die den Gegenstrom-Blowdown-Entspanner **221** mit dem Zufuhrverdichter **201** verbindet, entfernt worden. Stattdessen wird eine Vakuumpumpe **301** verwendet, um den geringen Druck des Zyklus unter Atmosphärendruck zu senken; wobei mit Stickstoff angereichertes Abgas aus der Schwerproduktabgabekammer **61** über die Leitung **246** und die optionale Heizvorrichtung **302** gesaugt wird. Die Pumpe **301** wird vom Gegenstrom-Blowdown-Entspanner **304** betrieben, der Gegenstrom-Blowdown-Gas aus dem ersten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **57** über die Leitung **240** und die optionale Heizvorrichtung **241** entspannt. Die Vakuumpumpe **301** und der Entspanner **304** sind durch eine Welle **305** miteinander verbunden und bilden gemeinsam eine Vakuumpumpenanordnung **306** mit freiem Rotor. Eine derartige Vakuumpumpe mit freiem Rotor bietet attraktive Wirkungsgrad- und Kapitalkostenvorteile. Alternativ könnte ein Motor mit einer Verlängerung der Welle **305** verbunden werden.

[0093] Das Gegenstrom-Blowdown-Gas vom zweiten Gegenstrom-Blowdown-Verteiler **59** verläßt den Verteiler bei einem Druck, der entsprechend dem Ausmaß der Drosselung, die mit der Leitung **244** verbunden ist, im wesentlichen atmosphärisch oder etwas größer ist.

[Fig. 11](#)

[0094] [Fig. 11](#) zeigt ein Stromerzeugungssystem auf der Basis einer Brennstoffzelle, das dem Stromerzeugungssystem von [Fig. 9](#) ähnelt, aber ohne Leichtrückflußenergieerückgewinnung und mit Verwendung eines Teils von mit Sauerstoff angereichertem Gas, das von der Brennstoffzellenkathode abgesehen wird, für einen Druckbeaufschlagungsschritt. Die erläuternden vier Stufen des Leichtrückflußdruckablasses werden über einstellbare Öffnungen **350**, **351**, **352** und **353**, die jeweilige Leitungen **224** und **227**, **228** und **231**, **232** und **235** und **236** und **239** verbinden, irreversibel erzielt. Die Öffnungen **350**, **351**, **352** und **353** werden durch Gestänge **354** durch Aktuator(en) **355** betätigt. Eine Einstellung der Düsen ist erwünscht, um das Abschalten der PSA-Vorrichtung zum Betreiben bei einer reduzierten Taktfrequenz und reduzierten Durchflußraten zu ermöglichen, wenn das Brennstoffzellenantriebssystem bei Teillast betrieben wird.

[0095] Die Brennstoffzelle weist eine Kathodenrückführschleife auf, die (in der Schleifenströmungsrichtung) durch Wasserkondensatabscheider **360**, Leitung **361**, die angereicherten Sauerstoff zum Kathodenkanaleinlaß **261** fördert, Kathodenkanal **262**, Leitung **362**, die Kathodenabgas vom Kathodenkanalauslaß **270** zur Kathodenrückführleitung **365** fördert, die Kathodenrückführgebläse **363** enthält, um das

Kathodenrückführgas für Zulauf zum Kondensatabschalter **360** erneut mit Druck beaufschlagt. Der Abscheider **360** entfernt das Brennstoffzellenwasserabgabekondensat aus der Kathodenrückführschleife, während er auch den aus der PSA-System-Leitung hinzugefügten trockenen konzentrierten Sauerstoff aus der Leitung **218** befeuchtet.

[0096] Ein Teil der Kathodenabgabe aus der Leitung **262** wird durch Leitung **371** entfernt, die von der Kathodenrückführleitung **365** abzweigt. Dieser Teil des Kathodenabgases wird zum Zuführende der PSA (alternativ Vakuum-PSA)-Vorrichtung zurückgeführt und durch Leitung **371** zum Wasserkondensatabscheider **373** und von dort zum ersten Druckbeaufschlagungsverteiler **48** gefördert, der mit der ersten Ventilseite **21** in Verbindung steht. Ein Drosselventil **375** kann in der Leitung **371** vorgesehen sein, um einen Druckablaß, sofern erforderlich vom Druck am Kathodenauslaß **270** zum ersten Druckbeaufschlagungsverteiler **48** zu liefern.

[0097] Rückführung eines Teils des Kathodenabgases zur PSA-Einheit-Zufuhr weist mehrere Vorteile auf, die einschließen (1) Reduzieren des Volumens von zu verdichtendem Einsatzgas, (2) Beseitigung des Erfordernisses des Entleerens irgendeines Kathodenabgases aus der Kathodenschleife, und (3) Wiedergewinnung von etwas überschüssiger Energie aus der Brennstoffzellenkathodenschleife durch Verwendung dieses Gases, um bei der Beaufschlagung der Brennstoffzelle vom Zuführende mit Druck zu helfen. Dieses sauerstoffreiche Gas muß zum Zuführende der PSA-Einheit zugegeben werden, da es mit Wasserdampf gesättigt ist, der das Adsorbens deaktivieren würde, wenn es direkt zur zweiten Ventilseite am Produktende hinzugegeben würde. Durch Einleiten desselben am Zuführende der Betten nach dem Schritt mit geringem Druck und vor irgendeiner direkten Druckbeaufschlagung mit Einsatzluft wird ein günstiges Konzentrationsprofil erzeugt, da dieses Gas sauerstoffreicher als Einsatzluft ist, aber auch eine größere Belastung mit Verunreinigungen als das mit Sauerstoff angereicherte Produktgas enthält.

[0098] Da Argon mit Sauerstoff durch die PSA-Einheit konzentriert wird, wird Argon sowohl in der Kathodenschleife als auch in dem mit Sauerstoff angereicherten PSA-Produkt in dieser Ausführungsform konzentriert werden. Wenn keine Kathodenentleerung vorgesehen ist, kann Argon nur das System durch den Auslaß der PSA-Einheit verlassen. Da die PSA-Einheit typischerweise eine Rückgewinnung von Sauerstoff und Argon von ungefähr 60% erzielt, wenn gewöhnliche Luft als die einzige Zufuhr zur Druckbeaufschlagung für die erste Ventilseite verwendet wird, können ungefähr 40% von mit Einsatzgas beaufschlagtem Argon in jedem Zyklus abgeführt werden. Die fraktionierte Beseitigung von Rückführargon, der mit den anfänglichen Zufuhrdruckbeauf-

schlagungsschritten eingeleitet wird, wird geringer sein, da die Hauptzufuhr nach dem Schieben des Rückführargons tiefer in die Adsorber eingeleitet wird. Somit kann ein geringeres Ausmaß von Entleerung aus der Kathodenschleife erwünscht sein. Kathodenabgasrückführung zur PSA-Einheit-Zufuhr kann auch direkt mit Einsatzluft gemischt werden, die bei demselben oder niedrigeren Druck wie/als der Kathodenkanalauslaß **270** gemischt werden.

Fig. 12

[0099] **Fig. 12** zeigt ein Stromerzeugungssystem **400** auf Basis einer Brennstoffzelle gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die eine Brennstoffzelle **402**, ein Sauerstofferzeugungs-PSA-System **404** und ein Wasserstoffgasproduktionssystem **406** umfaßt. Die Brennstoffzelle umfaßt einen Anodenkanal **408**, der einen Anodengaseinlaß **410** und einen Anodenauslaß **412** enthält, einen Kathodenkanal **414**, der einen Kathodengaseinlaß **416** und einen Kathodengasauslaß **418** enthält, und eine PEM **420**, die mit dem Anodenkanal **408** und dem Kathodenkanal **414** zur Erleichterung eines Ionenaustausches zwischen dem Anodenkanal **408** und dem Kathodenkanal **414** in Verbindung steht.

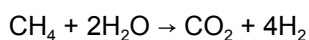
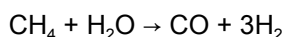
[0100] Das Sauerstoff-PSA-System **404** extrahiert Sauerstoffgas aus Einsatzluft und umfaßt ein Rotationsmodul **410** und einen Verdichter **422** zum Zuführen von mit Druck beaufschlagter Einsatzluft zu den Zufuhrkammern **424** des Rotationsmoduls **10**. Vorzugsweise enthält das Sauerstoff-PSA-System **404** eine Vakuumpumpe **426** (oder alternativ einen Gegenstrom-Blowdown-Entspanner), die mit dem Verdichter **422** zum Absaugen von mit Stickstoff angereichertem Gas als schweres Produktgas aus den Blowdown-Kammern **428** des Rotationsmoduls **410** in Verbindung steht. Das Sauerstoff-PSA-System **404** enthält auch eine Leichtproduktgasfunktionskammer **430**, die mit dem Kathodengaseinlaß **416** zum Zuführen von mit Sauerstoff angereichertem Gas zum Kathodenkanal **414** in Verbindung steht. Die Kathodenrückführung kann wie in den Ausführungsformen der **Fig. 9–Fig. 11** vorgesehen sein.

[0101] Das Wasserstoffgasproduktionssystem **406** umfaßt ein Wasserstofferzeugungs-PSA-System **432** und einen Brennstoffprozessorreaktor **434**, der mit dem Wasserstoff-PSA-System **432** zum Zuführen einer ersten Wasserstoffgaszufuhr zum Wasserstoff-PSA-System **432** verbunden ist. Das Wasserstoff-PSA-System **432** umfaßt ein Rotationsmodul **10**, das eine erste Zufuhrgaskammer **436** zur Aufnahme einer ersten Wasserstoffzufuhr vom Reaktor **434**, eine Druckbeaufschlagungskammer **438** zur Aufnahme einer Wasserstoffgaszufuhr vom Anodengasauslaß **412**, eine Leichtproduktkammer **440** zum Zuführen von Wasserstoffgas zum Anodengaseinlaß **410**

und eine Blowdown-Kammer **441** zum Zuführen von Abgas (Tail gas) als schweres Produktgas zum Reaktor **434** enthält. Vorzugsweise enthält das Wasserstoff-PSA-System **432** eine Vakuumpumpe **442** (oder alternativ einen Gegenstrom-Blowdown-Entspanner), die zwischen der Blowdown-Kammer **441** und dem Reaktor **434** zum Extrahieren des Abgases aus der Blowdown-Kammer **441** vorgesehen ist.

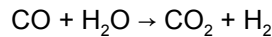
[0102] Gemäß dem Reinheitsgrad des vom Anodengasauslaß **412** zurückgeführten Wasserstoffgases kann die Druckbeaufschlagungskammer **438** mit entweder dem ersten oder zweiten Ventil des Rotationsmoduls zusammenwirken, wobei letzteres bevorzugt wird, wenn die Verunreinigung dieses Stroms relativ hoch ist. Das Wasserstoff-PSA-System **432** kann auch einen Schwerrückflußverdichter **443** zum Zuführen von schwerem Rückflußgas zu einer zweiten Einsatzgaskammer **444** zur Verbesserung der fraktionierten Rückgewinnung von Wasserstoffgas enthalten. Die Anforderungen an den Heizwert des Brenngases des Wasserstoffgasproduktionssystems **406** werden die richtige Rückgewinnung von Wasserstoffgas bestimmen.

