



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 30 000 T2** 2007.09.06

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 245 054 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 30 000.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/CA00/01426**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 984 674.2**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2001/043216**

(86) PCT-Anmeldetag: **04.12.2000**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **14.06.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **02.10.2002**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **09.08.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **06.09.2007**

(51) Int Cl.⁸: **H01M 8/04** (2006.01)
H01M 8/10 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

455033 06.12.1999 US

(73) Patentinhaber:

**Ballard Power Systems Inc., Burnaby, British
Columbia, CA**

(74) Vertreter:

**WUESTHOFF & WUESTHOFF Patent- und
Rechtsanwälte, 81541 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

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

(72) Erfinder:

**BOEHM, Gustav, 88662 Ueberlingen, DE;
WILKINSON, P., David, North Vancouver, British
Columbia V7K 1W, CA; KNIGHTS, Shanna,
Burnaby, British Columbia V5G 1X2, CA;
SCHAMM, Reinhold, 88719 Stetten, DE;
FLETCHER, J., Nicholas, Vancouver, British
Columbia V6R 1A5, CA**

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM BETRIEB EINER BRENNSTOFFZELLE**

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 ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Betreiben einer Brennstoffzelle, die den Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems verbessern. Insbesondere wird der Wirkungsgrad verbessert, indem die Oxidationsmittelzuführung so geregelt wird, dass ein überschüssiger Oxidationsmittelstrom verringert wird.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Elektrochemische Brennstoffzellen wandeln Reaktanten, nämlich Brennstoff- und Oxidationsmittel-Fluidströme um, um elektrischen Strom und Reaktionsprodukte zu erzeugen. Elektrochemische Brennstoffzellen verwenden im Allgemeinen einen Elektrolyten, der sich zwischen zwei Elektroden, nämlich einer Kathode und einer Anode befindet. Die Elektroden weisen jeweils einen Elektrokatalysator auf, der sich auf der Grenzfläche zwischen dem Elektrolyten und den Elektroden befindet, um die gewünschten elektrochemischen Reaktionen zu induzieren.

[0003] Der Brennstofffluidstrom, der zur Anode geliefert wird, umfasst typischerweise Wasserstoff und kann reiner gasförmiger Wasserstoff oder ein verdünnter Wasserstoffstrom wie etwa ein Reformastrom sein. Alternativ können andere Brennstoffe wie Methanol oder Dimethylether der Anode zugeführt werden, wo solche Brennstoffe direkt oxidiert werden können. Der zur Kathode gelieferte Oxidationsmittel-Fluidstrom umfasst typischerweise Sauerstoff und kann reiner gasförmiger Sauerstoff oder ein verdünnter Sauerstoffstrom wie Luft sein.

[0004] Für eine Brennstoffzelle wird die Reaktanten-Stöchiometrie hierin als das Verhältnis des gelieferten Reaktanten zu dem Reaktanten definiert, der theoretisch erforderlich ist, um den Strom zu erzeugen, der von der Brennstoffzelle erzeugt wird. Bei herkömmlich betriebenen Brennstoffzellen, die typischerweise einen Oxidationsmittelüberschuss an die Kathode liefern, wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Allgemeinen als das Verhältnis des gelieferten Oxidationsmittels zum verbrauchten Oxidationsmittel ausgedrückt, da das Oxidationsmittel vorzugsweise an der Kathode reduziert wird. Bei geringeren Stöchiometrien ist jedoch die Reduktion des Oxidationsmittels möglicherweise nicht für den gesamten von der Brennstoffzelle erzeugten Strom verantwortlich. Andere Reaktionen wie z. B. die Reduktion von Protonen können ebenfalls an der Kathode stattfinden und zur Stromabgabe beitragen (d. h. mit der Konsequenz einer verringerten Ausgangsspannung). Während bei diesem Beispiel das Oxidationsmittel immer noch die an der Kathode reduzierte Hauptkomponente ist, kann die zur Stromabgabe theoretisch erforder-

liche Menge Oxidationsmittel größer sein als die tatsächlich gelieferte Menge Oxidationsmittel. Deshalb können Oxidationsmittel-Stöchiometrien kleiner als Eins aufrechterhalten werden, wenn andere Bestandteile als das Oxidationsmittel an der Kathode reduziert werden. Wenn das Oxidationsmittel ein verdünnter Oxidationsmittelstrom wie Luft ist, wird nur die an der Reaktion beteiligte Komponente, nämlich Sauerstoff, in der Berechnung der Stöchiometrie berücksichtigt (d. h. die Oxidationsmittel-Stöchiometrie ist das Verhältnis der gelieferten Sauerstoffmenge zur theoretisch erforderlichen Sauerstoffmenge, um die Stromabgabe der Brennstoffzelle zu erzeugen).

[0005] Wasserstoff und Sauerstoff reagieren in der Brennstoffzelle und sind besonders reaktionsfreudig miteinander. Deshalb ist eine wichtige Funktion des Membranelektrolyten in Feststoffpolymer-Brennstoffzellen, den zur Anode gelieferten Wasserstoff von dem zur Kathode gelieferten Sauerstoff getrennt zu halten. Außerdem ist die Membran protonenleitfähig und fungiert als Elektrolyt.

[0006] Der Gesamtwirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems ist eine Funktion der Gesamtausgangsleistung der Brennstoffzelle(n) und des parasitären Leistungsverbrauchs. Der gesamte parasitäre Leistungsverbrauch ist hierin definiert als die Summe der gesamten Leistung, die vom Brennstoffzellensystem im Zuge der Erzeugung elektrischen Stroms verbraucht wird. Die elektrische Nettoausgangsleistung ist die Gesamtausgangsleistung minus dem gesamten parasitären Leistungsverbrauch. Deshalb kann der Gesamtwirkungsgrad durch die Verringerung des parasitären Leistungsverbrauchs verbessert werden.

[0007] Eine Quelle parasitären Leistungsverbrauchs ist z. B. das Oxidationsmittelzufuhruntersystem, das typischerweise ein mechanisches Gerät wie einen Kompressor, einen Lüfter, eine Pumpe, ein Drehkolbengebläse oder ein entsprechendes mechanisches Gerät, das Leistung aufnimmt, um Oxidationsmittel zur Brennstoffzelle zu liefern, verwendet. Höhere Oxidationsmittel-Stöchiometrien resultieren im Allgemeinen in einem höheren parasitären Leistungsverbrauch, da im Allgemeinen mehr Leistung erforderlich ist, um mehr Oxidationsmittel zur Kathode zu liefern. Herkömmliche Brennstoffzellensysteme arbeiten typischerweise mit einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie über Zwei (2,0). Da herkömmliche Brennstoffzellensysteme mindestens doppelt so viel Sauerstoff zur Kathode liefern, wie tatsächlich erforderlich ist, um den Bedarf an elektrischer Leistung zu erfüllen, wird eine erhebliche Menge des parasitären Leistungsverbrauchs zur Lieferung von überschüssigem Sauerstoff zur Kathode verursacht. Des Weiteren arbeiten Brennstoffzellensysteme allgemein mit einem verdünnten Oxidationsmittelstrom. Ein verdünnter Oxidationsmittelstrom ist hier als ein Fluidstrom definiert, der weniger als 100% Oxidationsmit-

tel aufweist. So ist z. B. Luft ein verdünnter Oxidationsmittelstrom, der typischerweise ca. 20% Sauerstoff sowie andere Bestandteile wie Stickstoff enthält. Wenn also Luft als der verdünnte Oxidationsmittelstrom verwendet wird, wird der parasitäre Leistungsverbrauch verstärkt, da das Oxidationsmittelzufuhrsystem nicht nur den überschüssigen Sauerstoff liefern muss, sondern auch eine proportionale Menge der anderen nicht an der Reaktion beteiligten Bestandteile.

[0008] Ein Grund, warum der mit der hohen Oxidationsmittel-Stöchiometrie einhergehende parasitäre Leistungsverbrauch toleriert wird, ist, dass an der Kathode überschüssiger Sauerstoff erwünscht ist, um einen Oxidationsmittelmangel am Kathoden-Elektrokatalysator zu vermeiden. Oxidationsmittelmangel ist hierin als der Zustand definiert, in dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie kleiner als Eins ist. Ein Oxidationsmittelmangel resultiert typischerweise in einem Zustand, bei fehlendem Oxidationsmittel am Kathoden-Elektrokatalysator, der die Erzeugung molekularer Wasserstoffs aus Protonen und Elektronen an der Kathode begünstigt. In schwerwiegenden Fällen von Oxidationsmittelmangel kann die Brennstoffzelle eine negative Spannung erzeugen; dieser Zustand ist als Zellenumkehrung bekannt. Oxidationsmittelzufuhrsysteme sind typischerweise so ausgelegt, dass sie reichlich überschüssiges Oxidationsmittel bereitstellen, um die Leistung aufrechtzuerhalten, die Wahrscheinlichkeit eines Oxidationsmittelmangels und die Wahrscheinlichkeit einer Wasserstofferzeugung an der Kathode verringern, obwohl dies in dem oben genannten verstärkten parasitären Leistungsverbrauch resultiert.

[0009] Bei Brennstoffzellen tritt ein Oxidationsmittelmangel am ehesten in Zonen auf, die sich am weitesten stromabwärts des Kathodeneinlasses befinden, an dem der Oxidationsmittelstrom in die Zelle eintritt, z. B. in der Nähe des Kathodenauslasses. Eine Oxidationsmittel-Stöchiometrie, die der Brennstoffzelle einen Überschuss an Oxidationsmittel liefert, stellt für den Elektrokatalysator eine angemessene Konzentration des Oxidationsmittels über die gesamte elektrochemisch aktive Fläche der Kathode, einschließlich nahe dem Kathodenauslass, bereit.

[0010] Ein anderer Grund, warum bei herkömmlichen Brennstoffzellensystemen versucht wird, zu niedrige Oxidationsmittel-Stöchiometrien zu vermeiden, ist, dass die Temperatur in der Brennstoffzelle rasch ansteigen kann, wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu niedrig ist. Es ist im Allgemeinen wünschenswert, die Temperatur von Feststoffpolymer-Brennstoffzellen unter 100°C zu halten. Wenn die Temperatur in der Brennstoffzelle ansteigt, nimmt der parasitäre Leistungsverbrauch wegen der für das Kühlsystem höheren Last zu, was in gewissem Maße die Verringerung des parasitären Leistungsver-

brauchs bei einem Betrieb bei einer niedrigeren Oxidationsmittel-Stöchiometrie wieder aufhebt. Ein weiterer Nachteil des Betriebs eines Brennstoffzellensystems bei einer hohen Oxidationsmittel-Stöchiometrie ist, dass höhere Oxidationsmittel-Stöchiometrien im Allgemeinen höhere Drehzahlen der mechanischen Geräte erfordern, die im Oxidationsmittelzufuhrsystem verwendet werden, um den Oxidationsmittelstrom zur Kathode zu liefern. Da nunmehr Brennstoffzellensysteme für den kommerziellen Einsatz entwickelt werden, sind mechanische Eigenschaften während der geplanten Lebensdauer kommerzieller Brennstoffzellensysteme wesentliche Faktoren. Ein mechanischer Nachteil herkömmlicher Verfahren, die mit hoher Stöchiometrie arbeiten, ist, dass solche Verfahren zu verstärktem Verschleiß und häufigerer Wartung führen können. Wenn Luft das Oxidationsmittel ist, können zusätzliche Betriebskosten anfallen, da ein hoher Oxidationsmittelüberschuss auch in einem höheren Durchsatz resultiert, wodurch die Luftfilterwartung zunehmen und/oder die Filterleistung abnehmen kann.

Zusammenfassung der Erfindung

[0011] Ein Verfahren zum Betreiben eines Brennstoffzellensystems regelt die Oxidationsmittel-Stöchiometrie, um den parasitären Leistungsverbrauch zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades zu verringern, wobei zu niedrige Oxidationsmittel-Stöchiometrien vermieden werden, die eine verringerte Leistung, eine Zellenumkehr, eine Wasserstofferzeugung an der Kathode und eine verstärkte Wärmeenergieerzeugung in der Brennstoffzelle verursachen könnten. Das Brennstoffzellensystem weist ein Brennstoffzellen-Stromerzeugungsunterssystem mit mindestens einer Brennstoffzelle und ein Oxidationsmittelzufuhrsystem auf, das mindestens ein mechanisches Gerät zum Liefern eines Oxidationsmittelstroms an eine Kathode der Brennstoffzelle aufweist. Die Brennstoffzelle hat außerdem eine Anode, die mit einem Brennstoffstrom versorgt wird. Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist die Brennstoffzelle eine Feststoffpolymer-Brennstoffzelle.

[0012] Das Verfahren umfasst die Steuerung des mechanischen Geräts, um den parasitären Leistungsverbrauch zu verringern, indem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert wird, bis $dV/d(OS)$ größer ist als ein vorgegebener Wert ("PV"), wobei dV die Änderung der Zellenspannung und $d(OS)$ die Änderung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie ist (d. h. die Neigung einer Spannungskurve als Funktion der Oxidationsmittel-Stöchiometrie). Die Zellenspannung wird in Volt gemessen und die Oxidationsmittel-Stöchiometrie ist ein einheitsloses Verhältnis.