[0103] Der Reaktor **434** umfaßt einen Dampfreformer **445**, der einen Brenner **446** und Kontaktrohre (nicht gezeigt) enthält, und einen Wassergas-Shiftreaktor **448**. Der Brenner **446** enthält einen ersten Brennereinlaß **450** zur Aufnahme des Abgases (Tail gas) aus der Blowdown-Kammer **442** und einen zweiten Brennereinlaß **452** zur Aufnahme von Luft oder feuchtem mit Sauerstoff angereichertem Gas aus dem Kathodenkanal **414**. Der Dampfreformer **444** wird durch einen Brennstoffeinlaß **452** mit einem Wasserstoffbrennstoff, wie zum Beispiel Methangas, plus Wasser bei einem Zufuhrdruck gespeist, der der Arbeitsdruck der Brennstoffzelle plus Berücksichtigung von Druckverlusten durch das System **406** ist. Der Brennstoff wird vorgewärmt und Dampf wird durch den Wärmetauscher **455** erzeugt, der Wärme aus dem Rauchgas des Brenners **446** rückgewinnt. Das Gemisch aus Methanbrenngas und Dampf wird danach durch die Kontaktrohre geleitet, während das Abgas (Tail gas) und das mit Sauerstoff angereicherte Gas in dem Brenner **446** verbrannt werden, um die Temperatur des Methanbrenngasgemisches auf die Temperatur anzuheben, die zur Durchführung von endothermem Dampfreformierreaktionen des Methanbrenngasgemisches notwendig ist (typischerweise 800°C):



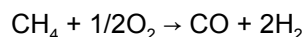
[0104] Das resultierende Syngas (näherungsweise 70% H₂, mit gleichen Mengen von CO und CO₂ als Hauptverunreinigungen, und nicht umgesetztem CH₄ und N₂ als Nebenverunreinigungen) wird auf unge-

fähr 250°C gekühlt und danach zum Wassergas-Shiftreaktor **448** zum Umsetzen des meisten Teils des CO mit Dampf zur Erzeugung von H₂ und CO₂ geleitet:

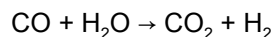


[0105] Die resultierenden Gasreaktanten werden danach zur ersten Zufuhrkammer **436** des Wasserstoff-PSA-System **432** zur Wasserstoffreinigung gefördert, wobei das schwere Produktabgas (Tail gas) zum Dampfreformer **434** aus der Blowdown-Kammer **442** zur Verbrennung in dem Brenner **446** zurückgeführt wird.

[0106] In einer Variante umfaßt der Reaktor **434** einen Partialoxidationsreaktor, und statt daß das Methangasgemisch dampfreformiert wird, wird das Methangasgemisch im Partialoxidationsreaktor mit einem Teil des feuchten mit Sauerstoff angereicherten Gases, das vom Kathodenkanal **414** durch eine optionale Leitung **456** aufgenommen wird, für eine Partialoxidation des Methangases zur Reaktion gebracht:



[0107] Das resultierende Syngas wird auf ungefähr 250°C abgekühlt und danach zum Wassergas-Shiftreaktor **448** zur Umsetzung des meisten Teils des CO mit Dampf zur Erzeugung von H₂ und CO₂ geleitet:



[0108] Die resultierenden Gasreaktanten werden danach zur ersten Zufuhrkammer **436** des Wasserstoff-PSA-Systems **432** zur Wasserstoffreinigung befördert, wobei das schwere Produktabgas (Tail gas) aus dem Wasserstoff-PSA-System **432** entleert wird.

[0109] In einer anderen Variante umfaßt der Reaktor **434** einen autothermen Reformer und einen Wassergas-Shiftreaktor **448**, und statt daß das Methangasgemisch endotherm dampfreformiert oder exotherm partialoxidiert wird, wird das Methangasgemisch in dem autothermen Reformer durch eine thermisch ausgeglichene Kombination dieser Reaktionen zur Reaktion gebracht, woran sich eine Reaktion im Wassergas-Shiftreaktor **448** anschließt. Da das Wasserstoff-PSA-Schwerproduktabgas (Tail gas) selbst im Grenzbereich von sehr hohem schwerem Rückfluß immer einen gewissen Heizwert aufweisen wird, würde ein Brenner **446** zum effizienten Vorwärmen von Luft und/oder Brennstoffzufuhren für einen autothermen Reaktor vorgesehen werden. Sofern nicht die Brennstoffverarbeitungsreaktionen eine endotherme Reformierkomponente als eine energieeffiziente Senke für Abgasbrennstoffverbrennung enthalten, sollte eine andere wirtschaftliche Verwendung (wie in der Ausführungsform von [Fig. 13](#)) vorgesehen sein, wenn die Nettobrennstoffverarbeitungsre-

aktionen hoch endotherm sind, wie im Fall von einfacher Partialoxidation.

Fig. 13

[0110] Es wird ersichtlich sein, daß ein Nachteil des Stromerzeugungssystems **400** die Notwendigkeit des Antreibens des Verdichters **422** und der Vakuumpumpen **426**, **444** mit einem Teil der durch die Brennstoffzelle erzeugten elektrischen Energie betrifft. **Fig. 13** zeigt ein Stromerzeugungssystem **500** auf der Basis einer Brennstoffzelle, das sich diesem Nachteil widmet.

[0111] Das Stromerzeugungssystem **500** ist im wesentlichen ähnlich wie das Stromerzeugungssystem **400**, umfassend die Brennstoffzelle **402**, ein Sauerstofferzeugungs-PSA-System **504** und ein Wasserstoffgasproduktionssystem **506**. Das Sauerstoff-PSA-System **504** extrahiert Sauerstoffgas aus Einsatzluft und umfaßt ein Rotationsmodul **10**, einen Verdichter **522** zum Zuführen von mit Druck beaufschlagter Einsatzluft zu den Zufuhrkammern **524** des Rotationsmoduls **10**, einen Verbrennungsentspanner **523**, der mit dem Verdichter **522** verbunden ist, einen Startermotor (nicht gezeigt), der mit dem Verdichter **522** verbunden ist, und eine Leichtproduktgasfunktionskammer **530**, die mit dem Kathodengaseinlaß **416** zum Zuführen von mit Sauerstoff angereichertem Gas zum Kathodenkanal **414** verbunden ist. Das Wasserstoff-PSA-System **504** kann auch eine Gegenstrom-Blowdown- oder Schwerproduktabgabekammer **531** aufweisen, die mit einer Vakuumpumpe und/oder einem Entspanner (wie in den vorangehenden Ausführungsformen dargestellt) zusammenarbeitet.

[0112] Das Wasserstoffgasproduktionssystem **506** umfaßt ein Wasserstofferzeugungs-PSA-System **532** und einen Reaktor **534**, der mit dem Wasserstoff-PSA-System **532** zum Zuführen einer ersten Wasserstoffgaszufuhr zum Wasserstoff-PSA-System **532** verbunden ist. Das Wasserstoff-PSA-System **532** umfaßt ein Rotationsmodul **10**, das eine erste Zufuhrgaskammer **536** zur Aufnahme einer ersten Wasserstoffgaszufuhr vom Dampfreformer **534**, eine Druckbeaufschlagungskammer **538** (die mit entweder dem ersten oder dem zweiten Ventil in Verbindung steht) zur Aufnahme einer zweiten Wasserstoffzufuhr vom Anodengasauslaß **412**, eine Leichtproduktkammer **540** zum Zuführen von Wasserstoffgas zum Anodengaseinlaß **410** und eine Blowdown-Kammer **541** zum Zuführen von Abgas als Schwerproduktbrennstoffgas zum Reaktor **534** enthält. Wie in den vorangehenden Ausführungsformen kann die Blowdown-Kammer **541** mit einer Abgasvakuumpumpe und/oder einem Entspanner (nicht gezeigt) zum Extrahieren des Abgases (Tail gas) aus der Blowdown-Kammer **541** zusammenarbeiten.

[0113] Der Reaktor **534** umfaßt einen autothermen Reformer **544**, einen Brenner **546** und einen Wasserstoffgas-Shiftreaktor **548**. Der Brenner **546** enthält Heizrohre **549**, einen ersten Brennereinlaß **555** zur Aufnahme des Abgases aus der Blowdown-Kammer **542** und einen zweiten Brennereinlaß **552** zur Aufnahme von verdichteter Luft aus der zweiten Verdichterstufe **522**. Wie anhand von **Fig. 13** ersichtlich wird, verdichtet die zweite Stufe des Verdichters **522** einen Teil der Einsatzluft, der nicht dem Wasserstofferzeugungs-PSA-System **504** zugeführt wird.

[0114] Der Entspanner **523** und der Verdichter **522** umfassen gemeinsam eine Gasturbine und entspannen Verbrennungsproduktgas, das aus dem Brenner **546** austritt, um den Druck der Einsatzluft zu den Zufuhrkammern **524** zu erhöhen. Wie man erkennen wird, wird thermische Energie der Verbrennung des Wasserstoff-PSA-Abgases (Tail gas) dazu verwendet, um die Brennstoffzellenzusatzgasreinigung und Verdichteranlage anzutreiben. Wie in **Fig. 13** gezeigt ist, kann zusätzliche Einsatzgasverdichtungsenergie aus der exothermen Reaktionswärme des Wasserstoffgas-Shiftreaktors **548** über Vorwärmwärmetauscher **555** erhalten werden.

[0115] Der autotherme Reformer **544** wird durch einen Brennstoffeinlaß **545** mit einem Kohlenwasserstoffbrennngas, wie zum Beispiel Methangas, gespeist und in dem gezeigten Beispiel mit mit Sauerstoff angereichertem Gas zur Reaktion gebracht, das unter Druck vom Kathodenkanal **414** durch das Booster-Gebläse **556** aufgenommen wird. Die Kathodenrückführung kann nicht gerechtfertigt sein oder kann zumindest reduziert werden, wenn das mit Sauerstoff angereicherte Gas, das vom Kathodenauslaß zugeführt wird, vorteilhafterweise zur Brennstoffverarbeitung (zur Reduzierung von Stickstoffbeladung und Verbesserung der Verbrennung) verwendet werden kann. Das resultierende Syngas wird danach gekühlt und danach zum Wassergas-Shiftreaktor **548** zur Umsetzung des größten Teils des CO mit Dampf zur Erzeugung von H₂ und CO₂ geleitet. Die resultierenden Gasreaktanten werden danach zur ersten Zufuhrkammer **536** des Wasserstoff-PSA-Systems **532** zur Wasserstoffreinigung gefördert.

Fig. 14

[0116] Die Ausführungsform **600** stellt weitere Aspekte der Erfindung dar. Für alkalische Brennstoffzellen besteht das entscheidende Problem in dem Entfernen von CO₂ aus sowohl Zufuhroxidant als auch Wasserstoffströmen. Die Sauerstoff-PSA- und Wasserstoff-PSA-Systeme gemäß der vorliegenden Erfindung in der oben beschriebenen Weise werden CO₂ sehr effektiv entfernen, da CO₂ viel stärker adsorbiert wird als andere dauerhafte Gasverunreinigungen. Sauerstoffanreicherung ist für alle Arten von Brennstoffzellen durch Erhöhung der Spannungseffi-

zienz von Vorteil, obwohl gewöhnlich nicht gerechtfertigt außer bei hohen Stromdichten. Alkalische Brennstoffzellen können unterdimensionierte Sauerstoff-PSA für sehr effektive Kohlenstoffdioxidentfernung gemeinsam mit mäßiger Wasserstoffanreicherung verwenden oder können dieselbe PSA-Vorrichtung mit einem Adsorbens, dem Stickstoff/Sauerstoffselektivität fehlt (z.B. Aktivkohle oder hohe Silicazeolith), zur Kohlenstoffdioxidreinigung ohne Sauerstoffanreicherung verwenden. Das Rotations-PSA-Modul und die Verdichteranlage gemäß dieser Erfindung sind für diese Aufgabe vollkommen geeignet.

[0117] Alkalische Brennstoffzellen, die bei Umgebungsluftzufuhr arbeiten, arbeiten typischerweise in der Nähe von Atmosphärendruck bei ungefähr 70°C. Unter derartigen Bedingungen dient der wasserdampfgesättigte Kathodenabgabestrahle von mit Stickstoff angereicherter Luft zum Entfernen von Brennstoffzellenproduktwasser, während das Elektrolytwassergleichgewicht aufrechterhalten wird. Für einen hohen Wirkungsgrad mit kostengünstigeren Elektrokatalysatormaterialien oder anderenfalls zur thermischen Integration mit einem Methanolreformer unter Verwendung von Brennstoffzellenabwärme zum Verdampfen von Reaktanten und sogar zum Antreiben der endothermen Reaktion kann ein Betrieb von alkalischen Brennstoffzellen bei höheren Temperaturen erwünscht sein. Mit zunehmenden Rauchabgastemperaturen kann aber der Betrieb mit Umgebungsluftzusammensetzung schnell unpraktikabel werden. Bei höheren Temperaturen trägt das stickstoffreiche Kathodenabgas einfach zu viel Wasserdampf aus dem System heraus, sofern nicht der Gesamtdruck unwirtschaftlich angehoben wird oder anderenfalls ein Kondensator zur Wasserrückgewinnung enthalten ist.