[0013] Zur Verwirklichung der Erfindung braucht der Wert von $dV/d(OS)$ nicht tatsächlich berechnet zu werden, wenn eine Beziehung zwischen $dV/d(OS)$

und einem anderen Betriebsmerkmal bekannt ist. Bei bevorzugten Ausführungsformen kann z. B. ein Betriebsmerkmal überwacht werden, das mit $dV/d(OS)$ und/oder der Oxidationsmittel-Stöchiometrie korreliert. Das Brennstoffzellensystem wird angesteuert, um Maßnahmen zu ergreifen, wenn der Wert des überwachten Betriebsmerkmals dahingehend korreliert, dass $dV/d(OS)$ gleich oder größer als PV ist. Bei einem typischen Brennstoffzellensystem wird beispielsweise während des Normalbetriebs die Stromdichte konstant gehalten, und wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert wird, korreliert eine bestimmte Zellenspannung, wenn $dV/d(OS)$ auf PV ansteigt. Das bedeutet, wenn die Zellenspannung unter eine Schwellenspannung absinkt, wird dies festgestellt, wenn $dV/d(OS)$ höher als PV ist. Dementsprechend kann ein Brennstoffzellensystem so betrieben werden, dass der parasitäre Leistungsverbrauch verringert wird, indem das Oxidationsmittel-zufuhrsystem so gesteuert wird, dass die Ausgangsspannung innerhalb eines vorgegebenen Spannungsbereichs liegt, der typischerweise einem Oxidationsmittel-Stöchiometriebereich zwischen ca. Eins und Zwei entspricht, wobei PV so gewählt wird, dass $dV/d(OS)$ an der unteren Grenze des gewählten Spannungsbereichs gleich PV ist. Der bevorzugte Bereich der Oxidationsmittel-Stöchiometrie kann sich tatsächlich entsprechend den momentan vorliegenden Betriebsbedingungen ändern. Wenn eine Brennstoffzelle z. B. im Leerlauf oder bei niedriger Leistungsabgabe arbeitet, kann eine höhere Oxidationsmittel-Stöchiometrie bevorzugt sein, um eine Wasseransammlung an der Kathode zu verhindern. Der Wert von PV kann also dynamisch sein.

[0014] Die Merkmale der Brennstoffzelle und/oder der Typ der Reaktanten können auch den bevorzugten Bereich der Oxidationsmittel-Stöchiometrie beeinflussen. Bei einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle z. B. wird typischerweise mit höheren Oxidationsmittel-Stöchiometrien gearbeitet, aber die Reaktanzufuhr kann immer noch so geregelt werden, dass ein Anstieg von $dV/d(OS)$ auf über PV verhindert wird (obwohl bei einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle PV einer höheren Stöchiometrie verglichen mit einer Brennstoffzelle entspricht, die mit Wasserstoffgas oder Reformat als Brennstoffstrom gespeist wird).

[0015] Analog korreliert eine bestimmte Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Stromdichte konstant ist und die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert wird, damit, dass $dV/d(OS)$ auf PV ansteigt. Dementsprechend können Betriebsmerkmale wie die Sauerstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom, die mit der Oxidationsmittel-Stöchiometrie korreliert, überwacht werden, um zu bestimmen, ob die Oxidationsmittel-Stöchiometrie auf einen Wert verringert wird, der damit korreliert, dass $dV/d(OS)$ ansteigt und größer als oder gleich PV wird. Die Oxidationsmittelkonzentration im Oxidationsmittelzufuhrstrom ist typi-

scherweise bekannt, aber wenn der Oxidationsmittelzufuhrstrom eine variable Oxidationsmittelkonzentration hat (z. B. wenn ein Oxidationsmittel-Anreicherungssystem verwendet wird), kann das Verfahren ferner die Überwachung und Messung der Oxidationsmittelkonzentration im Oxidationsmittelzufuhrstrom zusätzlich zur Überwachung und Messung der Oxidationsmittelkonzentration im Oxidationsmittelabluftstrom aufweisen. Alternativ kann die Oxidationsmittel-Stöchiometrie durch Überwachen und Messen eines anderen Betriebsmerkmals wie z. B. der Stromabgabe für das Brennstoffzellen-Stromerzeugungssystem bestimmt werden, das zusätzlich zur Oxidationsmittelkonzentration im Oxidationsmittelabluftstrom zur Berechnung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie herangezogen werden kann.

[0016] Der Wert von $dV/d(OS)$ nimmt im Allgemeinen zu, wenn sowohl die Oxidationsmittel-Stöchiometrie als auch die Zellenspannung abnehmen. Bei einer Ausführungsform entspricht PV einem beginnenden Oxidationsmittelmangel oder wenn durch einen Oxidationsmittelmangel ein beginnender Leistungsabfall verursacht wird. Bei einer bevorzugteren Ausführungsform entspricht PV einem Zustand, in dem ein weiteres Absinken der Oxidationsmittel-Stöchiometrie einen scharfen Abfall der Zellenausgangsspannung verursacht, z. B. wenn $dV/d(OS)$ größer ist als 0,02 V. Vorzugsweise beträgt PV zwischen 0,3 V und 7,0 V, so dass das Brennstoffzellensystem hauptsächlich dann arbeitet, wenn $dV/d(OS)$ kleiner als PV ist. Der gewählte Wert für PV steuert die Oxidationsmittel-Stöchiometrie so, dass sie im Normalbetrieb zwischen ca. Eins und Zwei und während des stationären Betriebszustands näher an ca. Eins oder einem vorgegebenen Zielwert, vorzugsweise zwischen 1 und 1,5, gehalten wird.

[0017] Bei einer bevorzugten Vorrichtung zur Verwirklichung des Verfahrens ist die Brennstoffzelle eine aus einer Mehrzahl Brennstoffzellen, die in einem Stapel angeordnet sind. Wenn das Verfahren auf den Brennstoffzellenstapel angewendet wird, kann der Sensor das Betriebsmerkmal für eine oder mehrere einzelne Brennstoffzellen und/oder für den Stapel insgesamt überwachen. Der Sensor kann also so angeordnet sein, dass er ein Betriebsmerkmal (z. B. die Oxidationsmittel- oder die Wasserstoffkonzentration) in einem Abschnitt eines Reaktantenkanals (z. B. ein interner Kathodenabluftkanal) überwacht, der sich zwischen den äußeren Stirnflächen der Stapelendplatten befindet.

[0018] Die Oxidationsmittel-Stöchiometrie wird vorzugsweise gesteuert, indem z. B. der Oxidationsmittelmassenstrom durch Regeln der Drehzahl eines mechanischen Geräts wie ein Kompressor, ein Lüfter, eine Pumpe oder ein Gebläse geregelt wird. Die Verringerung der Drehzahl des mechanischen Geräts verringert im Allgemeinen den parasitären Leis-

tungsverbrauch und die Oxidationsmittel-Stöchiometrie. Es können jedoch auch alternative Verfahren zur Steuerung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie verwendet werden, die ebenfalls den parasitären Leistungsverbrauch verringern. Wenn z. B. ein Oxidationsmittel-Anreicherungsuntersystem verwendet wird, kann die Oxidationsmittel-Stöchiometrie gesteuert werden, indem die Oxidationsmittelkonzentration im Oxidationsmittelstrom zur (zu den) Kathode(n) des Brennstoffzellen-Stromerzeugungsuntersystems erhöht oder gesenkt wird. Ein anderes Verfahren zur Steuerung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie ist die Regelung der elektrischen Stromabgabe der Brennstoffzelle, wobei eine Verringerung der Stromabgabe im Allgemeinen die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht.

[0019] Ein bevorzugtes Verfahren, das einen Wasserstoffsensor verwendet (das Wasserstoffsensorverfahren) umfasst das:

- (a) Überwachen eines Kathodenabluftstroms stromabwärts der Kathode, um die Wasserstoffgaskonzentration zu erfassen; und
- (b) Verringern der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffgaskonzentration geringer ist als eine erste Schwellenkonzentration.

[0020] Das Wasserstoffsensorverfahren kann ferner die Erhöhung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie aufweisen, wenn die Wasserstoffkonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration (z. B. 20 ppm Wasserstoff), die mit Betriebsbedingungen korreliert, die auf einen tatsächlichen oder möglichen Oxidationsmittelmangel hinweisen. Die erste Schwellenkonzentration kann z. B. der niedrigere Detektionsgrenzwert des Wasserstoffsensors sein, der zur Überwachung des Kathodenabluftstroms dient. Die zweite Schwellenkonzentration ist höher als die erste Schwellenkonzentration. Wenn die Wasserstoffkonzentration zwischen der ersten und zweiten Schwellenkonzentration liegt, ergreift die Steuerung keinerlei Maßnahmen, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu regeln.

[0021] Ein Problem bei der Messung der Wasserstoffkonzentration im Kathodenablaufstrom zur Detektion eines Oxidationsmittelmangels ist, dass der Oxidationsmittelmangel nicht die einzige Ursache für an der Kathode detektiertes Wasserstoffgas ist. Wenn der Brennstoff z. B. Wasserstoff enthält, können sich in der Membran oder in den Dichtungen Löcher oder Risse bilden, die den Reaktanten einen Wechsel von der Anodenseite zur Kathodenseite und umgekehrt ermöglichen. Wenn ein ausgeprägter Wechsel der Reaktanten detektiert wird, besteht die herkömmliche Reaktion im Abschalten der Brennstoffzelle, so dass sie instandgesetzt oder ausgetauscht werden kann. Ein Brennstoff-Crossover und Oxidationsmittelmangel können beide zu einer verringerten Leistung der Brennstoffzelle führen, aber

die Detektion eines Zustands erfordert eine Reaktion, die verschieden ist von der Reaktion bei Vorliegen des anderen Zustands. Bei einem Oxidationsmittelmangel, durch den an der Kathode Wasserstoff erzeugt wird, ist es im Allgemeinen erforderlich, die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu erhöhen, während bei einem Brennstoff-Crossover, sofern er stark ausgeprägt ist, die Brennstoffzelle wahrscheinlich abgeschaltet werden muss. Damit angemessene Maßnahmen ergriffen werden können, ist es deshalb wünschenswert, dass die Steuerung zwischen einem Oxidationsmittelmangel und einem Crossover des Brennstoffs, wenn dieser Wasserstoff enthält, zu unterscheiden vermag. Die folgenden Ausführungsformen des Wasserstoffsensorverfahrens stellen Vorgehensweisen bereit, um zwischen Oxidationsmittelmangel und Brennstoff-Crossover zu unterscheiden.

[0022] Das Wasserstoffsensorverfahren kann ferner Schritte aufweisen, um die Wasserstoffgaskonzentration im Kathodenabluftstrom zu verringern, wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine zweite Konzentrationsschwelle, wobei die Schritte den Vergleich des Oxidationsmittelmassenstroms mit einem maximalen gewünschten Massenstrom aufweisen; und

(a) wenn der Oxidationsmittelmassenstrom kleiner ist als der maximale erwünschte Massenstrom, ein Erhöhen des Oxidationsmittelmassenstroms (d. h. wenn die Erhöhung des Oxidationsmittelmassenstroms in der Detektion von weniger Wasserstoff an der Kathode resultiert, bestätigt dies, dass der Oxidationsmittelmangel wahrscheinlich die Ursache für die Detektion von Wasserstoff war; wenn Oxidationsmangel nicht die Ursache für den Wasserstoff an der Kathode ist, nimmt der Oxidationsmittelmassenstrom rasch auf den gewünschten maximalen Massenstrom zu, und die Steuerung bestimmt, dass Brennstoff-Crossover die wahrscheinliche Wasserstoffquelle ist); und

(b) wenn der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer als oder gleich groß wie der maximale gewünschte Massenstrom ist, Beenden des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine dritte Konzentrationsschwelle, die größer ist als die erste und zweite Konzentrationsschwelle (d. h. da der Oxidationsmittelmassenstrom bereits auf dem gewünschten Maximum liegt oder dieses überschreitet, ist der Oxidationsmittelmangel nicht die wahrscheinliche Ursache für den Wasserstoff im Kathodenablaufstrom; da die Wasserstoffkonzentration den dritten Schwellenwert überschreitet, deutet dies darauf hin, dass eine übermäßige Brennstoffmenge durch Leckstellen zwischen Anode und Kathode entweicht); und

(c) Erzeugen eines Warnsignals und Fortsetzen des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn die Wasserstoffgaskonzentration niedriger ist als die dritte

Konzentrationschwelle (d. h. der Wert der dritten Schwelle ist so gewählt, dass das Brennstoffzellensystem sicher betrieben werden kann, wenn die Wasserstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom geringer als die dritte Schwelle ist).

[0023] Das Wasserstoffsensorverfahren kann ferner das kontinuierliche Überwachen des Kathodenabluftstroms auf die Wasserstoffgaskonzentration und das Bestimmen, ob die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt oder abnimmt aufweisen, und wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration, weist das Verfahren ferner auf:

Aufrechterhalten einer im Wesentlichen konstanten Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffkonzentration abnimmt; und
Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffkonzentration zunimmt.