[0118] Mit Sauerstoffanreicherung kann das Volumen der Kathodenabgabe eingestellt werden, um Wassergleichgewicht für jede alkalische Brennstoffzelle zu erzielen. Vernünftige niedrige Stapelarbeitsdrücke werden praktikabel, zum Beispiel ungefähr 3 Atmosphären für eine Kathodenauslaßtemperatur von 120°C. Wenn Sauerstoffanreicherung bis zur vollständigen Leistungsfähigkeit der Sauerstoff-PSA durchgeführt wird, z.B. 95% Sauerstoffreinheit erreichend, wird der Kathodenabgabestrahle trockener Dampf mit einer mäßigen Konzentration von permanenten Gasen. Dieses Dampfprodukt kann für diverse Anwendungen, die Brennstoffverarbeitung von Kohlenwasserstoffbeschickungsmaterialien zum Erzeugen von Wasserstoff einschließen, nützlich sein.

[0119] Die Ausführungsform **600** zeigt eine Sauerstoff-PSA (auch CO₂-Entfernung durchführend), wie in [Fig. 12](#) gezeigt. Die Wasserstoffseite des Systems ist in diesem Beispiel vereinfacht, so daß sie nur den Anodengaseinlaß von reinem Wasserstoff zeigt. Sauerstoff mit einer Reinheit von mehr als 90% wird dem

Kathodengaseinlaß **416** zugeführt, während konzentrierter Wasserdampf aus dem Kathodengasauslaß **418** zugeführt und direkt zum Dampfentspanner **610** gefördert wird. Der Entspanner **610** läßt zum Vakuumkondensator **612** ab, aus dem flüssiges Kondensat durch die Pumpe **614** entfernt wird, während die Permanentgas-Kopfprodukte (Overheads) durch eine Leitung durch die Vakuumpumpe **426** der Sauerstoff-PSA abgesaugt werden. Der Entspanner **610** kann dem Motor **616** beim Antreiben der Verdichteranlage der Sauerstoff-PSA helfen, wodurch somit der Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebssystems um näherungsweise 2 bis 3% verbessert wird.

[0120] Ein letzter Aspekt der Erfindung (für jede Art von Brennstoffzellen) besteht in der optionalen Bereitstellung von Leichtproduktgasakkumulatoren für die PSA-Einheiten und insbesondere für die Sauerstoff-PSA, die in [Fig. 14](#) dargestellt ist. Der Sauerstoffproduktakkumulator **660** enthält einen Sauerstoffspeicherbehälter **661**, der von der Leichtproduktkammer **430** durch ein Rückschlagventil **462** bei im wesentlichen dem oberen Druck des PSA-Prozesses oder optional einem erhöhten Druck, der von einem kleinen akkumulatorbeschickenden Verdichter **663** erzeugt wird, beschickt. Ein Peaking-Sauerstoffzufuhrventil **664** und ein Rückspülventil **666** sind auf jeder Seite des Rückschlagventils **667** vorgesehen, um eine Sauerstoffzufuhr aus dem Speicherbehälter jeweils vor dem Brennstoffzellenkathodeneinlaß oder hinter der Sauerstoff-PSA-Einheit zu ermöglichen.

[0121] Der Sauerstoffspeicherbehälter wird während des normalen Betriebs beschickt, insbesondere während Bereitschafts- oder Leerlaufintervallen, wenn die Sauerstoff-PSA höchste Sauerstoffreinheit erzielt. Der optionale Beschickungsverdichter kann betrieben werden, wenn das System im Leerlauf ist oder (in Fahrzeuganwendungen) als Energielastanwendung von regenerativem Bremsen. Das Peaking-Sauerstoffzufuhrventil **665** wird während Intervallen mit Spitzenenergiebedarf geöffnet, um die Zufuhr von konzentriertem Sauerstoff zur Kathode zu erhöhen, wenn er am meisten benötigt wird. Wenn der Sauerstoffakkumulator groß genug ist, könnten der Sauerstoff-PSA-Verdichter **422** und die Vakuumpumpe **426** während kurzer Intervalle von Spitzenenergiebedarf im Leerlauf sein, um die Energie freizugeben, die normalerweise von internen Zusatzgeräten verbraucht wird, um externen Bedarf zu erfüllen. Dann kann die Größe des Brennstoffzellenstapels (in einem Antriebssystem, das gelegentliche spezifizierte Spitzenenergiepegel erfüllen muß) für wichtige Kostenersparnis verringert werden.

[0122] Wenn das Brennstoffzellenantriebssystem abgeschaltet wird, wird der Sauerstoff-PSA-Verdichter **422** als erstes angehalten, um den internen Druck für einen anfänglichen Blowdown aller Adsorber zu

senken. Danach wird das Rückspülventil **666** geöffnet, um eine Sauerstoffspülströmung freizugeben und adsorbierten Stickstoff und etwas adsorbierten Wasserdampf aus den Adsorbern über ein kurzes Zeitintervall zu verschieben. Die Adsorber werden danach mit trockenem Sauerstoff bei Atmosphärendruck vorbeschickt gelassen, wodurch somit eine schnelle Reaktion der Sauerstoff-PSA für das nächste Hochfahren des Systems ermöglicht wird.

[0123] Die vorangehende Beschreibung soll die bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung erläutern. Fachleute können sich bestimmte Ergänzungen, Weglassungen und/oder Modifikationen bezüglich der beschriebenen Ausführungsformen vorstellen, die, obwohl sie nicht speziell beschrieben sind oder darauf Bezug genommen wurde, nicht aus dem Schutzbereich der vorliegenden Erfindung gelangen, wie sie durch die beigefügten Ansprüche definiert ist.

Patentansprüche

1. Stromerzeugungssystem, das Folgendes umfasst:

eine Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodenkanal, der einen Kathodengaseinlass und einen Kathodengasauslass enthält, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und ein Sauerstoffgaszuführungssystem, das mit dem Kathodengaseinlass verbunden ist, um dem Kathodenkanal einen mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstrom zuzuführen, wobei das Sauerstoffgaszuführungssystem ein Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zur Sauerstoffanreicherung in einer Gaszufuhr enthält.

2. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 1, bei dem das Druckwechseladsorptionssystem einen ersten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme von Luftzufuhr als eine erste Gaszufuhr und einen mit dem Kathodengasauslass verbundenen Gasauslass enthält.

3. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 2, bei dem das Sauerstoffgaszuführungssystem einen Gaseinlass zur Aufnahme eines ersten Teils von von dem Kathodenkanal abgegebenem Kathodengas und einen Gasauslass zur Zuführung des mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstroms zum Kathodenkanal enthält.

4. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 3, bei dem das Sauerstoffgaszuführungssystem ein erstes Gasrückführungsmittel enthält, das mit dem Kathodengasauslass zur Rückführung des ersten Teils des aus dem Kathodenkanal abgegebenen Katho-

dengases zum Kathodengaseinlass verbunden ist.

5. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 4, bei dem das erste Gasrückführungsmittel einen Verdichter zur Zuführung des ersten Kathodenabgasteils unter Druck zum Kathodengaseinlass umfasst.

6. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 5, bei dem das erste Gasrückführungsmittel einen Kondensatabscheider enthält, der den Kathodengasauslass und den Verdichter miteinander verbindet, um dem ersten Kathodenabgasteil Feuchtigkeit zu entziehen.

7. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 6, bei dem das Gasrückführungsmittel den ersten Kathodenabgasteil als ein zweites Einsatzgas zu einem zweiten Einsatzgaseinlass des Rotationsdruckwechseladsorptionssystems leitet.

8. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 7, bei dem das Rotationsdruckwechseladsorptionssystem ein Rotationsmodul, das einen Stator und einen bezüglich des Stators drehbaren Rotor enthält, wobei der Rotor mehrere Strömungswege zur Aufnahme von Adsorptionsmaterial darin enthält, um vorzugsweise eine erste Gaskomponente als Reaktion auf zunehmenden Druck in den Strömungswegen bezüglich einer zweiten Gaskomponente aufzunehmen, und eine mit dem Rotationsmodul verbundene Verdichtungsmaschinenanlage, um Gasstrom durch die Strömungswege zum Trennen der ersten Gaskomponente von der zweiten Gaskomponente zu erleichtern, umfasst.

9. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 8, bei dem der Stator eine erste Statorventilfläche, eine zweite Statorventilfläche, mehrere erste Funktionskammern, die in die erste Statorventilfläche münden, und mehrere zweite Funktionskammern, die in die zweite Statorventilfläche münden, enthält und der Rotor eine erste Rotorventilfläche, die mit der ersten Statorventilfläche verbunden ist, eine zweite Rotorventilfläche, die mit der zweiten Statorventilfläche verbunden ist, und mehrere in den Rotorventilflächen ausgebildete Öffnungen enthält, die mit jeweiligen Enden der Strömungswege und den Funktionskammern in Verbindung stehen.

10. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 9, bei dem die Verdichtungsmaschinenanlage mit einem Teil der Funktionskammern verbunden ist, um den Teil der Funktionskammern auf mehreren verschiedenen jeweiligen Druckpegeln zwischen einem oberen Druck und einem unteren Druck zu halten und so einen gleichförmigen Gasstrom durch den Teil der Funktionskammern aufrechtzuerhalten.

11. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 9, bei dem die Funktionskammern eine Leichtrückfluss-

produktauslasskammer und eine Leichtrückflussproduktrückföhrkammer enthalten, die Verdichtungsmaschinenanlage einen zwischen der Leichtrückflussproduktauslass- und der Leichtrückflussproduktrückföhrkammer verbundenen Leichtrückflussproduktentspanner umfasst; und das erste Gasrückföhrungsmittel einen Verdichter umfasst, der mit dem Leichtrückflussproduktentspanner verbunden ist, um dem Kathodengaseinlass den ersten Kathodenabgasteil unter Druck zuzuföhren.

12. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 11, bei dem das Rotationsdruckwechseladsorptionssystem eine Heizvorrichtung enthält, die zwischen der Leichtrückflussproduktauslasskammer und dem Leichtrückflussproduktentspanner angeordnet ist, um die Rückgewinnung von Energie aus dem aus der Leichtrückflussproduktauslasskammer abgegebenen Leichtrückflussgas zu verbessern.

13. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 11, bei dem die Funktionskammern eine Gaszuföhrkammer und eine Gegenstrom-Blowdownkammer enthalten und die Verdichtungsmaschinenanlage einen Verdichter, der mit dem ersten Einsatzgaseinlass zur Zuföhrung von verdichteter Luft zur Gaszuföhrkammer verbunden ist, und einen mit dem Verdichter verbundenen Entspanner zum Abgeben eines mit der ersten Gaskomponente angereicherten schweren Produktgases aus der Gegenstrom-Blowdownkammer umfasst.

14. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 11, bei dem die Funktionskammern eine Gegenstrom-Blowdownkammer und eine Schwerproduktkammer enthalten und die Verdichtungsmaschinenanlage einen Entspanner, der mit der Gegenstrom-Blowdownkammer verbunden ist, und eine Vakuumpumpe umfasst, die mit dem Entspanner verbunden ist, um mit der ersten Gaskomponente angereichertes schweres Produktgas bei Unterdruck aus der Schwerproduktkammer abzuziehen.

15. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 9, bei dem die Funktionskammern eine Gaszuföhrkammer enthalten und das Gasrückföhrungsmittel den ersten Kathodenabgasteil als Einsatzgas zur Gaszuföhrkammer leitet.

16. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 9, bei dem die Funktionskammern eine Gaszuföhrkammer enthalten und das Stromerzeugungssystem ein zweites Gasrückföhrungsmittel enthält, das mit dem Kathodengasauslass verbunden ist, um einen zweiten Teil des Kathodenabgases zur Gaszuföhrkammer zurückzuföhren.

17. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 16, bei dem das zweite Gasrückföhrungsmittel eine Drosselöfönung umfasst.

18. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 8, bei dem das Adsorptionsmaterial Ca-X, Li-X, Lithiumchabazitzeolith, calciumausgetauschtes Chabazit oder strontiumausgetauschtes Chabazit ist.

19. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 1, bei dem das Rotationsdruckwechseladsorptionssystem eine Luftzuföhr mit Sauerstoff anreichert und Kohlendioxid daraus entfernt.

20. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 19, das weiterhin ein mit dem Anodengaseinlass verbundenes Wasserstoffgaszuföhrungssystem umfasst.

21. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 20, bei dem das Wasserstoffgaszuföhrungssystem eine Gaszuföhr mit Wasserstoff anreichert.

22. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 21, das weiterhin einen Sauerstoffakkumulator enthält, der zwischen dem Sauerstoffgaszuföhrungssystem und dem Kathodengaseinlass angeordnet ist.

23. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 22, bei dem das Elektrolyt alkalisch ist und auf einer Arbeitstemperatur von über 100°C gehalten wird, wobei das Sauerstoffgaszuföhrungssystem dahingehend betrieben wird, dem Kathodengaseinlass Sauerstoff mit einer Reinheit von ca. 90% zuzuföhren, so dass das Produktwasser der Brennstoffzelle als konzentrierter Trockenstrom aus dem Kathodengasauslass abgegeben wird; wobei das System einen Dampfentspanner, um den Dampf aus dem Kathodengasauslass zu einem Vakuumkondensator zu entspannen, eine Kondensatpumpe zum Abföhren von Flüssigkeit aus dem Kondensator und eine mit dem Sauerstoffdruckwechseladsorptionssystem zusammenwirkende und Permanentgaskopfprodukte aus dem Vakuumkondensator abföhrende Vakuumpumpe enthält.

24. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 7, bei dem das Rotationsdruckwechseladsorptionssystem ein Rotationsmodul zur Durchföhrung eines Druckwechseladsorptionsprozesses mit einem zyklisch zwischen einem oberen Druck und einem unteren Druck schwankenden Betriebsdruck umfasst, um eine erste Gasfraktion und eine zweite Gasfraktion aus einem die erste und die zweite Fraktion enthaltenden Gasgemisch abzuziehen, wobei das Rotationsmodul folgendes umfasst:

einen eine erste Statorventilflöche, eine zweite Statorventilflöche, mehrere erste Funktionskammern, die in die erste Statorventilflöche münden, und mehrere zweite Funktionskammern, die in die zweite Statorventilflöche münden, enthaltenden Stator; und einen drehbar mit dem Stator verbundenen Rotor, der eine mit der ersten Statorventilflöche in Verbindung stehende erste Rotorventilflöche, eine mit der zweiten Statorventilflöche in Verbindung stehende zweite Rotorventilflöche, mehrere Strömungswege zur Auf-

nahme von Adsorptionsmaterial darin, wobei jeder Strömungsweg ein Paar einander gegenüberliegender Enden enthält, und mehrere in den Rotorventilflächen ausgebildete Öffnungen, die mit dem Strömungswegenden und den Funktionsöffnungen in Verbindung stehen, um jeden Strömungsweg zyklisch mehreren verschiedenen Druckpegeln zwischen dem oberen und unteren Druck auszusetzen und so einen gleichförmigen Gasstrom durch die erste und die zweite Funktionskammer aufrechtzuerhalten, enthält;
wobei die Funktionskammern eine erste und eine zweite Gaszufuhrkammer umfassen, die in die erste Statorventilfläche münden, um den Strömungswegen das Gasgemisch zuzuführen und die Strömungswegen nacheinander dem zweiten Einsatzgas vor dem ersten Einsatzgas auszusetzen.

25. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 24, bei dem das zweite Einsatzgas bezüglich des ersten Einsatzgases mit Sauerstoff angereichert ist.

26. Stromerzeugungssystem, das Folgendes umfasst:

eine Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodenkanal, der einen Kathodengaseinlass und einen Kathodengasauslass enthält, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern;
ein Sauerstoffgaszuführungssystem, das mit dem Kathodengaseinlass verbunden ist, um dem Kathodenkanal einen Sauerstoffgas umfassenden Gasstrom zuzuführen; und
ein mit dem Anodengaseinlass verbundenes Wasserstoffgaszuführungssystem zur Zuführung eines mit Wasserstoffgas angereicherten Gasstroms zum Anodenkanal, das ein erstes Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zur Wasserstoffanreicherung in einer Gaszufuhr enthält.

27. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 26, bei dem das Druckwechseladsorptionssystem einen ersten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme einer Wasserstoffgas enthaltenden ersten Gaszufuhr und einen mit dem Anodengaseinlass verbundenen Gasauslass enthält.

28. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 27, bei dem das Wasserstoffgaszuführungssystem einen Gaseinlass zur Aufnahme einer zweiten Gaszufuhr von dem Anodengasauslass und einen Gasauslass zur Zuführung eines mit Wasserstoffgas angereicherten Gasstroms zum Anodenkanal enthält.

29. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 28, bei dem die zweite Gaszufuhr durch das Rotationsdruckwechseladsorptionssystem geführt wird.

30. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 29, bei dem das erste Rotationsdruckwechseladsorptionssystem einen zweiten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme der zweiten Gaszufuhr enthält.

31. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 30, bei dem das Sauerstoffgaszuführungssystem ein zweites Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zum Abziehen von Sauerstoffgas aus Luft umfasst, wobei das zweite Rotationsdruckwechseladsorptionssystem einen ersten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme einer Luftzufuhr und einen mit dem Kathodengaseinlass verbundenen Gasauslass zur Zuführung eines mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstroms zum Kathodenkanal enthält.

32. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 30, bei dem das Wasserstoffgaszuführungssystem einen Reaktor zur Erzeugung der ersten Gaszufuhr aus Kohlenwasserstoffbrennstoff umfasst, und bei dem das erste Rotationsdruckwechseladsorptionssystem mit dem Reaktor verbunden ist und die erste und die zweite Gaszufuhr aufnimmt.

33. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 31, bei dem das Wasserstoffgaszuführungssystem einen Reaktor zur Erzeugung einer zweiten Gaszufuhr aus Kohlenwasserstoffbrennstoff umfasst, und bei dem das erste Rotationsdruckwechseladsorptionssystem mit dem Reaktor verbunden ist und die erste und die zweite Gaszufuhr aufnimmt.

34. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 33, bei dem das erste Rotationsdruckwechseladsorptionssystem die erste und die zweite Gaszufuhr aufnimmt und einen mit Wasserstoff angereicherten Gasstrom daraus erzeugt.

35. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 34, bei dem das erste Rotationsdruckwechseladsorptionssystem einen ersten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme der ersten Gaszufuhr und einen zweiten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme der zweiten Gaszufuhr enthält.

36. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 35, bei dem die erste Gaszufuhr mit einem Druckpegel bereitgestellt wird, der sich von dem Druckpegel der zweiten Gaszufuhr unterscheidet.

37. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 33, bei dem der Reaktor einen Dampfreformer und einen mit dem Dampfreformer verbundenen Wasserstoffgas-Shiftreaktor zur Erzeugung der zweiten Gaszufuhr umfasst.

38. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 37, bei dem der Dampfreformer einen mit dem Kathodengasauslass verbundenen ersten Brennereinlass zur Aufnahme von feuchtem mit Sauerstoff angereicher-

tem Gas und einen zweiten Brenneinlass zur Aufnahme eines Kohlenwasserstoffbrennstoffs zum Verbrennen im Brenner enthält.

39. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 37, bei dem der Dampfreformer einen Brenner enthält, der einen mit dem Kathodengasauslass verbundenen ersten Brenneinlass zur Aufnahme von feuchtem mit Sauerstoff angereichertem Gas und einen zweiten Brenneinlass zur Aufnahme von schwerem Produkt aus dem ersten Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zum Verbrennen im Brenner zwecks Bereitstellung von endothermer Reaktionswärme zur Dampfreformierung des Kohlenwasserstoffbrennstoffs enthält.

40. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 33, bei dem der Reaktor einen autothermen Reformer und einen mit dem Dampfreformer verbundenen Wassergas-Shiftreaktor zur Erzeugung der zweiten Gaszufuhr enthält.

41. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 40, bei dem das Sauerstoffgaszuführungssystem ein zweites Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zum Abziehen von Sauerstoff aus Luft umfasst, wobei das zweite Rotationsdruckwechseladsorptionssystem einen ersten Einsatzgaseinlass zur Aufnahme einer Luftzufuhr und einen mit dem Kathodengaseinlass verbundenen Gasauslass zur Versorgung des Kathodenkanals mit einem mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstrom enthält, und der Reaktor einen Brenner umfasst, der einen ersten Brenneinlass zur Aufnahme von Luft und einen zweiten Brenneinlass zur Aufnahme eines mit Wasserstoffgas angereicherten Gasstroms aus dem ersten Rotationsdruckwechseladsorptionssystem zur Verbrennung des aufgenommenen Wasserstoffgases im Brenner zwecks Rückgewinnung von Wärmeenergie zur Druckbeaufschlagung der Gaszufuhr enthält.

42. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 41, bei dem mindestens eines der Rotationsdruckwechseladsorptionssysteme ein Rotationsmodul, das einen Stator und einen bezüglich des Stators drehbaren Rotor enthält, wobei der Rotor mehrere Strömungswege zur Aufnahme von Adsorptionsmaterial darin enthält, um vorzugsweise eine erste Gaskomponente als Reaktion auf zunehmenden Druck in den Strömungswegen bezüglich einer zweiten Gaskomponente aufzunehmen, und eine mit dem Rotationsmodul verbundene Verdichtungsmaschinenanlage, um Gasstrom durch die Strömungswege zum Trennen der ersten Gaskomponente von der zweiten Gaskomponente zu erleichtern, umfasst.

43. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 42, bei dem der Stator eine erste Statorventilfläche, eine zweite Statorventilfläche, mehrere erste Funktionskammern, die in die erste Statorventilfläche münden,

und mehrere zweite Funktionskammern, die in die zweite Statorventilfläche münden, enthält und der Rotor eine erste Rotorventilfläche, die mit der ersten Statorventilfläche verbunden ist, eine zweite Rotorventilfläche, die mit der zweiten Statorventilfläche verbunden ist, und mehrere in den Rotorventilflächen ausgebildete Öffnungen enthält, die mit jeweiligen Enden der Strömungswege und den Funktionskammern in Verbindung stehen.

44. Stromerzeugungssystem nach Anspruch 43, bei dem die Verdichtungsmaschinenanlage mit einem Teil der Funktionskammern verbunden ist, um den Teil der Funktionskammern auf mehreren verschiedenen jeweiligen Druckpegeln zwischen einem oberen Druck und einem unteren Druck zu halten und so einen gleichförmigen Gasstrom durch den Teil der Funktionskammern aufrechtzuerhalten.

45. Verfahren zur Erzeugung eines elektrischen Potentials, das die folgenden Schritte umfasst: Bereitstellen einer Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodenkanal, der einen Kathodengaseinlass und einen Kathodengasauslass enthält, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und Versorgen des Kathodengaseinlasses mit einem mit Sauerstoffgas angereicherten Gasstrom, wobei der Versorgungsschritt die Schritte der Versorgung einer Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung mit einer ersten Gaszufuhr zur Erzeugung eines mit Sauerstoffgas angereicherten Produktgasstroms und der Zuführung des Produktgasstroms zum Kathodengaseinlass umfasst.

46. Verfahren nach Anspruch 45, bei dem der Versorgungsschritt weiterhin den Schritt des Rückführens eines aus dem Kathodengasauslass abgegebenen Kathodengasteils zum Kathodengaseinlass umfasst.

47. Verfahren nach Anspruch 46, bei dem der Rückführungsschritt den Schritt des Zuführens des Abgasteils zur Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung als eine zweite Gaszufuhr umfasst.