[0024] Zusätzlich zur Überwachung, ob die Wasserstoffkonzentration zu- oder abnimmt, kann das Verfahren außerdem zusätzliche Schritte aufweisen, wenn die Wasserstoffkonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration, um zu bestimmen, ob die Ursache für den Wasserstoff ein Oxidationsmittelmangel oder Brennstoff-Crossover ist. Die zusätzlichen Schritte können z. B. umfassen:

Messen der Brennstoffzellenspannung und Vergleichen mit einem Spannungsschwellenwert (bei einer Ballard® MK V Brennstoffzelle könnte der Spannungsschwellenwert z. B. 100 mV betragen); und
Senken des Brennstoffstromdrucks, wenn die Brennstoffzellenspannung den Spannungsschwellenwert überschreitet und die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt (da in diesem Fall die Spannung den Schwellenwert überschreitet, ist der Grund für die zunehmende Wasserstoffkonzentration wahrscheinlich ein Leck; um die Wirkung des Lecks zu mildern, weist das Verfahren vorzugsweise die Regelung des Brennstoffstromdrucks auf, so dass er niedriger oder gleich hoch wie der Druck des Oxidationsmittelstroms ist);

Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Brennstoffzellenspannung niedriger ist als der Spannungsschwellenwert, die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt und der Oxidationsmittelmassenstrom kleiner ist als das gewünschte Maximum (da in diesem Fall der Oxidationsmittelmassenstrom kleiner ist als das gewünschte Maximum, kann der Grund für die zu niedrige Zellenspannung und das Vorhandensein von Wasserstoffgas ein Oxidationsmittelmangel sein, und die Steuerung versucht durch Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie diesen Zustand zu korrigieren); und

Verringern des Brennstoffstromdrucks, wenn die Brennstoffzellenspannung niedriger ist als der Spannungsschwellenwert, die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt und der Oxidationsmittelmassenstrom größer oder gleich dem gewünschten Maximum ist

(in diesem Fall kann die niedrige Zellenspannung durch Oxidationsmittelmangel oder ein Brennstoffleck von der Anode zur Kathode verursacht sein; da der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer als oder gleich dem gewünschten Maximum ist, wird der Druck des Brennstoffstroms verringert, wodurch die Brennstoffzellenstromabgabe und der Sauerstoffverbrauch an der Kathode verringert werden, um dem Oxidationsmittelmangel entgegenzuwirken und die Einflüsse eventueller Leckstellen zu verringern).

[0025] Weitere zusätzliche Schritte können erfolgen, um zu bestätigen, ob die detektierte Wasserstoffgaskonzentration durch Oxidationsmittelmangel oder Brennstoff-Crossover verursacht wird. Das Verfahren kann z. B. das Regeln des Fluiddrucks des Oxidationsmittel- und Brennstoffstroms aufweisen, um eine Druckdifferenz zwischen dem Oxidationsmittel- und dem Brennstoffstrom zu erhöhen oder zu verringern, um zur Bestimmung beizutragen, ob der an der Kathode gemessene Wasserstoff durch ein Leck oder durch Oxidationsmittelmangel verursacht wird. Wenn die Änderung der Druckdifferenz einen deutlichen Einfluss auf die gemessene Wasserstoffkonzentration hat, dann kann darauf geschlossen werden, dass ein erhebliches Problem durch Wasserstoff-Crossover vorliegt.

[0026] Bei jedem der oben beschriebenen Verfahren wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie typischerweise durch Steuern der Drehzahl des Oxidationsmittel-Kompressors oder des Gebläses eingestellt. Es können jedoch auch andere Verfahren zum Ändern der Oxidationsmittel-Stöchiometrie angewendet werden wie das Einstellen der Oxidationsmittelkonzentration im Oxidationsmittelzufuhrstrom oder das Ändern der elektrischen Stromabgabe der Brennstoffzelle, ohne den Massenstrom des Oxidationsmittelzufuhrstroms zu ändern. Wenn der Oxidationsmittelmassenstrom eingestellt wird, wird er typischerweise um einen festen Betrag oder einen festen Prozentsatz des momentanen Oxidationsmittelmassenstroms geändert. Alternativ kann die Oxidationsmittel-Stöchiometrie eingestellt werden, indem der Oxidationsmittelmassenstrom um einen Betrag geändert wird, der von der Größe der detektierten Wasserstoffgaskonzentration abhängt. Die Steuerung kann z. B. so programmiert sein, dass sie die Oxidationsmittel-Stöchiometrie um einen größeren Betrag verringert, wenn ein hoher Sauerstoffüberschuss detektiert wird, verglichen mit der Detektion eines nur geringen Sauerstoffüberschusses.

[0027] Das Verfahren zur Steuerung des Oxidationsmittelzufuhrunternehmens zum Verringern des parasitären Leistungsverbrauchs kann die Kalibrierung eines Oxidationsmittelzufuhrunternehmens für eine Brennstoffzelle aufweisen. Das Kalibrierverfahren kann z. B. umfassen:

(a) Betreiben der Brennstoffzelle bei einer be-

stimmten elektrischen Stromabgabe;
 (b) Liefern eines Oxidationsmittelstroms an die Kathode der Brennstoffzelle;
 (c) Einstellen der Betriebsdrehzahl eines mechanischen Zuführgeräts für das Oxidationsmittel;
 (d) Messen eines Betriebsmerkmals, das $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ entspricht; und
 (e) Aufzeichnen der Betriebsdrehzahl als die gewünschte Betriebsdrehzahl für die betreffende elektrische Stromabgabe, wenn $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ gleich ist einem vorgegebenen Wert.

[0028] Das Kalibrierverfahren kann für eine Mehrzahl elektrischer Stromabgaben wiederholt werden, so dass die gewünschte Betriebsdrehzahl des mechanischen Zuführgeräts für das Oxidationsmittel bestimmt und in einer Nachschlagetabelle für zahlreiche elektrische Leistungsanforderungen aufgezeichnet werden kann. Die gewünschte Betriebsdrehzahl kann dann anhand der Betriebsdrehzahl in der Nachschlagetabelle bestimmt werden, die der momentanen elektrischen Leistungsanforderung entspricht.

[0029] Ein Vorteil des Kalibrierverfahrens besteht darin, dass es während der gesamten Betriebslebensdauer der Brennstoffzelle zur Anpassung an Änderungen der Brennstoffzelle im Verlauf der Zeit angewendet werden kann. So können z. B. manche Eigenschaften über die Zeit eine Verschlechterung erfahren, wodurch sich die stöchiometrischen Anforderungen im Laufe der Betriebslebensdauer der Brennstoffzelle ändern können.

[0030] Das vorliegende Verfahren und die vorliegende Vorrichtung steuern außerdem die Menge des an einen Brennstoffzellenstapel gelieferten Oxidationsmittels und verringern Mängel, die durch die Überversorgung mit Oxidationsmittel verursacht werden. Vorzugsweise steuert das Verfahren auch das Oxidationsmittelzufuhruntersystem zur Erhöhung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, um die Bedingungen bei Oxidationsmittelmangel abzuwenden. Dementsprechend wird ein Verfahren zum Betreiben einer Brennstoffzelle bereitgestellt, mit dem erfasst wird, wann die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert oder erhöht werden kann und wann der Oxidationsmittelfluss vollständig unterbrochen werden sollte.

[0031] Das vorliegende Verfahren kann auch zum Betreiben einer Brennstoffzelle und zur weiteren Verringerung des parasitären Leistungsverbrauchs angewendet werden, indem es die Brennstoffzufuhr regelt, um einen übermäßigen Brennstofffluss zu verringern. Dieselben Prinzipien, die auf das vorliegende Verfahren zur Regelung der Oxidationsmittelzufuhr zutreffen, gelten auch für ein Verfahren zur Regelung der Brennstoffzufuhr. Brennstoffzellen verwenden typischerweise ein mechanisches Gerät wie

z. B. einen Kompressor oder eine Pumpe, um den Brennstoff zu der (den) Anode(n) der Brennstoffzelle(n) zu liefern. Deshalb kann der parasitäre Leistungsverbrauch durch die Verringerung der Brennstoff-Stöchiometrie verringert werden, um die zu der (den) Anode(n) der Brennstoffzelle(n) gelieferte überschüssige Brennstoffmenge und die vom Kompressor geleistete Arbeit zu verringern. Eine Verringerung der Brennstoff-Stöchiometrie verursacht im Allgemeinen eine Zunahme von $dV/d(\text{Brennstoff-Stöchiometrie})$. Gemäß dem vorliegenden Verfahren wird die Brennstoff-Stöchiometrie durch Verringern der Brennstoff-Stöchiometrie innerhalb eines vorgegebenen Bereichs gehalten, bis $dV/d(\text{Brennstoff-Stöchiometrie})$ einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet. Der vorgegebene Bereich und Schwellenwert hängen von den jeweiligen Eigenschaften und Betriebsbedingungen jeder bestimmten Brennstoffzelle oder jedes Brennstoffstapels ab. Der vorgegebene Bereich kann empirisch z. B. unter Berücksichtigung dieser Faktoren bestimmt werden.

[0032] Im Allgemeinen ist es wünschenswert, die Reaktanten-Stöchiometrie zu verringern, bis $dV/d(\text{Reaktanten-Stöchiometrie})$ größer ist als ca. 0,02 V. Bevorzugter beträgt der vorgegebene Wert für $dV/d(\text{Reaktanten-Stöchiometrie})$ zwischen 0,30 und 7,0 V. Der Spannungsabfall ist bei Brennstoffmangel im Allgemeinen deutlicher ausgeprägt als bei Oxidationsmittelmangel, und dieser Effekt kann genutzt werden, um zwischen Oxidationsmittel- und Brennstoffmangel besser unterscheiden zu können.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0033] Die Vorteile, die Beschaffenheit und weitere Merkmale der Erfindung erschließen sich aus der nachfolgenden Beschreibung zusammen mit den beiliegenden Zeichnungen, in denen:

[0034] [Fig. 1](#) ein schematisches Diagramm eines Brennstoffzellensystems mit einem Detektor zum Detektieren eines Oxidationsmittelmangels an der Kathode und einer Steuerung zum Verarbeiten von Informationen vom Detektor und zur Steuerung des Oxidationsmittelzufuhruntersystems ist, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu erhöhen oder zu verringern;

[0035] [Fig. 2A](#), [Fig. 2B](#) und [Fig. 2C](#) grafische Darstellungen experimenteller Daten sind, die verdeutlichen, welche Wirkung die Oxidationsmittel-Stöchiometrie auf Betriebsmerkmale wie Ausgangsspannung, erzeugte Wärme und $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ hat. [Fig. 2A](#) ist eine Grafik der Brennstoffzellenausgangsspannung als Funktion der Oxidationsmittel-Stöchiometrie für eine Feststoffpolymer-Brennstoffzelle, die im Normalbetrieb mit einer Stromdichte von 500 A/Quadratfuß (ca. 540 mA/cm²) arbeitet. [Fig. 2B](#) ist eine Grafik der Brennstoffzellen-

ausgangsspannung und $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ als Funktion der Oxidationsmittel-Stöchiometrie für das gleiche Brennstoffzellen-Experiment wie in [Fig. 2A](#), [Fig. 2C](#) ist eine Grafik von $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ als Funktion der Oxidationsmittel-Stöchiometrie für einen Brennstoffzellenstapel aus vier Brennstoffzellen;

[0036] [Fig. 3A](#), [Fig. 3B](#) und [Fig. 4](#) bis [Fig. 12](#) Ablaufdiagramme verschiedener bevorzugter Ausführungsformen des vorliegenden Verfahrens zum Betreiben einer Brennstoffzelle und zum Regeln der Oxidationsmittel-Stöchiometrie sind. Die Ablaufdiagramme der [Fig. 3A](#), [Fig. 3B](#) und [Fig. 4](#) bis [Fig. 12](#) zeigen ein Verfahren zum Einstellen des Oxidationsmittelmassenstroms zur Einstellung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie. Bei diesen Ausführungsformen kann der Oxidationsmittelmassenstrom auch als Reaktion auf Änderungen der Stromabgabe geändert werden, wobei das dargestellte Verfahren zum Einstellen des Oxidationsmittelmassenstroms und damit der Oxidationsmittel-Stöchiometrie dient, um einen Oxidationsmittelmangel zu vermeiden und parasitäre Leistungsverluste im Zusammenhang mit der Lieferung überschüssigen Oxidationsmittels zu verringern. Das Ablaufdiagramm der [Fig. 12](#) zeigt ein Verfahren zum Kalibrieren eines Brennstoffzellensystems zum Bestimmen des gewünschten Oxidationsmittelmassenstroms, um eine bestimmte Stromabgabe bei einer vorgegebenen Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu erzeugen.

Detaillierte Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen

[0037] [Fig. 1](#) ist ein schematisches Diagramm des Brennstoffzellen-Stromerzeugungsunter-systems, des Oxidationsmittelzufuhrunter-systems und des Brennstoffzufuhrunter-systems eines Brennstoffzellensystems. Das Brennstoffzellen-Stromerzeugungsunter-system weist einen Brennstoffzellenstapel **100** mit mehreren Brennstoffzellen **101** auf, die zwischen Endplatten **102** und **103** angeordnet sind. Ferner weist das Brennstoffzellen-Stromerzeugungsunter-system einen Sensor **104** auf. Im Betrieb des Brennstoffzellenstapels **100** misst der Sensor **104** ein Betriebsmerkmal, das mit $dV/d(OS)$ korreliert. Wenn der Brennstoffzellenstapel **100** z. B. bei einer konstanten Stromdichte arbeitet, kann der Sensor **104** ein Betriebsmerkmal messen, das die Oxidationsmittel-Stöchiometrie oder die Zellenspannung betrifft, oder ein Merkmal, das typischerweise erfasst wird, wenn ein Oxidationsmittelmangel an der Kathode der Brennstoffzelle auftritt.

[0038] Der Sensor **104** gibt ein Signal an die Steuerung **105** aus, die das Signal verarbeitet, um zu bestimmen, ob $dV/d(OS)$ innerhalb eines gewünschten Betriebsbereichs liegt und ob die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verstellt werden sollte, so dass

$dV/d(OS)$ wieder in den gewünschten Betriebsbereich gebracht wird. Die Oxidationsmittel-Stöchiometrie kann z. B. erhöht werden, wenn das gemessene Betriebsmerkmal auf eine Oxidationsmittel-Stöchiometrie und/oder das Vorliegen von Bedingungen an der Kathode hinweist, die einen tatsächlichen oder potentiellen Oxidationsmittelmangel angeben. Vorzugsweise verhindert der gewünschte Betriebsbereich jeglichen Oxidationsmittelmangel an der Kathode, durch den die Brennstoffzelle daran gehindert wird, die gewünschte Stromabgabe zu erzeugen.

[0039] Wenn das vom Sensor **104** überwachte Betriebsmerkmal die Konzentration eines Gases im Kathodenabluftstrom ist, kann der Sensor **104** ein Sensorelement aufweisen, das im Kathodenabluftkanal so angeordnet ist, dass es dem Kathodenabluftstrom ausgesetzt ist. Der Abschnitt des Kathodenabluftkanals, in dem sich das Sensorelement befindet, kann ein Krümmer oder ein Fluidkanal im Innern des Brennstoffzellenstapels **100** oder im Kathodenabluftkanal **116** sein.

[0040] Bei einer Ausführungsform wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie geregelt, indem der Sensor **104** zum Messen eines Betriebsmerkmals verwendet wird, das mit der Oxidationsmittel-Stöchiometrie korreliert. Bei einer anderen Ausführungsform erfasst der Sensor **104** ein Betriebsmerkmal, das auf einen Oxidationsmittelmangel an der Kathode hinweist, so dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie so geregelt werden kann, dass die Menge des an den Brennstoffzellenstapel **100** gelieferten überschüssigen Oxidationsmittels verringert wird, während ein schädlicher Oxidationsmittelmangel an den Kathoden der Brennstoffzellen verhindert wird (d. h. bei dieser Ausführungsform erhöht die Steuerung die Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn der Sensor **104** einen tatsächlichen oder potentiellen Oxidationsmittelmangel detektiert, und kann die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringern, wenn kein Oxidationsmittelmangel erkannt wird). Bei einer weiteren Ausführungsform prüft die Steuerung **105** auf Oxidationsmittelmangel, während $dV/d(OS)$ innerhalb eines vorgegebenen Betriebsbereichs gehalten wird; wenn ein Oxidationsmittelmangel erkannt wird, wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht, bis der Oxidationsmittelmangel nicht mehr detektiert wird, obwohl dies in einer vorübergehenden Erhöhung von $dV/d(OS)$ über den gewünschten Betriebsbereich resultieren kann.

[0041] Das Brennstoffzufuhrunter-system liefert einen Brennstoffstrom von der Brennstoffversorgung **106** über einen Brennstoffzufuhrkanal **107** zu den Anoden des Brennstoffzellenstapels **100**. Wenn der Brennstoffstrom ein komprimiertes Gas ist, wie etwa im Wesentlichen reiner Wasserstoff, kann die Brennstoffversorgung **106** ein Druckgefäß und ein Druckregelventil (nicht dargestellt) aufweisen, um den Druck des zum Brennstoffzellenstapel **100** gelieferten

Brennstoffstroms zu regeln. Alternativ kann der Brennstoff ein flüssiger Brennstoff wie Methanol sein, und die Brennstoffversorgung **106** kann einen Brennstofftank aufweisen. Der flüssige Brennstoff kann direkt an den Brennstoffzellenstapel **100** geliefert werden (so genannte Flüssigbrennstoffzelle). Alternativ können Brennstoffe wie Methanol, Erdgas oder andere Kohlenwasserstoffe weiter verarbeitet werden, um einen gasförmigen Wasserstoff enthaltenden Reformatstrom zu erzeugen, wobei in diesem Fall die Brennstoffversorgung **106** außerdem einen Brennstoffprozessor aufweist. Wenn der Brennstoffvorratstank nicht druckbeaufschlagt ist, kann das Brennstoffzufuhruntersystem des Weiteren einen Kompressor oder eine Pumpe aufweisen, um den Druck und den Massenfluss des zum Brennstoffzellenstapel **100** gelieferten Brennstoffstroms zu regeln. Nachdem der Brennstoffstrom zu den Anoden des Brennstoffzellenstapels **100** gerichtet worden ist, um an den gewünschten elektrochemischen Reaktionen teilzunehmen, wird ein brennstoffarmer Brennstoffabluftstrom über den Brennstoffabluftkanal **108** aus dem Brennstoffzellenstapel **100** ausgeleitet.

[0042] Bei der in [Fig. 1](#) dargestellten bevorzugten Ausführungsform weist das Oxidationsmittelzufuhruntersystem eine Oxidationsmittelversorgung **110**, ein mechanisches Gerät **111** zum Erhöhen des Drucks des Oxidationsmittelzufuhrstroms und einen mit dem mechanischen Gerät **111** gekoppelten Elektromotor **112** auf, der dieses mit Leistung versorgt. Die Oxidationsmittelversorgung **110** kann ein Gefäß zur Aufnahme eines Oxidationsmittelvorrats aufweisen, aber es ist eher typisch, dass die Oxidationsmittelversorgung **110** einen Lufteinlass zum Empfangen und Filtern der Luft aus der Umgebungsatmosphäre aufweist. Aus der Oxidationsmittelversorgung **110** wird der Oxidationsmittelstrom zum mechanischen Gerät **111** geleitet, das den Druck des Oxidationsmittelstroms erhöht. Der druckbeaufschlagte Oxidationsmittelstrom wird über einen Oxidationsmittelzufuhrkanal **113** zum Brennstoffzellen-Stromerzeugungsuntersystem geführt.

[0043] Die Steuerung **105** empfängt ein Ausgangssignal vom Sensor **104**. Das Ausgangssignal wird von der Steuerung **105** verarbeitet, um zu bestimmen, ob $dV/d(OS)$ innerhalb des gewünschten Betriebsbereichs liegt. Die Steuerung **105** kommuniziert mit dem Oxidationsmittelzufuhruntersystem, um die Ausgangsleistung des mechanischen Geräts **111** so zu steuern, dass $dV/d(OS)$ innerhalb eines vorgegebenen gewünschten Betriebsbereiches gehalten wird (der vorzugsweise einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie zwischen ca. Eins und Zwei entspricht).

[0044] Bei der in [Fig. 1](#) dargestellten Ausführungsform steuert die Steuerung **105** z. B. den Elektromotor **112**, um die Drehzahl des mechanischen Geräts **111** zu regeln. Das mechanische Gerät **111** ist typi-

scherweise ein Kompressor wie ein Drehkolbenkompressor oder ein Hubkolbenkompressor. Es können jedoch auch andere Typen mechanischer Geräte verwendet werden, wie z. B. eine Pumpe, ein Lüfter oder ein Gebläse. Das mechanische Gerät **111** erhöht den Druck des Oxidationsmittelzufuhrstroms, um hinreichend Energie zum Richten des gewünschten Oxidationsmittelmassenstroms auf die Kathoden der Brennstoffzellen im Brennstoffzellenstapel **100** bereitzustellen. Nach den Kathoden wird der sauerstoffarme Oxidationsmittelstrom schließlich aus dem Brennstoffzellenstapel **100** durch den Kathodenabluftkanal **116** nach außen geleitet.

[0045] Bei einem bevorzugten Verfahren steuert die Steuerung **105** im stationären Betrieb das Oxidationsmittelzufuhruntersystem so, dass der Wert von $dV/d(OS)$ Betriebsbedingungen entspricht, in denen die Oxidationsmittel-Stöchiometrie nahe ca. Eins beträgt. Der stationäre Betrieb ist hierin als eine Betriebsart des Brennstoffzellensystems definiert, bei dem die Stromabgabe des Brennstoffzellenstapels **100** im Wesentlichen konstant ist. Während des Normalbetriebs, in dem der Strombedarf dynamisch ist, kann die Steuerung **105** eine Schwankung von $dV/d(OS)$ innerhalb eines vorgegebenen gewünschten Betriebsbereichs zulassen, der vorzugsweise demjenigen entspricht, in dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zwischen ca. Eins und Zwei liegt. Der Normalbetrieb ist hierin so definiert, dass die Betriebsarten Hochfahren und Abschalten ausgeschlossen sind, in denen die Steuerung **105** Werte für $dV/d(OS)$ zulassen kann, die höheren bzw. niedrigeren Oxidationsmittel-Stöchiometrien entsprechen. Gemäß einem bevorzugten Verfahren wird der Bedarf an parasitärer Leistung während des Normalbetriebs gesenkt, indem die Leistungsverbrauch des Oxidationsmittelzufuhruntersystems dadurch verringert wird, dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie während des stationären Betriebs auf unter Zwei und vorzugsweise nahe ca. Eins gehalten wird.

[0046] Bei der ersten bevorzugten Ausführungsform misst der Sensor **104** die Ausgangsspannung des Brennstoffzellenstapels **100**. Im Normalbetrieb bei konstanter Stromdichte korreliert die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle mit der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, so dass dann, wenn der Sensor **104** die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle misst, der Sensor **104** zur Bestimmung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie und von $dV/d(OS)$ verwendet werden kann. Die Kurve A der [Fig. 2A](#) zeigt die Ausgangsspannung (y-Achse, links) in Abhängigkeit von der Oxidationsmittel-Stöchiometrie (x-Achse) für eine Brennstoffzelle, die bei einer konstanten Stromdichte von 500 A/Quadratfuß (ca. 540 mA/cm²) arbeitet. Das bedeutet, wenn zumindest eine der Größen Zellenausgangsspannung oder Oxidationsmittel-Stöchiometrie bekannt ist, kann $dV/d(OS)$ anhand der Kurve A bestimmt werden. Die Kurve C der [Fig. 2B](#)

zeigt die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Oxidationsmittel-Stöchiometrie und die Kurve D der [Fig. 2B](#) zeigt $dV/d(OS)$ in Abhängigkeit von der Oxidationsmittel-Stöchiometrie. Die Kurve D in [Fig. 2B](#) zeigt, dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie durch die Wahl eines vorgegebenen Schwellenwertes für $dV/d(OS)$ bis nahe Eins verringert werden kann, ohne dass dies zu wesentlichen Leistungseinbußen führt, solange die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht wird, wenn $dV/d(OS)$ größer als oder gleich dem vorgegebenen Schwellenwert ist. Für die Brennstoffzelle aus [Fig. 2B](#) könnte ein vorgegebener Schwellenwert für $dV/d(OS)$ z. B. zwischen 0,02 und 0,3 betragen. Bei einem Schwellenwert von 0,3 könnte die Oxidationsmittel-Stöchiometrie auf ca. 1,2 verringert werden, bevor $dV/d(OS)$ über 0,3 ansteigt; zu diesem Zeitpunkt ist die Ausgangsspannung immer noch höher als 0,6 V, so dass die Leistung der Brennstoffzelle nicht nennenswert beeinträchtigt ist.

[0047] Im Beispiel gemäß den [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) war die Brennstoffzelle eine Ballard® MK V Brennstoffzelle mit einer Feststoffpolymer-Ionenaustauschmembran aus Nafion™ 117 (ein Copolymer aus Tetrafluorethylen und Perfluorvinylether-Sulfonsäure). Die Elektroden bestanden aus Kohlefaserpapier mit einer Dicke von 0,09 Zoll (ca. 2,29 mm) von Toray Industries, Inc. Die Katalysatorschicht auf den Elektroden war Platin schwarz-Katalysator, der mit einem Tetrafluorethylenbindemittel gemischt war. Die Katalysatorladung auf jeder Elektrode betrug 4 mg/cm².