48. Verfahren nach Anspruch 47, bei dem der Rückführungsschritt weiterhin den Schritt des Reinigens des Rests des abgegebenen Kathodengases umfasst.

49. Verfahren nach Anspruch 48, bei dem der Rückführungsschritt den Schritt des Zuführens des Abgasteils mit erhöhtem Druck zum Kathodengaseinlass umfasst.

50. Verfahren nach Anspruch 49, bei dem der

Rückführungsschritt weiterhin die Rückgewinnung von Abwärme aus der Brennstoffzelle zur Verbesserung der Rückgewinnung von Entspannungsenergie aus der Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung umfasst.

51. Verfahren zur Erzeugung eines elektrischen Potentials, das die folgenden Schritte umfasst: Bereitstellen einer Brennstoffzelle mit einem Anodenkanal, der einen Anodengaseinlass und einen Anodengasauslass enthält, einem Kathodenkanal, der einen Kathodengaseinlass und einen Kathodengasauslass enthält, und einem Elektrolyten, der mit dem Anoden- und dem Kathodenkanal in Verbindung steht, um einen Ionenaustausch zwischen dem Anoden- und dem Kathodenkanal zu erleichtern; und Versorgen des Anodengaseinlasses mit einem mit Wasserstoffgas angereicherten Gasstrom, wobei der Versorgungsschritt die Schritte der Versorgung einer Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung mit einer ersten Gaszufuhr zur Erzeugung eines mit Wasserstoffgas angereicherten ersten Produktgasstroms und der Zuführung des ersten Produktgasstroms zum Anodengaseinlass umfasst; und Versorgen des Kathodengaseinlasses mit einem mit Sauerstoffgas angereicherten zweiten Gasstrom.

52. Verfahren nach Anspruch 51, bei dem der Schritt des Zuführens eines ersten Gasstroms weiterhin den Schritt des Rückführens eines aus dem Anodengasauslass abgegebenen Anodengasteils zum Anodengaseinlass umfasst.

53. Verfahren nach Anspruch 52, bei dem der Rückführungsschritt weiterhin den Schritt des Zuführens des Abgasteils zur Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung als eine zweite Gaszufuhr umfasst.

54. Verfahren nach Anspruch 53, bei dem der Schritt des Zuführens eines zweiten Gasstroms die Schritte des Zuführens einer Luftzufuhr zu einer Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung zur Erzeugung eines mit Sauerstoffgas angereicherten zweiten Produktgasstroms und des Zuführens des zweiten Produktgasstroms zum Kathodengaseinlass umfasst.

55. Verfahren nach Anspruch 54, bei dem der Schritt des Zuführens eines mit Wasserstoffgas angereicherten ersten Gasstroms die Schritte des Zuführens eines Kohlenwasserstoffbrennstoffs zu einem Reformier, das Zuführen von mit Sauerstoffgas angereichertem Gas aus dem Kathodengasauslass und Reagieren des Brennstoffs mit mit Sauerstoff angereichertem Gas aus dem Kathodengasauslass zur Erzeugung der ersten Gaszufuhr umfasst.

56. Verfahren nach Anspruch 55, bei dem der Reformier einen Dampfreformier mit einer Brennkam-

mer umfasst und der Reaktionsschritt das Zuführen des Brennstoffs zur Brennkammer und das Bereitstellen von Wärmeenergie für die Brennkammer durch Verbrennen von aus der Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung als schweres Produktgas abgezogenem Tail Gas mit dem mit Sauerstoff angereichertem Gas aus dem Kathodengasauslass in der Brennkammer umfasst.

57. Verfahren nach Anspruch 55, bei dem der Reformier einen Dampfreformier umfasst, der eine Brennkammer enthält, und der Reaktionsschritt das Zuführen des Brennstoffs zur Brennkammer und Bereitstellen von Wärmeenergie für die Brennkammer durch Verbrennen von aus der Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung als schweres Produktgas abgezogenem Tail Gas mit einem Teil der Luftzufuhr in der Brennkammer und Rückgewinnen von Verbrennungswärme von der Brennkammer zur Zuführung von druckbeaufschlagter Luft zur Rotationsdruckwechseladsorptionsvorrichtung umfasst.

Es folgen 14 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

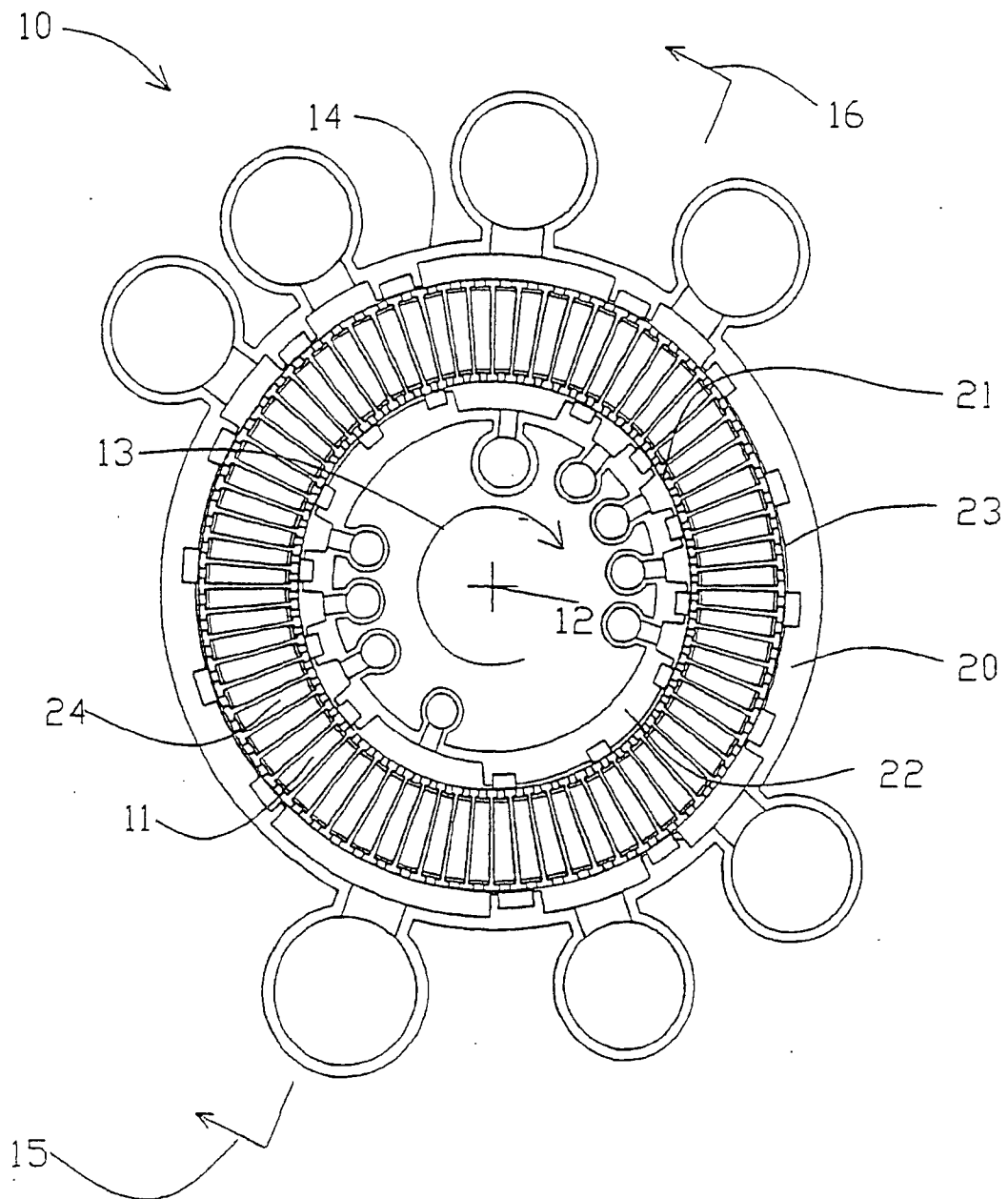


Fig. 1

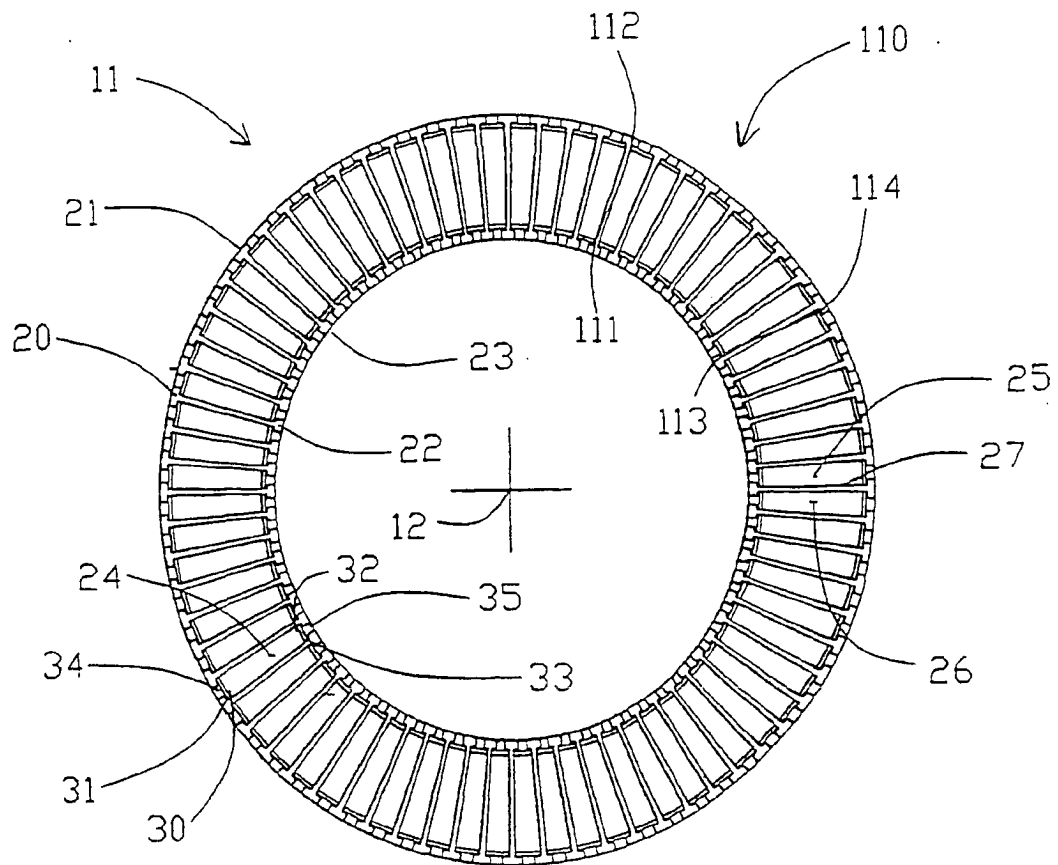


Fig. 2

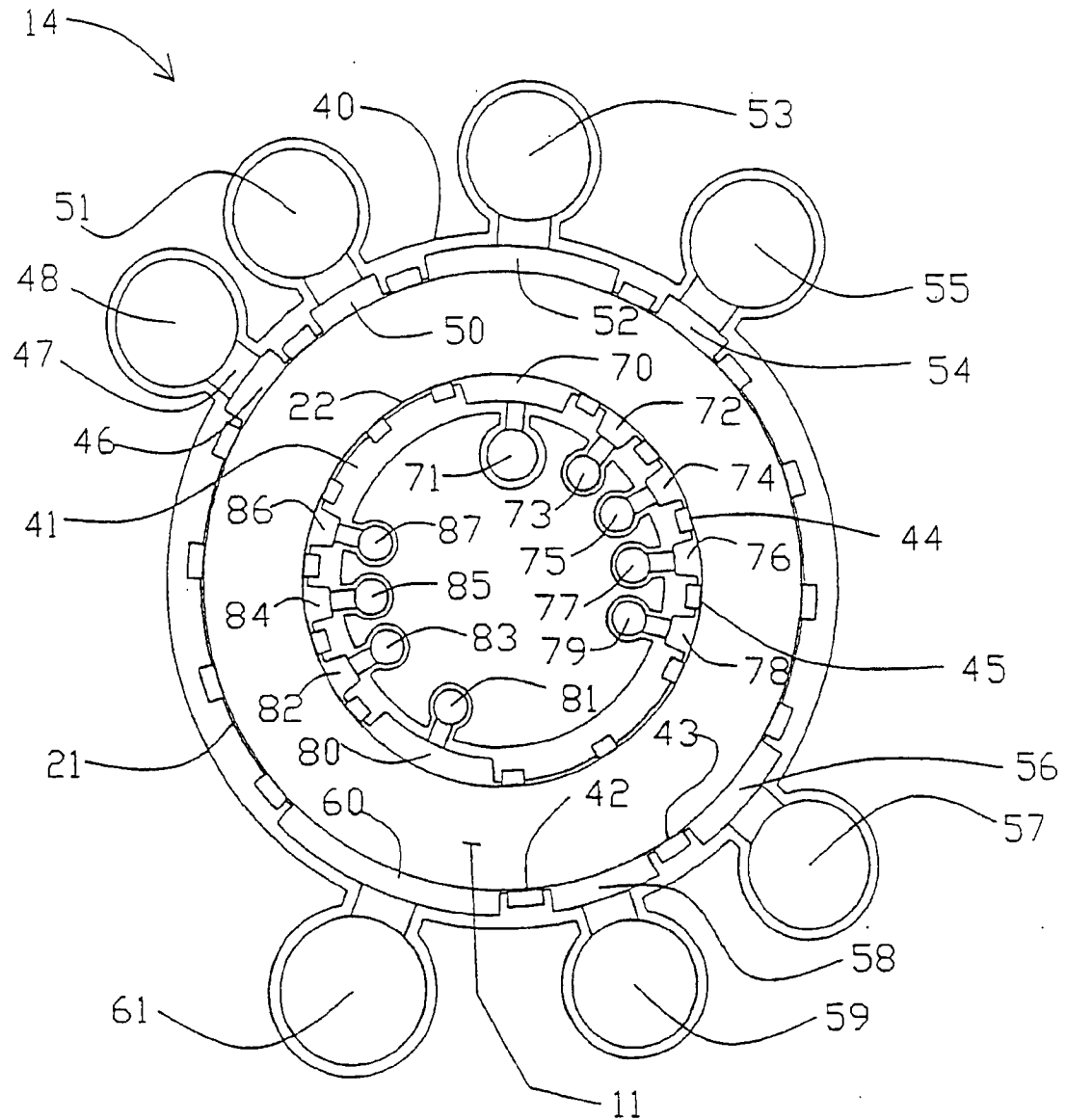


Fig. 3

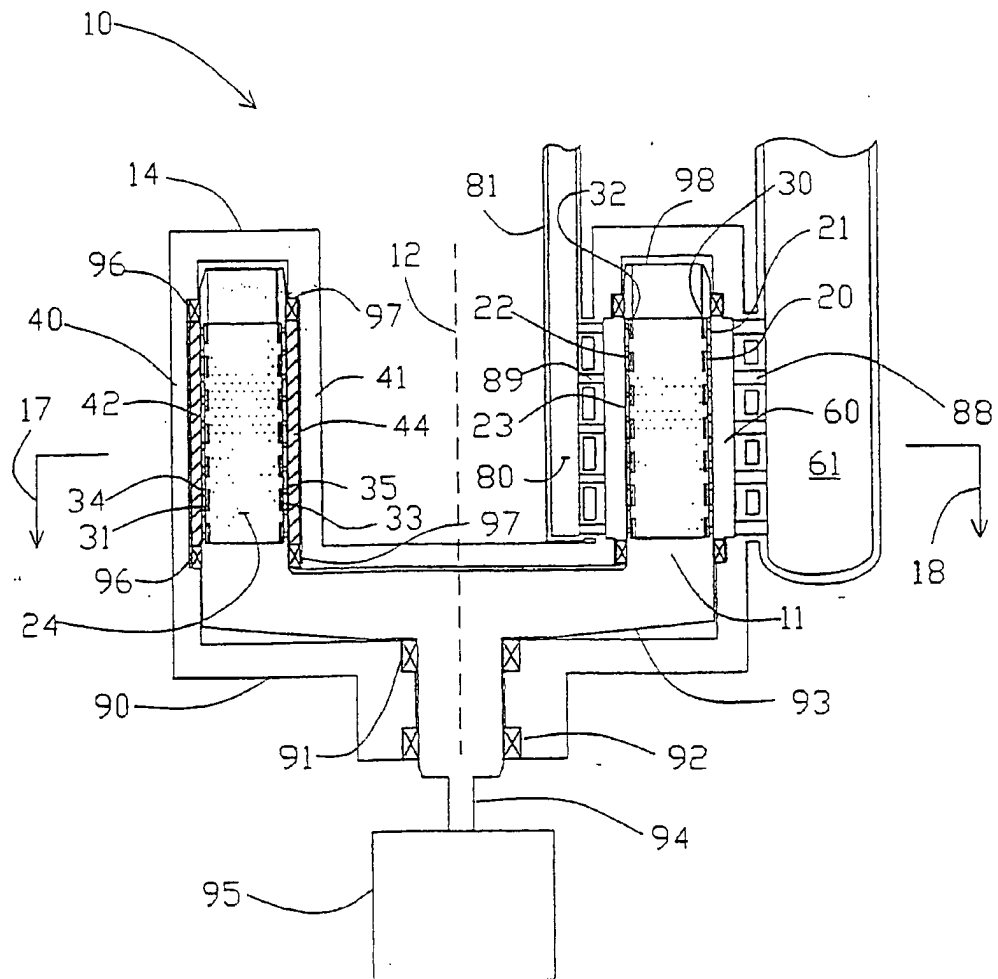


Fig. 4