[0048] Wenn im Beispiel der [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle überwacht wird, braucht $dV/d(OS)$ selbst nicht überwacht zu werden, da die Beziehung zwischen Ausgangsspannung und $dV/d(OS)$ bestimmt werden kann (siehe z. B. [Fig. 2B](#)). Dementsprechend kann das Oxidationsmittelzufuhruntersystem gesteuert werden, um die Ausgangsspannung zwischen ca. 0,63 V und ca. 0,67 V zu halten, wodurch die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zwischen ca. 1,2 und ca. 1,4 gehalten wird. Das bedeutet, dass dann, wenn der Sensor **104** eine Ausgangsspannung über 0,67 V erfasst, die Steuerung **105** das Oxidationsmittelzufuhruntersystem zur Verringerung der Drehzahl des mechanischen Geräts **111** steuert, wodurch der parasitäre Leistungsverbrauch vermindert, die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert und $dV/d(OS)$ innerhalb des gewünschten vorgegebenen Bereichs gehalten wird. Wenn der Sensor **104** eine Ausgangsspannung unter 0,63 V erfasst, dann steuert die Steuerung **105** das Oxidationsmittelzufuhruntersystem, um die Drehzahl des mechanischen Geräts **111** zu erhöhen, $dV/d(OS)$ zu verringern sowie die Ausgangsspannung und die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu erhöhen, wodurch ein Oxidationsmittelmangel an den Kathoden der Brennstoffzellen verhindert wird.

[0049] Fachleute werden erkennen, dass Brenn-

stoffzellenstapel mit anderen Merkmalen, wie z. B. die Größe der elektrochemisch aktiven Fläche, unter den gleichen Bedingungen arbeiten und andere Spannungen als die in [Fig. 2A](#) dargestellten erzeugen können.

[0050] Für jede bestimmte Brennstoffzelle oder jeden Brennstoffzellenstapel kann jedoch eine ähnliche Beziehung zwischen Ausgangsspannung und Oxidationsmittel-Stöchiometrie aufgetragen und während normaler Betriebsbedingungen angewendet werden, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zur Verringerung des parasitären Leistungsverbrauchs zu regeln und $dV/d(OS)$ innerhalb eines gewünschten vorgegebenen Bereichs zu halten.

[0051] [Fig. 2A](#) zeigt außerdem eine Kurve B, die für dieselbe Brennstoffzelle die in der Brennstoffzelle erzeugte theoretische Wärme (rechte y-Achse) in Abhängigkeit von der Oxidationsmittel-Stöchiometrie (x-Achse) darstellt. Die in der Brennstoffzelle erzeugte theoretische Wärmemenge wurde durch Berechnen der Wärmebilanz für die Brennstoffzelle berechnet. Das heißt, die Berechnung ermittelt die erzeugte Wärme unter Berücksichtigung der Gesamtenthalpie der Einlass- und Auslassfluidströme und des erzeugten Stroms. Die Kurve B zeigt, dass bei dieser bestimmten Brennstoffzelle eine erhebliche Zunahme der darin erzeugten Wärme vorliegt, wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zwischen 1,2 und 0,9 beträgt. Da eine Erhöhung der Temperatur in einer Brennstoffzelle eine Zunahme des parasitären Leistungsverbrauchs durch das Kühluntersystem verursachen kann, ist die Berücksichtigung dieses Effektes bei der Wahl des gewünschten vorgegebenen Bereichs für $dV/d(OS)$ ebenfalls wichtig. Demzufolge kann bei manchen Brennstoffzellen der gewünschte Bereich für $dV/d(OS)$ mit einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Bereich von ca. 1,2 und 2,0 korrelieren.

[0052] [Fig. 2C](#) ist ein Plot der Daten von vier Brennstoffzellen, die in einem Stapel angeordnet waren, wobei jede Brennstoffzelle bei einer konstanten Stromdichte von 500 A/Quadratfuß (ca. 540 mA/cm²) arbeitete. Die Kurven E bis H zeigen jeweils $dV/d(OS)$ als Funktion der Oxidationsmittel-Stöchiometrie für eine bestimmte der vier Brennstoffzellen im Stapel. Die Kurve I zeigt den durchschnittlichen Wert von $dV/d(OS)$ über der Oxidationsmittel-Stöchiometrie. [Fig. 2C](#) zeigt wie [Fig. 2B](#) die Beziehung zwischen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie und $dV/d(OS)$ und wie $dV/d(OS)$ progressiv zunimmt, wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie gegen Eins verringert wird.

[0053] [Fig. 2C](#) zeigt, dass es innerhalb eines Brennstoffzellenstapels verschiedene Werte für $dV/d(OS)$ für verschiedene Brennstoffzellen geben kann. In diesem Fall kann die Brennstoffzelle anhand des durchschnittlichen $dV/d(OS)$ gesteuert werden. Alternativ

kann der Wert von $dV/d(OS)$ für eine ausgewählte Brennstoffzelle überwacht werden, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie für den kompletten Brennstoffzellenstapel zu steuern. Die gewählte Brennstoffzelle kann empfindlicher reagierend auf Änderungen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie gemacht werden, so dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie so gesteuert werden kann, dass starke Schwankungen der Brennstoffzellenleistung verhindert werden. Die gewählte Brennstoffzelle kann z. B. so ausgelegt werden, dass ihre Ausgangsspannung rascher sinkt als die Ausgangsspannung der anderen Brennstoffzellen im Stapel, so dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht werden kann, bevor ein deutliches Absinken der Ausgangsspannung des Brennstoffzellenstapels eintritt.

[0054] Die Ablaufdiagramme der [Fig. 3A](#), [Fig. 3B](#) und [Fig. 4](#) bis [Fig. 12](#) werden nunmehr unter Bezugnahme auf die Komponenten des in [Fig. 1](#) dargestellten Brennstoffzellensystems erläutert.

[0055] Bei einer bevorzugten Ausführungsform kann die Steuerung **105** so programmiert werden, dass sie das im Ablaufdiagramm von [Fig. 3A](#) dargestellte Verfahren ausführt. Bei diesem Verfahren steuert die Steuerung **105** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie als Reaktion auf Signale vom Sensor **104**, um den parasitären Leistungsverbrauch zu reduzieren, indem der Oxidationsmittelmassenstrom mittels des Motors **112** und des mechanischen Geräts **111** geregelt wird. Das Verfahren beginnt im Schritt **120**. Im Schritt **122** werden die Reaktanten zum Brennstoffzellenstapel **100** geliefert und der Sensor **104** wird aktiviert. Während des Betriebs des Stapels **100** überwacht der Sensor **104** im Schritt **124** mindestens ein Betriebsmerkmal, das mit $dV/d(OS)$ korreliert. Bei einer Brennstoffzelle, die bei einer konstanten Stromdichte arbeitet, kann z. B. das vom Sensor **104** gemessene Betriebsmerkmal die Brennstoffzellen-Ausgangsspannung oder ein mit der Oxidationsmittel-Stöchiometrie korrelierendes Betriebsmerkmal sein, da dann, wenn eines dieser Betriebsmerkmale bekannt ist, $dV/d(OS)$ anhand einer Kurve der Zellenspannung als Funktion der Oxidationsmittel-Stöchiometrie bestimmt werden kann (z. B. [Fig. 2A](#)). Der Sensor **104** kann die Ausgangsspannung des Brennstoffzellenstapels **100** oder die Ausgangsspannung ausgewählter individueller Brennstoffzellen **101** messen, um $dV/d(OS)$ für den Stapel **100** bzw. die individuellen Brennstoffzellen **101** zu bestimmen. Alternativ kann der Sensor **104** die Sauerstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom messen, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu bestimmen, die mit $dV/d(OS)$ korreliert. Die Sauerstoffkonzentration im Oxidationsmittelzufuhrstrom ist bekannt, wenn es sich um reinen Sauerstoff (d. h. 100%) oder Luft (d. h. ca. 20%) handelt. Wenn die Sauerstoffkonzentration im verdünnten Oxidationsmittelzufuhrstrom nicht konstant ist, kann ein Sauerstoffsensor verwendet werden, um

die Sauerstoffkonzentration stromaufwärts des Brennstoffzellenstapels **100** zu messen. Wenn die Stromabgabe der Brennstoffzelle und die Sauerstoffkonzentration in der Kathodenabluft bekannt sind, kann alternativ die Steuerung **105** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie berechnen, indem sie die von der Brennstoffzelle zur Erzeugung des elektrischen Stroms verbrauchte Sauerstoffmenge bestimmt.

[0056] Wenn bei einer anderen Ausführungsform der Sensor **104** die Wasserstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom misst, kann die Detektion von Wasserstoff über einem Schwellenwert (z. B. 20 ppm) darauf hinweisen, dass an der Kathode der Brennstoffzelle ein ausgeprägter Oxidationsmittelmangel vorliegt. Bei dieser Ausführungsform bestimmt die Wasserstoffkonzentration das Ausmaß des Oxidationsmittelmangels, das mit einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie für die Brennstoffzelle korreliert. Dementsprechend gibt der Sensor **104** ein Signal aus, das für den gemessenen Wert eines Betriebsmerkmals, das selbst oder in Kombination mit anderen Faktoren mit $dV/d(OS)$ korreliert, repräsentativ ist. Das Ausgangssignal vom Sensor **104** kann also von der Steuerung **105** empfangen und verarbeitet werden, um $dV/d(OS)$ zu berechnen oder herzu-leiten, so dass die Steuerung **105** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie so steuern kann, dass der parasitäre Leistungsverbrauch verringert wird.

[0057] In den Schritten **126** und **128** bestimmt die Steuerung **105**, ob das Betriebsmerkmal mit einem $dV/d(OS)$ korreliert, der innerhalb eines gewünschten Bereichs liegt. Wenn im Schritt **126** das Betriebsmerkmal mit einem $dV/d(OS)$ korreliert, der niedriger als ein erster vorgegebener Wert ist (d. h. der obere Grenzwert des gewünschten Oxidationsmittel-Stöchiometriebereichs), dann veranlasst die Steuerung **105** im Schritt **132**, dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert wird. Wenn das Betriebsmerkmal im Schritt **128** mit einem $dV/d(OS)$ korreliert, der höher ist als ein zweiter vorgegebener Wert (d. h. der untere Grenzwert des gewünschten Oxidationsmittel-Stöchiometriebereichs), dann veranlasst die Steuerung **105** im Schritt **134**, dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht wird. Wenn ermittelt wird, dass die derzeitige Oxidationsmittel-Stöchiometrie innerhalb des gewünschten Bereichs liegt (d. h. beide Schritte **126** und **128** werden mit "Nein" beantwortet), werden keine Maßnahmen zur Änderung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie unternommen. Nach den Schritten **128**, **132** oder **134** wird bestimmt, ob der Sensor **104** immer noch aktiviert ist. Solange der Sensor **104** aktiviert ist, wird das Verfahren wiederholt, indem es zum Schritt **124** zurückgeht. Wenn der Sensor **104** nicht mehr aktiviert ist, endet der Prozess im Schritt **138**.

[0058] Das Verfahren der [Fig. 3B](#) ist im Wesentlichen das gleiche wie das Verfahren der [Fig. 3A](#), au-

ßer dass ein Schritt **125** hinzugefügt ist, der eine spezielle Kontrolle vorsieht, ob ein Oxidationsmittelmangel detektiert wird oder nicht. Da die Schritte der Verfahren sowohl der [Fig. 3A](#) als auch der [Fig. 3B](#) gleich sind, werden identische Bezugszeichen verwendet.

[0059] Der gewünschte Betriebsbereich für die Oxidationsmittel-Stöchiometrie kann einen unteren Grenzwert haben, der normalerweise einen nennenswerten Oxidationsmittelmangel an den Kathoden verhindert. Dennoch kann ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel selbst dann auftreten, wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie viel größer als Eins ist (z. B. selbst dann, wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie innerhalb des gewünschten Betriebsbereichs liegt). Ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel kann an Abschnitten der Kathode auftreten, wo das Oxidationsmittel keinen Zugang zum Katalysator hat, z. B. wo der Zugang durch die Ansammlung von Wasser verhindert ist. Ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel kann zu einer verringerten Leistung, einem verringerten Wirkungsgrad und einer unerwünschten Wasserstofferzeugung an der Kathode führen. Ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel ist schwer zu erkennen, da der Brennstoffzellenstapel **100** in seiner Gesamtheit eine positive Spannung innerhalb des gewünschten Betriebsbereichs haben kann, während der Oxidationsmittelmangel nur an einem Abschnitt der Kathode vorliegt. Der Wirkungsgrad kann verbessert werden, indem dem örtlich begrenzten Oxidationsmittelmangel entgegengewirkt wird, z. B. durch eine vorübergehende Erhöhung des Oxidationsmittelmassenstroms durch die Kathode, um angesammeltes Wasser von der Kathode weg zu verteilen.

[0060] Ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel kann durch eine Überwachung auf Unregelmäßigkeiten, die Indikatoren für einen Oxidationsmittelmangel sein können, erfasst werden, wie z. B. die Detektion einer Wasserstoffgas-Schwellenkonzentration (z. B. über 20 ppm) im Kathodenabluftstrom. Die tatsächliche Wasserstoffgas-Schwellenkonzentration, die für eine bestimmte Brennstoffzelle oder einen bestimmten Brennstoffzellenstapel gewählt wird, kann von einem bestimmten Kennwert wie z. B. der Anzahl Brennstoffzellen in einem Stapel, dem Oxidationsmittelmassenstrom, dem Elektrolyttypen usw. abhängen. Ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel mag zwar keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Ausgangsspannung des Brennstoffzellenstapels **100** haben, aber jeglicher Grad eines Oxidationsmittelmangels kann zur Wasserstofferzeugung an der Kathode führen. Ein anderes Verfahren zum Erkennen des Risikos für einen örtlich begrenzten Oxidationsmittelmangel im Brennstoffzellenstapel **100** besteht in der Überwachung der Ausgangsspannung individueller Brennstoffzellen **101**. Wenn eine individuelle Brennstoffzelle eine niedrigere Ausgangsspannung als die anderen Brennstoffzellen im

Stapel **100** hat, deutet dies darauf hin, dass ein Problem durch örtlich begrenzten Oxidationsmittelmangel vorliegen kann (z. B. verursacht durch die Ansammlung von Wasser an der Kathode der Brennstoffzelle mit der niedrigen Ausgangsspannung).

[0061] Gemäß dem Verfahren der [Fig. 3B](#) wird bei einer Detektion von Oxidationsmittelmangel im Schritt **125** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **134** erhöht. Wenn im Schritt **125** kein Oxidationsmittelmangel erfasst wird, ist der im Schritt **126** beginnende Prozess im Wesentlichen identisch mit dem Prozess aus [Fig. 3A](#).

[0062] [Fig. 4](#) zeigt ein anderes Verfahren zur Verringerung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, um den parasitären Leistungsverbrauch zu reduzieren, bei dem der Sensor **104** ein Betriebsmerkmal überwacht, das auf einen Oxidationsmittelmangel an der Kathode hinweist. Das Verfahren von [Fig. 4](#) beginnt im Schritt **140**. Im Schritt **142** wird ein Oxidationsmittelstrom an eine Brennstoffzellenkathode geliefert, ein Brennstoffstrom wird an eine Brennstoffzellenanode geliefert und der Sensor **104** wird aktiviert. Im Schritt **144** überwacht der aktivierte Sensor **104** auf Oxidationsmittelmangel an der Kathode. Der Sensor **104** sendet ein Signal an die Steuerung **105**, das meldet, wenn ein Oxidationsmittelmangel an der Kathode erkannt worden ist. Der Sensor **104** kann z. B. die Ausgangsspannung des Brennstoffzellenstapels **100** oder ausgewählter individueller Brennstoffzellen im Stapel **100** detektieren. Alternativ kann der Sensor **104** die Sauerstoff- oder Wasserstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom detektieren. Wenn z. B. kein Sauerstoff oder nur eine "sehr geringe Konzentration" erkannt wird, ist dies ein gutes Anzeichen dafür, dass an der Kathode möglicherweise ein Oxidationsmittelmangel vorliegt. Die Definition einer "sehr geringen Konzentration" von Sauerstoff hängt von den Betriebsbedingungen und den Eigenschaften der Reaktanten ab. Wenn z. B. der Einlassoxidationsmittelstrom ca. 20% Sauerstoff enthält, kann eine "sehr geringe Konzentration" 5% Sauerstoff im Kathodenabluftstrom sein (d. h. einer Gesamt-Oxidationsmittel-Stöchiometrie von ca. 1,33 entsprechend). Wenn jedoch z. B. der Einlassoxidationsmittelstrom 30% Sauerstoff enthält, kann eine "sehr geringe Konzentration" 7% Sauerstoff im Kathodenabluftstrom sein (d. h. einer Gesamt-Oxidationsmittel-Stöchiometrie von ca. 1,30 entsprechend). Vorzugsweise entspricht die als Schwellenwert gewählte Sauerstoffkonzentration einer vorgegebenen Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wobei die Sauerstoffkonzentration im Einlassoxidationsmittelstrom berücksichtigt wird. Wenn analog der Sensor **104** eine Wasserstoffkonzentration über einer Schwellenmenge (z. B. über 20 ppm) misst, ist es wahrscheinlich, dass an einer Brennstoffzellenkathode ein Oxidationsmittelmangel vorliegt. Die Werte der Schwellenkonzentrationen hängen von den betreffenden Kenndaten des Brennstoff-

zellensystems ab, z. B. vom Oxidationsmittelmassenstrom, der Größe der Brennstoffzellen und der Anzahl Brennstoffzellen im Stapel.

[0063] Im Schritt **146** verarbeitet die Steuerung das Signal vom Sensor **104** und bestimmt, ob ein Oxidationsmittelmangel oder die Wahrscheinlichkeit eines Oxidationsmittelmangels erkannt worden ist. Wenn eine solche Bedingung detektiert wird, wird in jedem Fall die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **148** erhöht. Wenn im Schritt **146** bestimmt wird, dass kein Anzeichen für einen Oxidationsmittelmangel an den Brennstoffzellenkathoden vorliegt, wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **150** verringert.

[0064] Entweder nach Schritt **148** oder **150** prüft die Steuerung **105** im Schritt **152**, ob der Sensor **104** immer noch aktiviert ist. Wenn der Sensor **104** nicht mehr aktiviert ist, endet der Prozess im Schritt **154**. Solange der Sensor **104** aktiviert ist, wird das Verfahren zur Steuerung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie wiederholt, indem es zum Schritt **144** zurückgeht.

[0065] Die Ablaufdiagramme der [Fig. 5](#) bis [Fig. 12](#) betreffen Beispiele für Verfahren, bei denen das vom Sensor **104** gemessene Betriebsmerkmal die Wasserstoffgaskonzentration im Kathodenabluftstrom ist. Angesichts der vorliegenden Offenbarung erkennt der Fachmann, dass auch alternative Betriebsmerkmale wie z. B. die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle oder die Oxidationsmittelkonzentration in Zusammenhang mit den Verfahren in den Ablaufdiagrammen der [Fig. 5](#) bis [Fig. 12](#) herangezogen werden können. Das heißt, der Sensor **104** kann ein Sensor sein, der ein beliebiges Betriebsmerkmal des Brennstoffzellensystem misst, das von der Steuerung **105** verwendet werden kann, um $dV/d(OS)$ und/oder das Vorliegen von Oxidationsmittelmangel an der Kathode zu bestimmen.

[0066] [Fig. 5](#) ist ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens, bei dem die Steuerung **105** auf Basis der Tatsache, ob die vom Sensor **104** gemessene Wasserstoffgaskonzentration eine vorgegebene Schwellenkonzentration (TC; threshold concentration) überschreitet, bestimmt, ob die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht oder verringert werden soll. Das Verfahren beginnt im Schritt **160**. Im Schritt **162** überwacht der Sensor **104** den Kathodenabluftstrom auf Wasserstoffgas. Im Schritt **164** bestimmt die Steuerung **105**, ob die im Schritt **162** gemessene Wasserstoffgaskonzentration TC überschreitet. Winzige Wasserstoffmengen im Kathodenabluftstrom brauchen kein Hinweis für ein Problem zu sein. Demnach ist TC die Schwellenkonzentration für Wasserstoffgas, die empirisch für eine bestimmte Brennstoffzelle als Indikator für einen Oxidationsmittelmangel an der Kathode bestimmt worden ist. Für eine Ballard® MK V Brennstoffzelle z. B. kann die Steuerung **105** so programmiert sein, dass TC eine Wasserstoffkonzentration

von 20 ppm ist. Bis der Sensor **104** eine Wasserstoffkonzentration größer als oder gleich TC erkennt, verringert die Steuerung **105** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **166** typischerweise durch die Verringerung des Massenstroms des Oxidationsmittelstroms (wodurch der parasitäre Leistungsverbrauch verringert wird).

[0067] Wenn der Sensor **104** eine Wasserstoffkonzentration größer als TC erfasst, ist dies ein Anzeichen dafür, dass ein Oxidationsmittelmangel vorliegt (oder wahrscheinlich auftritt), und die Steuerung **105** geht zum Schritt **168** weiter. Im Schritt **168** bestimmt die Steuerung **105**, ob der Oxidationsmittelmassenstrom größer als oder gleich einem gewünschten Maximum ist. Wenn der Oxidationsmittelmassenstrom nicht größer als oder gleich dem gewünschten Maximum ist, wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **170** erhöht. Normalerweise wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie erhöht, indem der Motor **112** so gesteuert wird, dass er die Drehzahl des mechanischen Geräts **111** erhöht. Alternativ können andere Maßnahmen anstelle von oder gemeinsam mit der Steuerung des Motors **112** zum Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie angewendet werden. Die Oxidationsmittel-Stöchiometrie kann z. B. erhöht werden, indem die elektrische Stromabgabe ohne die entsprechende Verringerung des Oxidationsmittelmassenstroms reduziert wird.

[0068] Wenn jedoch im Schritt **168** bestimmt wird, dass der Oxidationsmittelmassenstrom in der Tat größer als oder gleich ist dem gewünschten maximalen Massenstrom, geht die Steuerung **105** zum Schritt **172** weiter und bestimmt, ob ein Warnsignal (Schritt **174**) erzeugt werden soll, wobei der Betrieb des Brennstoffzellensystems fortgesetzt wird, oder ob der Brennstoffzellenstapel **100** im Schritt **176** abzuschalten (Betrieb beenden) ist. Im Schritt **172** nimmt die Steuerung **105** die Bestimmung dadurch vor, dass sie prüft, ob die Wasserstoffgaskonzentration höher oder geringer ist als ein vorgegebener Konzentrationsgrenzwert (CL; concentration limit). CL ist typischerweise ein wesentlich höherer Wert als TC. Wenn die Wasserstoffkonzentration höher als CL ist, weist dies darauf hin, dass eine wesentlich höhere als die normale Konzentration des Wasserstoffs an der Kathode vorliegt. Wenn der Brennstoff z. B. Wasserstoff ist, kann eine erhebliche Fluidleckmenge zwischen der Anode und der Kathode bewirken, dass die Wasserstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom CL überschreitet, und eine derartige Bedingung rechtfertigt ein Abschalten der Brennstoffzelle, so dass die Ursache für die erhöhte Wasserstoffkonzentration untersucht werden kann.

[0069] Wenn das Brennstoffzellensystem eine Matrix aus Brennstoffzellenstapeln aufweist, wobei jeder Stapel auf die in [Fig. 5](#) dargestellte Weise überwacht wird, kann die Matrix weiterhin elektrischen Strom er-

zeugen, wobei jedoch ein Stapel abgeschaltet ist.

[0070] Wie oben erwähnt können andere Betriebsmerkmale als die Wasserstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom an deren Stelle verwendet werden. So werden z. B. unter Bezugnahme auf das Ablaufdiagramm der [Fig. 5](#) hierin alternative entsprechende Schritte für einen Sensor beschrieben, der die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle misst. Die alternativen Schritte werden unter Verwendung der gleichen Bezugszeichen, denen ein "a" nachgestellt ist, beschrieben. Gemäß dem alternativen Verfahren überwacht ein Sensor für die Brennstoffzellen-Ausgangsspannung nach dem Start des Verfahrens im Schritt **160a** die Ausgangsspannung im Schritt **162a**. Im Schritt **164a** bestimmt die Steuerung **105**, ob die Ausgangsspannung niedriger ist als eine vorgegebene Schwellenausgangsspannung (TOV; threshold output voltage). Bei diesem Beispiel entspricht die vorgegebene TOV vorzugsweise einer Bedingung, bei der die Möglichkeit für einen Oxidationsmittelmangel an der Kathode der Brennstoffzelle gegeben ist. Wenn die Ausgangsspannung niedriger als TOV ist, wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie in **170a** erhöht, aber erst nachdem im Schritt **168a** zunächst geprüft wird, ob der Oxidationsmittelmassenstrom nicht bereits größer als oder gleich einem gewünschten Maximum ist. Wenn die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle nicht kleiner als TOV ist, senkt die Steuerung **105** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **166a**. Wenn im Schritt **168a** bestimmt wird, dass der Oxidationsmittelmassenstrom größer als oder gleich einem gewünschten Maximum ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **172a** weiter. Wenn der Sensor im Schritt **172a** eine Ausgangsspannung misst, die auf eine Zellenumkehr hindeutet, schaltet die Steuerung **105** die Brennstoffzelle im Schritt **176a** ab. Wenn keine Zellenumkehr erkannt wird, kann die Brennstoffzelle ihren Betrieb fortsetzen, wobei die Steuerung **105** jedoch im Schritt **174a** ein Warnsignal erzeugt.