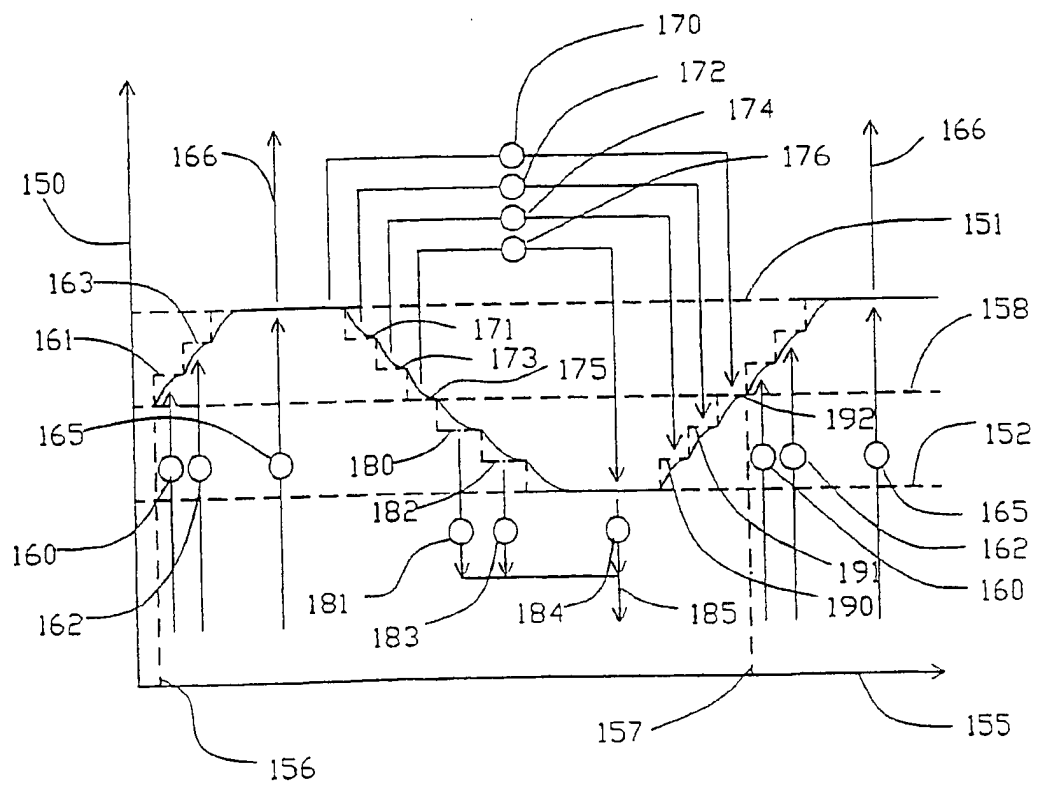


Fig. 5

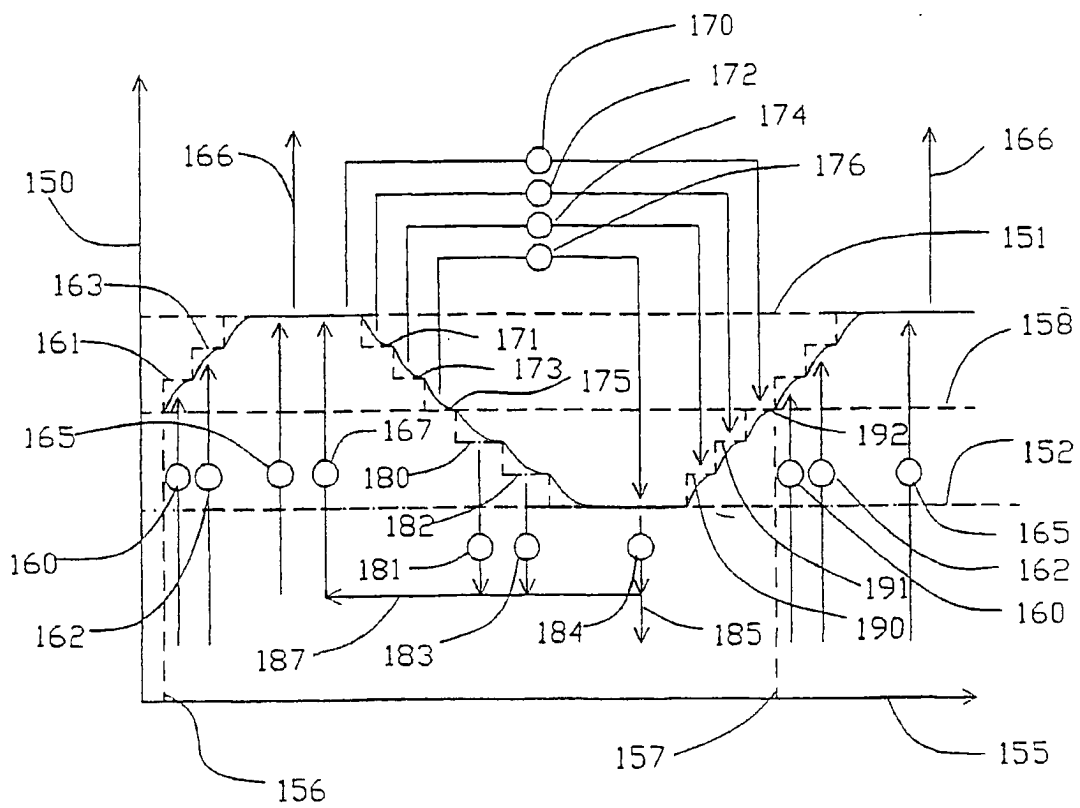


Fig. 6

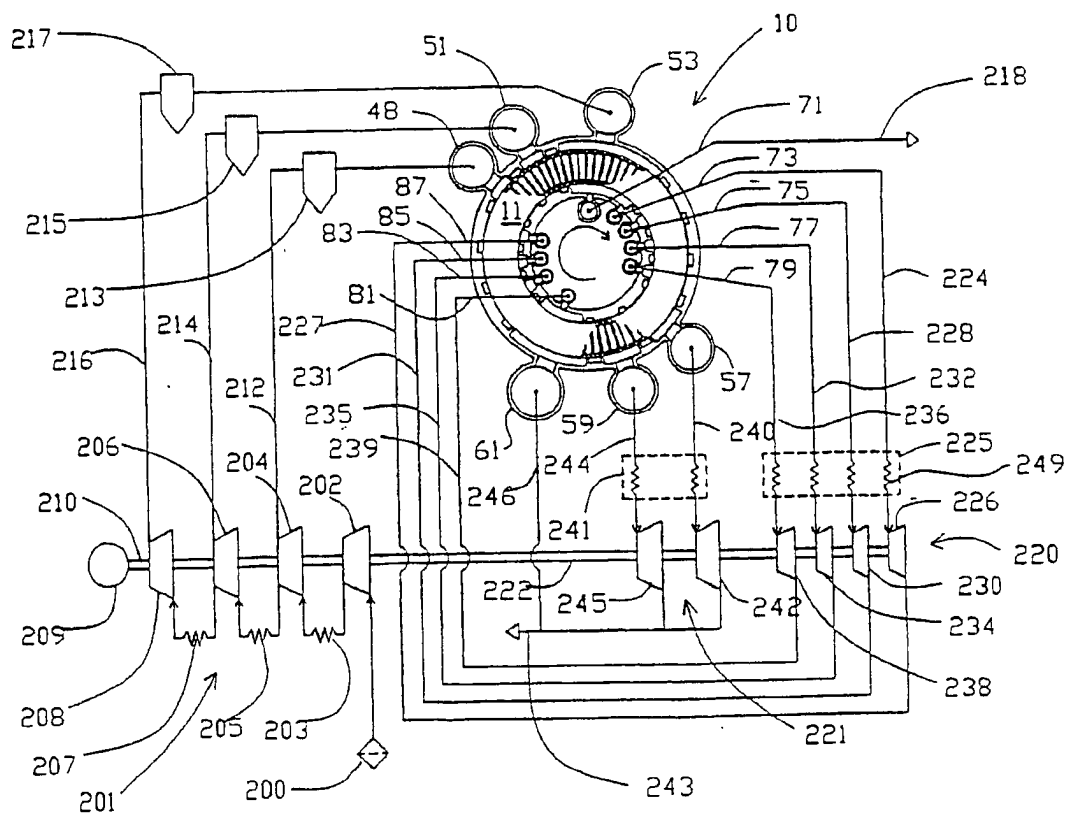


Fig. 7

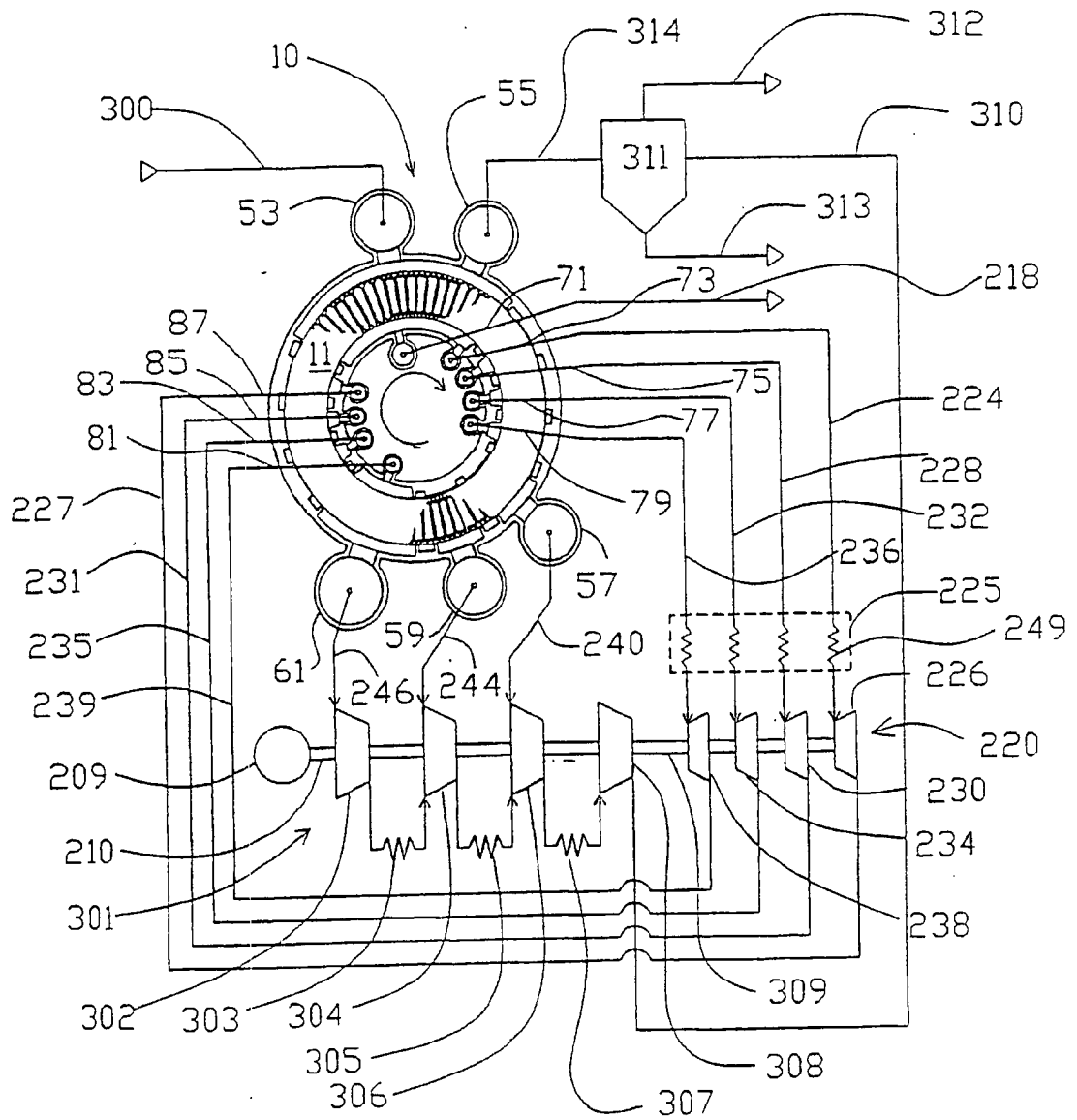


Fig. 8

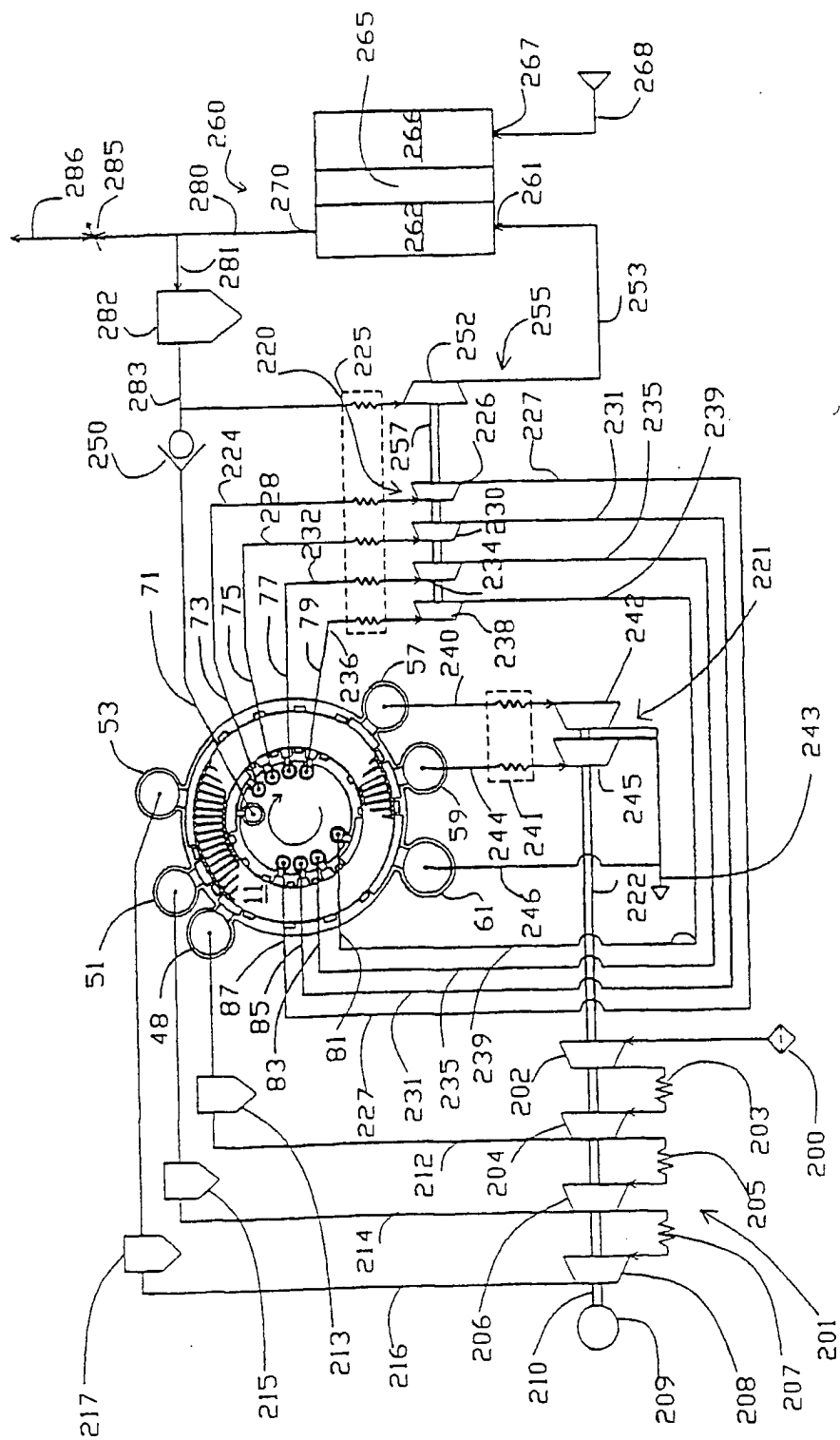
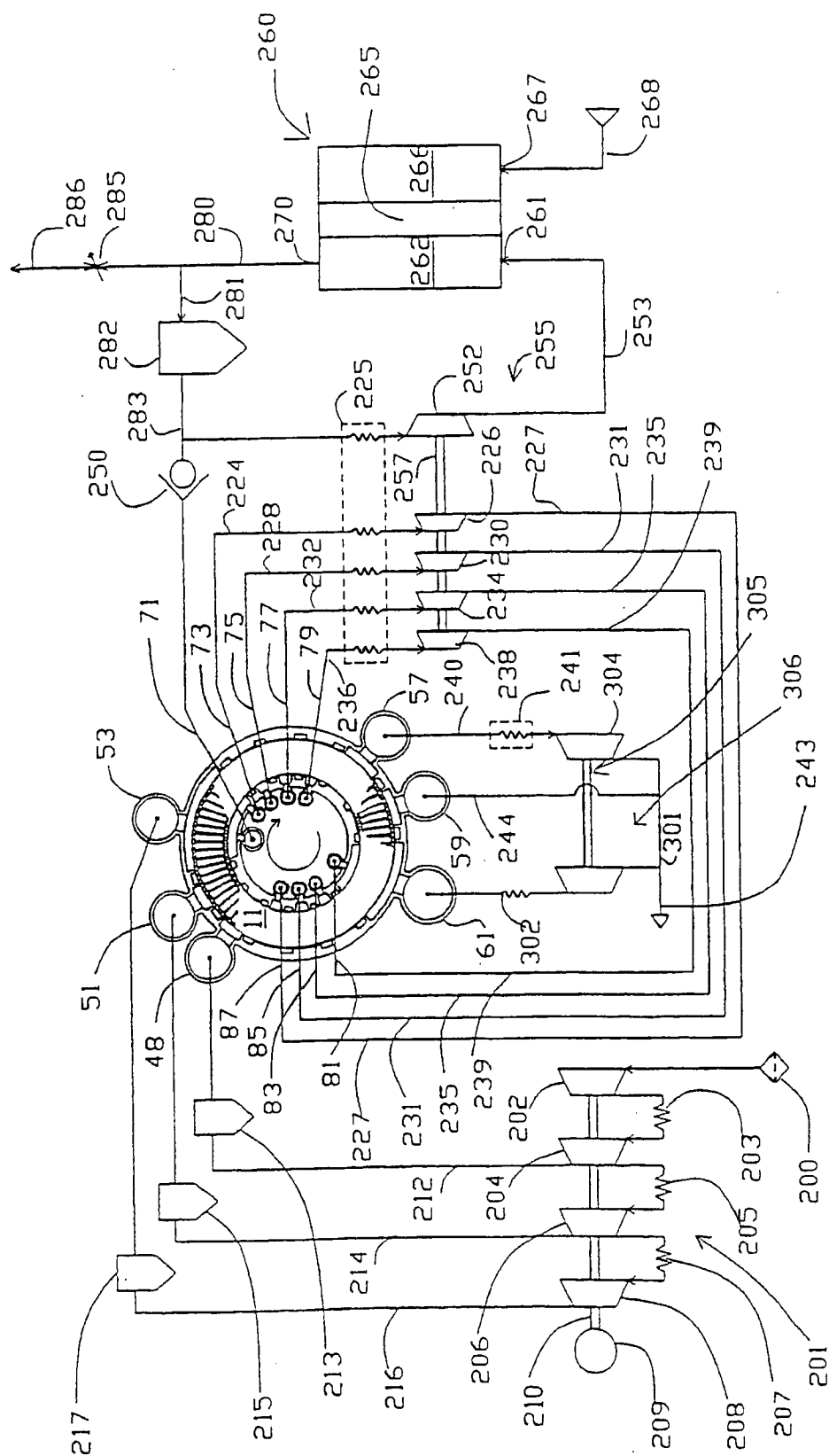


Fig. 9



19-1

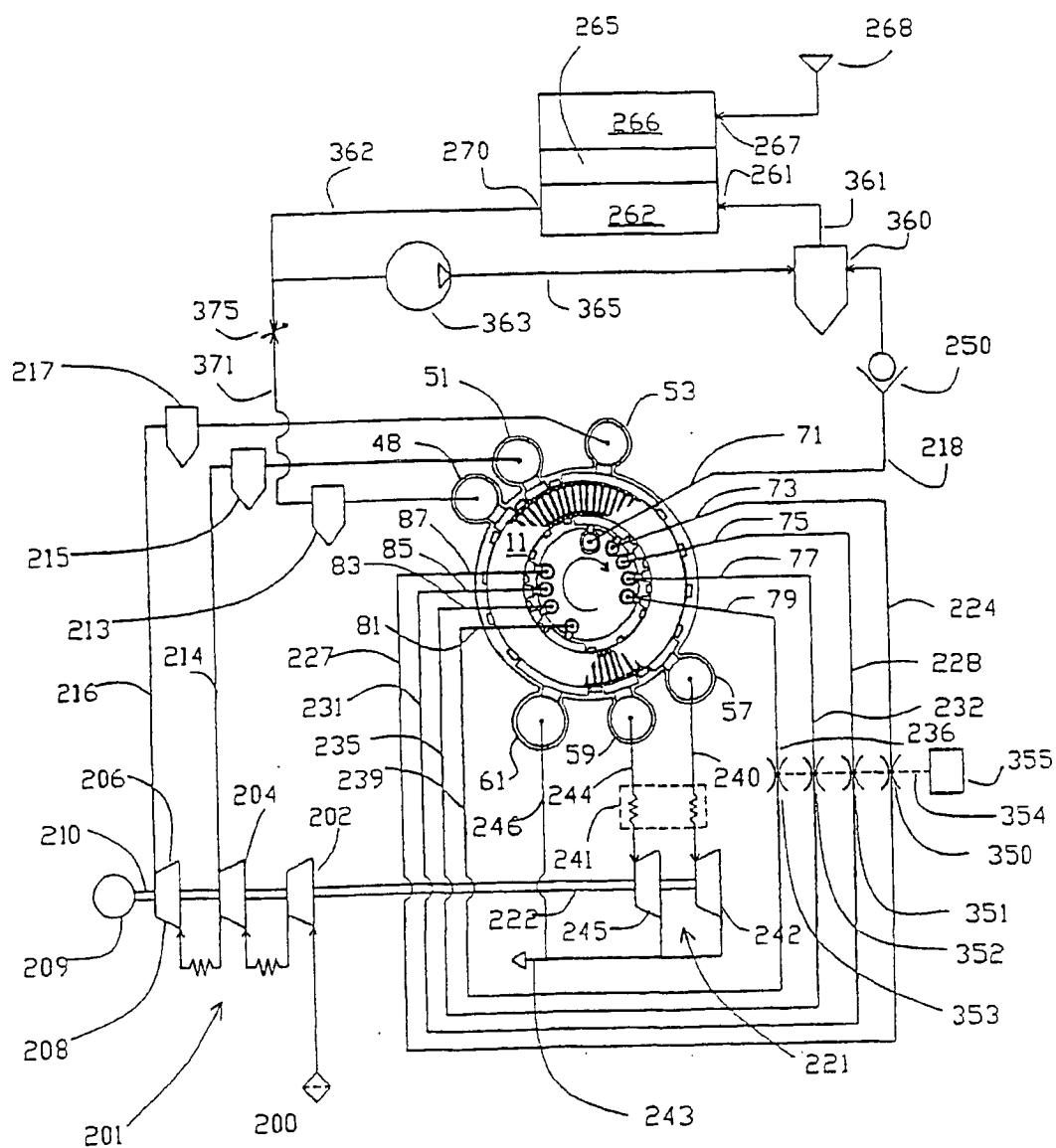


Fig. 11

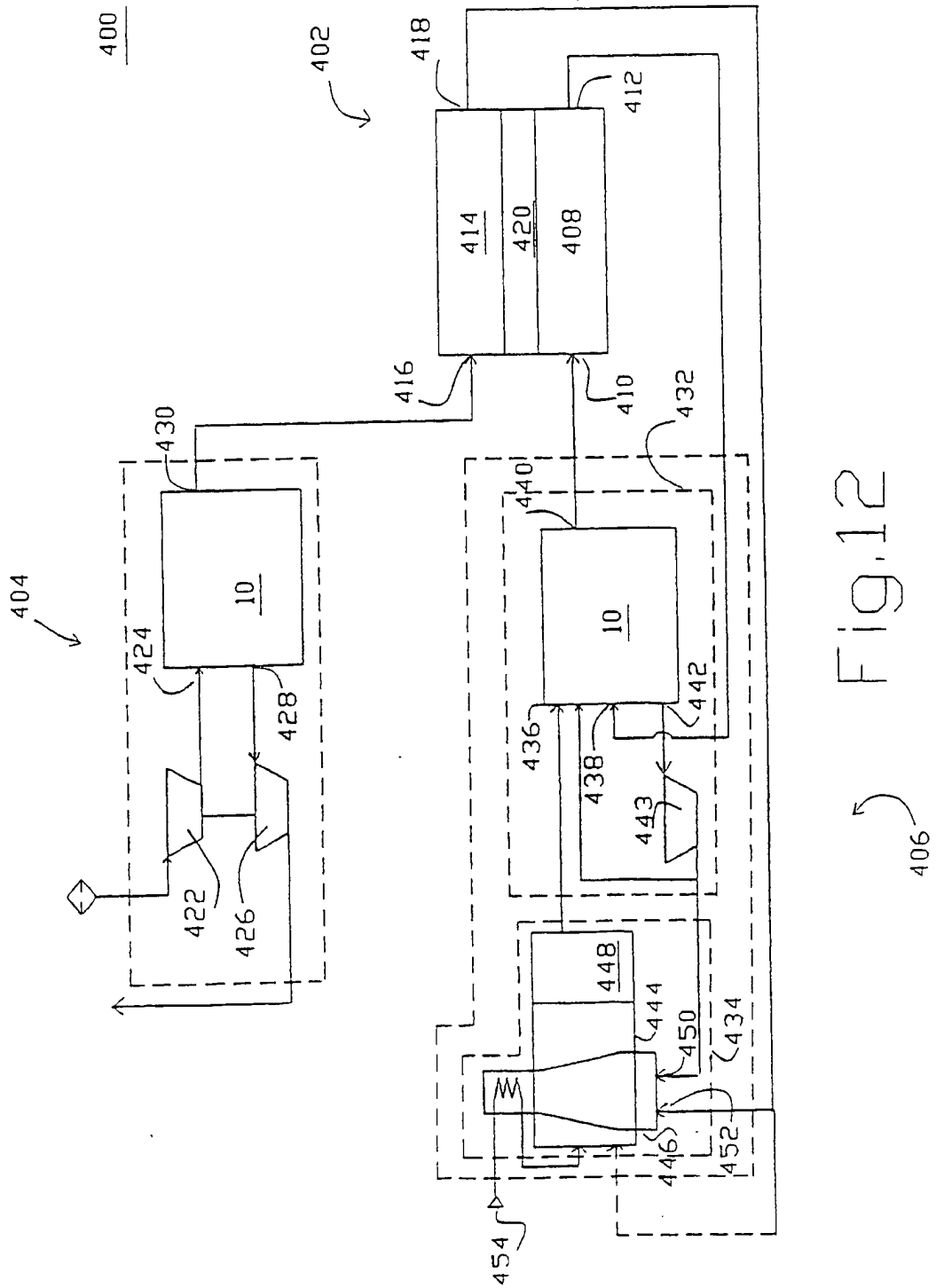


Fig.12

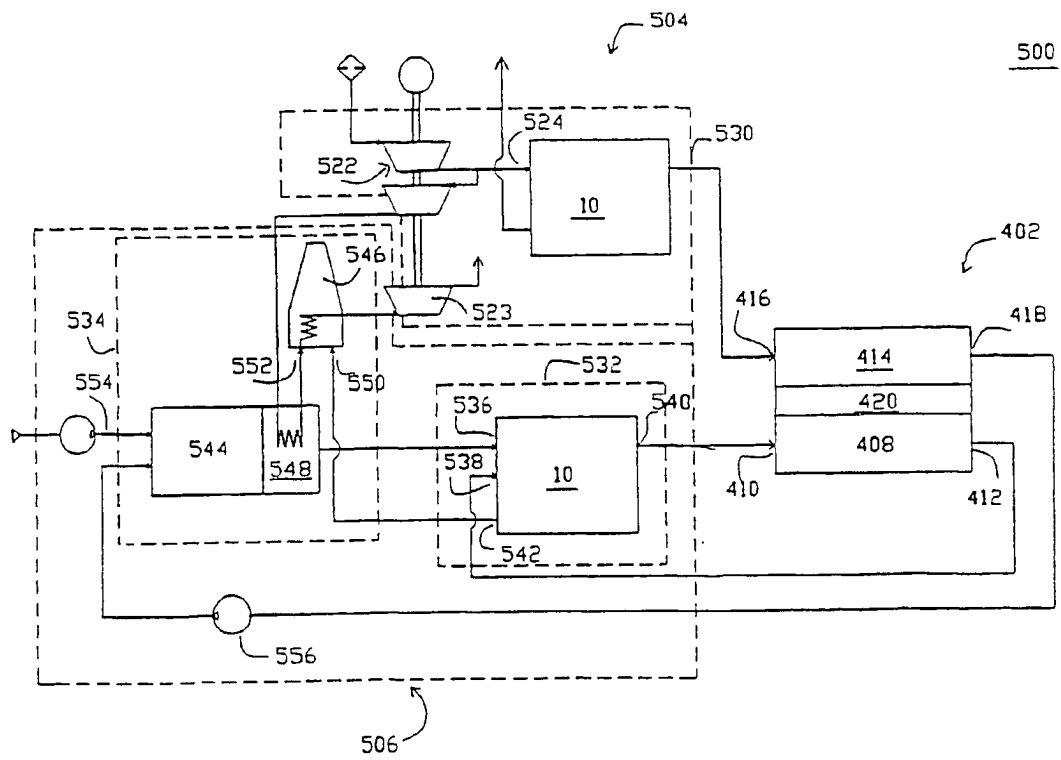


Fig.13

Figur 14