[0071] [Fig. 6](#) ist ein Ablaufdiagramm, das ein Verfahren darstellt, bei dem die Steuerung **105** eine angemessene Aktion anhand einer vorgegebenen gewünschten Oxidationsmittel-Stöchiometrie für die momentane elektrische Stromabgabe bestimmt. Das Verfahren beginnt im Schritt **180** mit der Lieferung der Reaktanten an den Brennstoffzellenstapel **100** und der Aktivierung des Sensors **104**. Im Schritt **182** überwacht der Sensor **104** den Kathodenabluftstrom auf Wasserstoffgas. Wenn der Sensor **104** im Schritt **184** eine Wasserstoffgaskonzentration misst, die niedriger als die Schwellenkonzentration TC ist, verringert die Steuerung **105** im Schritt **186** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie. Wenn der Sensor **104** keine Wasserstoffgaskonzentration erkennt, die kleiner als TC ist, bestimmt die Steuerung **105** im Schritt **188** anhand einer Nachschlagetabelle den gewünschten Oxidationsmittelmassenstrom für die momentane

elektrische Stromabgabe. Im Schritt **190** bestimmt die Steuerung **105**, ob der tatsächliche Oxidationsmittelmassenstrom um mehr als eine vorgegebene Menge (z. B. P%) größer ist als der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom. Wenn der tatsächliche Oxidationsmittelmassenstrom nicht bereits um P% größer ist als der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom, dann erhöht die Steuerung **105** im Schritt **192** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie. Wenn jedoch der tatsächliche Oxidationsmittelmassenstrom um mehr als P% größer ist als der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom, dann erzeugt die Steuerung **105** im Schritt **194** ein Warnsignal oder schaltet die Brennstoffzelle ab. Wenn die Steuerung **105** ein Warnsignal erzeugt, kann sie außerdem das Brennstoffzellensystem so steuern, dass die elektrische Stromabgabe verringert oder die Spitzenstromabgabe begrenzt wird. Wie bei der Ausführungsform nach [Fig. 5](#) kann beim Verfahren nach [Fig. 6](#) die Größe der gemessenen Wasserstoffgaskonzentration herangezogen werden, um die angemessene Aktion (d. h. ein Warnsignal oder Abschalten (Beenden des Betriebs) des Brennstoffzellenstapels **100**) zu bestimmen.

[0072] Die Ablaufdiagramme der [Fig. 7](#) bis [Fig. 9](#) zeigen Verfahren, die bestimmen, ob die im Kathodenabluftstrom detektierte Wasserstoffgaskonzentration zunimmt oder abnimmt, und das Benutzen dieser Information zur Festlegung, welche Aktion als Reaktion auf die sich ändernde Wasserstoffgaskonzentration angemessen ist.

[0073] Wie aus [Fig. 7](#) ersichtlich ist, beginnt das Verfahren im Schritt **200** mit der Lieferung der Reaktanten an den Brennstoffzellenstapel **100** und der Aktivierung des Wasserstoffsensors **104**. Im Schritt **202** beginnt der Sensor **104**, den Kathodenabluftstrom auf Wasserstoffgas zu überwachen. Sobald der Sensor **104** aktiviert worden ist, misst er die Wasserstoffgaskonzentration im Kathodenabluftstrom. Der Sensor **104** misst die momentane Wasserstoffgaskonzentration (H) und die Steuerung **105** berechnet dH/dt , wobei dH die Änderung von H und dt die zeitliche Änderung (in konstanten Zeitintervallen) ist. Durch Berechnen, ob dH/dt positiv, negativ oder Null ist, bestimmt die Steuerung **105**, ob H zunimmt, abnimmt bzw. konstant ist.

[0074] Schritt **204** folgt auf den Schritt **202**. Im Schritt **204** bestimmt die Steuerung **105**, ob die momentane H höher ist als eine vorgegebene Schwellenkonzentration (TC). Ist dies nicht der Fall, bestimmt die Steuerung, dass kein Oxidationsmittelmangel an der Kathode vorliegt, und dass überschüssiger Sauerstoff an der Kathode vorhanden ist.

[0075] Demzufolge senkt die Steuerung **105** im Schritt **206** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie z. B. durch Senken der Drehzahl des Motors **112**, um den

Oxidationsmittelmassenstrom zum Brennstoffzellenstapel **100** zu verringern. Die Oxidationsmittel-Stöchiometrie wird also in vorteilhafter Weise gesteuert, um den parasitären Leistungsverbrauch zu verringern.

[0076] Wenn die Steuerung jedoch im Schritt **204** bestimmt, dass die momentane H größer ist als TC , geht die Steuerung **105** zum Schritt **208** weiter, um zu bestimmen, ob dH negativ ist (d. h. ob die Wasserstoffkonzentration abnimmt). Wenn die Steuerung **105** bestimmt, dass dH/dt negativ ist, geht die Steuerung **105** vorzugsweise zum Schritt **202** zurück, ohne eine bestimmte Aktion zu unternehmen, die der Detektion einer Wasserstoffgaskonzentration größer als TC entgegenwirkt. Wenn jedoch die Steuerung **105** im Schritt **208** bestimmt, dass dH/dt nicht negativ ist (d. h. H ist größer als TC und die Wasserstoffkonzentration ist entweder konstant oder nimmt zu), dann geht die Steuerung **105** zum Schritt **210** weiter und bestimmt, ob der Oxidationsmittelmassenstrom größer ist als oder gleich einem gewünschten maximalen Massenstrom. Wenn der Oxidationsmittelmassenstrom nicht größer ist als oder gleich dem gewünschten Massenstrom, geht die Steuerung **105** zum Schritt **212** weiter und erhöht die Oxidationsmittel-Stöchiometrie, vorzugsweise um eine vorgegebene Stufe. Die Steuerung **105** kehrt dann zum Schritt **202** zurück, um die Wirkung der Erhöhung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu bestimmen und das Verfahren zu wiederholen.

[0077] Wenn die Steuerung **105** im Schritt **210** bestimmt, dass der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer als oder gleich einem gewünschten maximalen Massenstrom ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **214** weiter und erzeugt ein Warnsignal und kann schließlich den Brennstoffzellenstapel **100** abschalten (Schritt **220**). Bei der in [Fig. 7](#) dargestellten Ausführungsform kann die Steuerung **105** zusätzliche Schritte **216** und **218** veranlassen, bevor der Brennstoffzellenstapel **100** abgeschaltet wird. Da der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer als oder gleich dem gewünschten Maximum ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **214** weiter, um ein Warnsignal zu erzeugen, und dann zum Schritt **216**, um eine andere Korrekturmaßnahme als die Erhöhung des Oxidationsmittelmassenstroms zu versuchen. Eine oder mehrere Leckstellen in der Brennstoffzelle können die Ursache dafür sein, dass eine übermäßige Wasserstoffgasmenge im Kathodenabluftstrom erfasst wird. Der Wasserstoff könnte z. B. aus den Fluidkanälen von der Anode zur Kathode entweichen, oder ein Leck im Oxidationsmittelzufuhrsystem könnte verhindern, dass ausreichend Sauerstoff zur Kathode gelangt.

[0078] Im Schritt **216** verringert die Steuerung **105** den Brennstoffdruck im Brennstoffzellenstapel **100**. Wenn eine oder mehrere Leckstellen zwischen der

Anode und der Kathode die Ursache dafür sind, dass Wasserstoffgas an der Kathode erfasst wird, kann eine Verringerung des Brennstoffdrucks an der Anode die Transferrate des Brennstoffs von den Anoden zu den Kathoden reduzieren. Der Brennstoffdruck kann z. B. durch Verstellen eines Drucksteuerventils oder durch Verringern der Drehzahl eines Brennstoff-Kompressors eingestellt werden. Da die Brennstoff-Stöchiometrie zunächst größer als Eins sein kann, hat die Verringerung des Brennstoffdrucks eventuell keine unmittelbare Auswirkung auf die elektrische Stromabgabe.

[0079] Im Schritt **218** bestimmt die Steuerung **105**, ob die elektrische Stromabgabe tatsächlich niedriger ist als der elektrische Strombedarf. Wenn die elektrische Stromabgabe vom Brennstoffzellenstapel **100** niedriger ist als der elektrische Strombedarf, schaltet die Steuerung **105** den Brennstoffzellenstapel **100** ab. Wenn jedoch die elektrische Stromabgabe weiterhin dem elektrischen Strombedarf entspricht, dann kehrt die Steuerung **105** zum Schritt **202** zurück, und das Brennstoffzellensystem arbeitet weiter, während das Verfahren wiederholt wird. Inzwischen hat das im Schritt **214** erzeugte Warnsignal den Bediener darauf aufmerksam gemacht, dass ein Problem vorliegt, das untersucht werden muss, um zu bestimmen, warum H größer als TC ist.

[0080] Gemäß [Fig. 8](#) beginnt das Verfahren im Schritt **230** und geht sofort zum Schritt **232** weiter, in dem der Sensor **104** mit der Überwachung des Kathodenabluftstroms zum Messen der Wasserstoffgaskonzentration (H) beginnt und die Steuerung **105** dH/dt berechnet. Im Schritt **234** bestimmt die Steuerung **105**, ob H größer ist als die Schwellenkonzentration (TC) oder im Schritt **238**, ob dH/dt negativ ist. Die Logik der Schritte **232**, **234**, **236** und **238** ist im Wesentlichen die gleiche wie die der entsprechenden Schritte aus [Fig. 7](#) (d. h. **202**, **204**, **206** bzw. **208**). Wenn jedoch im Verfahren nach [Fig. 8](#) im Schritt **238** bestimmt wird, dass dH/dt nicht negativ ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **240** weiter und prüft, ob die Brennstoffzellenspannung kleiner ist als eine vorgegebene Spannung V_0 . In einer bevorzugten Ausführungsform wird der Spannung V_0 beispielsweise ein Wert zwischen Null und ca. 200 mV zugeordnet. Der gewählte Wert für die Spannung V_0 ist vorzugsweise größer als Null, da ein örtlich begrenzter Oxidationsmittelmangel selbst dann Wasserstoff erzeugen kann, wenn die Gesamt-Zellenspannung noch positiv ist. Es kann z. B. eine Wasserstoffkonzentration von ca. 20 ppm im Kathodenabluftstrom gemessen werden, wenn der Brennstoffzellenstapel **100** eine durchschnittliche Zellenspannung von ca. 100 mV hat. Wenn also die Steuerung **105** bestimmt, dass eine Kombination aus positivem dH/dt und einer Zellenspannung unter V_0 vorliegt, kann die Ursache dieser beiden Bedingungen ein Oxidationsmittelmangel sein. Wenn jedoch die Zellenspannung größer als

V_o ist, ist dies ein Anzeichen dafür, dass eine Zellenumkehr wahrscheinlich nicht die Ursache für die Detektion von Wasserstoffgas im Kathodenabluftstrom ist.

[0081] Wenn die Steuerung **105** im Schritt **240** festgestellt, dass die Zellenspannung nicht kleiner als V_o ist, entscheidet die Steuerung **105** deshalb, dass ein Oxidationsmittelmangel nicht die wahrscheinliche Ursache dafür ist, dass H größer als TC ist (ein Oxidationsmittelmangel würde nämlich mit einer deutlich geringeren Brennstoffzellenspannung einhergehen). Es ist eher wahrscheinlich, dass die Ursache für H größer als TC ein oder mehrere Fluidlecks zwischen Anode und Kathode ist. Die Steuerung **105** geht deshalb zum Schritt **246** weiter und verringert den Brennstoffdruck im Brennstoffzellenstapel **100**, um zu bestätigen, dass Fluidlecks tatsächlich der Grund für H größer als TC sind. Die Schritte **248** und **250** sind im Wesentlichen gleich den Schritten **218** und **220** des Verfahrens gemäß [Fig. 7](#).

[0082] Um die Bedingungen für einen örtlich begrenzten Oxidationsmittelmangel im Brennstoffzellenstapel **100** besser erfassen zu können, kann die Spannung individueller Brennstoffzellen überwacht werden. Alternativ kann ein vereinfachtes Überwachungssystem für die Zellenspannung eingesetzt werden, um die Zellenspannung ausgewählter Brennstoffzellen in einem Stapel oder die durchschnittliche Zellenspannung von mehr als einer Brennstoffzelle in einem Brennstoffzellenstapel zu messen. Demzufolge kann bei den Ausführungsformen gemäß den [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) die gemessene Spannung V_o die Spannung einer individuellen Brennstoffzelle, die durchschnittliche Spannung einer Mehrzahl Brennstoffzellen oder die durchschnittliche Spannung aller Brennstoffzellen im Brennstoffzellenstapel **100** sein.

[0083] Bei der Ausführungsform von [Fig. 8](#) geht die Steuerung **105** im Schritt **240**, wenn die Brennstoffzellenspannung kleiner als V_o ist, zum Schritt **242** und prüft, ob der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer ist als oder gleich dem gewünschten Maximum. Falls ja, ist dies ein Anzeichen dafür, dass ein Oxidationsmittelmangel nicht die wahrscheinliche Ursache dafür ist, dass H größer als TC ist, und die Steuerung geht zum Schritt **246** weiter. Die Schritte **246**, **248** und **250** sind ähnlich den entsprechenden Schritten **216**, **218** und **220** von [Fig. 7](#). Wenn der Oxidationsmittelmassenstrom kleiner als das gewünschte Maximum ist, erhöht die Steuerung **105** im Schritt **244** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie, z. B., indem eine Drehzahlerhöhung des Motors **112** veranlasst wird, so dass das mechanische Gerät **111** den Oxidationsmittelmassenstrom zum Brennstoffzellenstapel **100** erhöht.

[0084] Bei dem in [Fig. 9](#) dargestellten Verfahren

entsprechen die Schritte **260**, **262**, **264**, **266**, **268**, **270**, **272** und **274** den Schritten **230**, **232**, **234**, **236**, **238**, **240**, **242** und **244** des in [Fig. 8](#) dargestellten Verfahrens. In [Fig. 9](#) ersetzen die Schritte **276** und **278** die Schritte **246** und **248** von [Fig. 8](#), und nach dem Schritt **278** sind die zusätzlichen Schritte **280** und **284** hinzugefügt. Wenn die Steuerung **105** im Schritt **270** bestimmt, dass die Brennstoffzellenspannung nicht kleiner ist als V_o , kann die Steuerung **105** zum Schritt **276** weiter gehen, um durch weitere Maßnahmen zu bestätigen, dass ein Leck die wahrscheinliche Quelle des Wasserstoffgases im Kathodenabluftstrom ist. Im Schritt **276** wird der Druck des Oxidationsmittel- und Brennstoffstroms verstellt, um die Druckdifferenz zwischen den Oxidationsmittel- und Brennstoffstromfluidkanälen zu regeln. Die Steuerung **105** kann z. B. eine Erhöhung der Druckdifferenz zwischen den Oxidationsmittel- und Brennstoffkanälen veranlassen, um zu bestimmen, ob dies eine entsprechende Auswirkung auf H hat, wie vom Sensor **104** erfasst. Wenn im Schritt **278** eine entsprechende Wirkung erkannt wird (d. h. die Änderung der Druckdifferenz im Schritt **276** beeinflusste die Wasserstoffgaskonzentration im Kathodenabluftstrom), wird festgestellt, dass ein Leck die wahrscheinliche Quelle des Wasserstoffgases ist, und die Steuerung **105** erzeugt im Schritt **280** ein Warnsignal. Die Steuerung **105** wählt dann, ob der Betrieb mit reduzierter Stromabgabe fortgesetzt werden soll (Schritt **284**), oder ob die Brennstoffzelle abzuschalten ist (Schritt **282**). Wenn die Steuerung **105** den Schritt **284** wählt, kann sie den Oxidationsmittel- und Brennstoffdruck weiter verstellen, um den Reaktantendruck auszugleichen, so dass die Druckdifferenz etwa Null ist, um dadurch die Wasserstoffmenge zu verringern, die von den Brennstoffkanälen zu den Oxidationsmittelkanälen übertragen wird. Die Wahl zwischen Schritt **282** und **284** kann auf Basis der Varianz zwischen der elektrischen Stromabgabe und dem elektrischen Strombedarf erfolgen. Wenn z. B. die elektrische Stromabgabe um mehr als einen vorgegebenen Betrag unter dem elektrischen Strombedarf liegt, wird der Schritt **282** gewählt und der Brennstoffzellenstapel **100** abgeschaltet.

[0085] Die Steuerung **105** kann auch vom Schritt **272** zum Schritt **276** gehen, wenn die Brennstoffzellenspannung kleiner als V_o und der Oxidationsmittelmassenstrom größer als oder gleich einem gewünschten Maximum ist.

[0086] Die [Fig. 10](#) und [Fig. 11](#) zeigen bevorzugte Ausführungsformen eines Verfahrens zur Steuerung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, bei dem der Sensor **104** periodisch aktiviert wird, um das Vorhandensein von Wasserstoffgas im Kathodenabluftstrom zu detektieren. Die Verzögerung zwischen der jeweiligen periodischen Aktivierung des Sensors **104** kann in Abhängigkeit von mehreren Variablen variieren. Eine kurze Verzögerung kann bei Anwendungen vor-

gesehen werden, bei denen sich die elektrische Stromabgabe kontinuierlich ändert, z. B. wenn der Brennstoffzellenstapel **100** elektrischen Strom zum Antrieb eines Motors für ein Fahrzeug liefert. Bei solchen Anwendungen braucht die Verzögerung nur hinreichend lang zu sein, um die Auswirkungen irgendwelcher Korrekturmaßnahmen zu bestimmen. Eine kurze Verzögerung ist wünschenswert, so dass der Sensor **104** mit einer ausreichenden Häufigkeit aktiviert wird, um auf Änderungen der elektrischen Stromabgabe reagieren zu können. Längere Verzögerungen können bei Anwendungen wie stationäre Kraftwerke vorgesehen werden, die eine eher konstante elektrische Stromabgabe erzeugen.

[0087] Wie aus [Fig. 10](#) ersichtlich ist, beginnt die Steuerlogik mit der Aktivierung der Steuerung **105** im Schritt **290**. Im Schritt **292** wird der Anfangswert der Wasserstoffgaskonzentration (C_0) auf Null eingestellt. Im Schritt **294** setzt die Steuerung **105** den Zählerwert "n" auf Eins. Im Schritt **296** aktiviert die Steuerung **105** den Sensor **104**, um das Vorhandensein von Wasserstoffgas im Kathodenabluftstrom zu detektieren. Der Sensor **104** gibt ein Ausgangssignal aus, das repräsentativ ist für die Wasserstoffgaskonzentration (C_n). Dieses Ausgangssignal wird an die Steuerung **105** geschickt, die im Schritt **298** bestimmt, ob C_n größer ist als die Schwellenkonzentration TC. Wenn C_n nicht größer als TC ist, wird angenommen, dass es keine Probleme durch Lecks oder Oxidationsmittelmangel gibt. Um den Wirkungsgrad durch Vermindern parasitärer elektrischer Lasten zu verbessern, geht die Steuerung **105** zum Schritt **300** weiter und verringert die Oxidationsmittel-Stöchiometrie um einen vorgegebenen Betrag (z. B. um einen festen Schritt oder einen Prozentsatz). Im Schritt **302** erhöht die Steuerung **105** dann den Wert von n um Eins, bevor sie zum Schritt **304** weitergeht. Im Schritt **304** wartet die Steuerung **105** den Ablauf einer vorgegebenen Verzögerungszeitspanne ab, bevor sie zum Schritt **296** zurückkehrt, um den Sensor **104** erneut zu aktivieren. Die Steuerung schleift deshalb solange durch die Schritte **296**, **298**, **300**, **302** und **304** als kein Oxidationsmittelmangel und keine Leckstellen oder andere Quellen für Wasserstoffgas in der Kathodenabluft festgestellt werden. Auf diese Weise wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie auf etwa Eins, oder bis C_n größer TC ist, verringert. Eine abnehmende Oxidationsmittel-Stöchiometrie vermindert so die parasitäre Leistungsverbrauch.

[0088] Wenn im Schritt **298** C_n größer als TC ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **306** weiter und vergleicht C_n mit der zuvor gemessenen Wasserstoffgaskonzentration $C_{(n-1)}$. Wenn $C_n - C_{(n-1)}$ negativ ist, weist dies darauf hin, dass die Wasserstoffgaskonzentration abgenommen hat, und die Steuerung **105** kehrt über die Schritte **302** und **304** zum Schritt **296** zurück. Solange die Wasserstoffgaskonzentration

abnimmt, greift die Steuerung **105** nicht ein, um irgendwelche Korrekturmaßnahmen vorzunehmen. Im Schritt **302** wird der Zählerwert n um Eins erhöht. Schritt **304** ist der Verzögerungsschritt.

[0089] Wenn jedoch die Steuerung **105** im Schritt **306** bestimmt, dass $C_n - C_{(n-1)}$ positiv ist, ist dies ein Hinweis darauf, dass die Wasserstoffgaskonzentration seit der vorigen Messung zugenommen hat. Dadurch wird die Steuerung **105** aufgefordert, Korrekturmaßnahmen zu ergreifen, indem sie zum Schritt **308** weitergeht. Im Schritt **308** bestimmt die Steuerung **105** aus dem aktuellen Oxidationsmittelmassenstrom, ob der Oxidationsmittelmassenstrom größer als oder gleich dem gewünschten Maximum ist oder nicht. Wenn nicht, geht die Steuerung **105** zum Schritt **310** weiter und erhöht die Oxidationsmittel-Stöchiometrie, z. B., indem eine Drehzahlerhöhung des Motors **112** veranlasst wird, so dass das mechanische Gerät **111** den Oxidationsmittelmassenstrom zum Brennstoffzellenstapel **100** erhöht. Nach dem Schritt **310** schleift die Steuerung **105** schließlich zum Schritt **296** zurück, nachdem sie die Zwischenschritte **302** (Erhöhen des Zählerwertes n um Eins) und **304** (Verzögerungsschritt) ausgeführt hat. Bei dieser Korrekturmaßnahme wird angenommen, dass die Ursache der erhöhten Wasserstoffgaskonzentration in der Kathodenabluft ein Oxidationsmittelmangel an der Kathode ist.

[0090] Wenn jedoch Oxidationsmittelmangel nicht die Ursache für die zunehmende Wasserstoffgaskonzentration in der Kathodenabluft ist, wird der Oxidationsmittelmassenstrom auf den maximalen Massenstrom erhöht. Im Schritt **308** erkennt dann die Steuerung **105**, dass Oxidationsmittelmangel nicht die Ursache des Problems ist und geht zum Schritt **312** weiter.

[0091] Im Schritt **312** senkt die Steuerung **105** den Druck des Brennstoffstroms um einen vorgegebenen Betrag (z. B. um einen festen Schritt oder einen Prozentsatz). Wenn die Quelle des in der Kathodenabluft detektierten Wasserstoffgases ein Leck im Brennstoffzellenstapel **100** ist, kann eine Senkung des Drucks des Brennstoffstroms eine entsprechende Auswirkung auf die Leckrate haben. Da die Brennstoff-Stöchiometrie zunächst größer als Eins sein kann (z. B. ist eine Brennstoff-Stöchiometrie von 1,5 oder 2,0 üblich), beeinflusst eine Verringerung des Brennstoffmassenstroms möglicherweise zunächst die elektrische Stromabgabe nicht. Im Schritt **314** prüft die Steuerung **105**, ob die elektrische Stromabgabe kleiner ist als der elektrische Strombedarf. Wenn die elektrische Stromabgabe nicht kleiner ist als der elektrische Strombedarf, schleift die Steuerung **105** zum Schritt **296** zurück, nachdem sie die Zwischenschritte **302** und **304** ausgeführt hat. Wenn jedoch die elektrische Stromabgabe geringer ist als der elektrische Strombedarf, zeigt dies an, dass ein

Problem mit dem Brennstoffzellenstapel **100** vorliegt, wodurch ein Betrieb mit dieser Kapazität verhindert wird. In diesem Fall geht die Steuerung **105** zum Schritt **316** weiter, in dem die Steuerung **105** entweder ein Warnsignal erzeugt oder ein Abschalten des Brennstoffzellenstapels veranlasst.

[0092] Bezüglich der Schritte **300**, **310** und **312** von [Fig. 10](#) kann die jeweilige Oxidationsmittel-Stöchiometrie oder der Brennstoffdruck um einen vorgegebenen festen Prozentsatz oder einen festen Schritt erhöht oder verringert werden. Die Änderung um den festen Prozentsatz der Oxidationsmittel-Stöchiometrie oder des Brennstoffdrucks kann z. B. 1 oder 2% betragen.

[0093] In [Fig. 11](#) sind die Schritte **320**, **322**, **324**, **326**, **328**, **332**, **334**, **336**, **340**, **342**, **344** und **346** im Wesentlichen gleich den Schritten **290**, **292**, **294**, **296**, **298**, **302**, **304**, **306**, **308**, **312**, **314** bzw. **316** von [Fig. 10](#). Beim Verfahren gemäß [Fig. 11](#) versucht jedoch die Steuerung **105**, eine Oxidationsmittel-Stöchiometrie aufrechtzuerhalten, die um einen gewünschten Betrag über 1,0 liegt (d. h. $1,0 + Y$). Y kann z. B. 0,05; 0,10; 0,20 oder sogar etwa 0,50 (d. h. ca. 50%) betragen. Vorzugsweise repräsentiert Y eine Erhöhung, die kleiner als 50% ist, um einen übermäßigen parasitären Leistungsverbrauch zu vermeiden. Auf diese Weise wird ein geringer, überschüssiger Oxidationsmittelpuffer bereitgestellt, um das Auftreten von Oxidationsmittelmangelbedingungen zu verhindern, die Wasserstoffgas in der Kathodenabluft erzeugen könnten. Die Oxidationsmittel-Stöchiometrie ist vorzugsweise immer noch erheblich niedriger als die Oxidationsmittel-Stöchiometrien in herkömmlich betriebenen Brennstoffzellen, so dass weiterhin eine deutliche Verringerung der parasitären elektrischen Last verursacht durch den Betrieb des mechanischen Geräts **111** für den Oxidationsmittelstrom erzielt wird.

[0094] Wenn bei der Ausführungsform gemäß [Fig. 11](#) die Steuerung **105** nach Schritt **328** bestimmt, dass die Wasserstoffgaskonzentration (C_n) kleiner ist als die Schwellenkonzentration TC, schleift die Steuerung über die Schritte **330**, **332** (Erhöhen des Zählerwertes n um Eins) und **334** (Verzögerungsschritt) zum Schritt **326** zurück. Im Schritt **330** verringert die Steuerung **105** die Oxidationsmittel-Stöchiometrie um eine vorgegebene Stufe (X), wobei X z. B. ca. 0,1 oder ca. 0,2 betragen kann. Wenn also X z. B. 0,1 und die Oxidationsmittel-Stöchiometrie 1,4 beträgt, würde die Steuerung **105** den Oxidationsmittelmassenstrom verstellen, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie auf 1,3 zu verringern. Obwohl also überschüssiges Oxidationsmittel an der Kathode vorhanden ist, wird der Oxidationsmittelmassenstrom durch die Schleife mit den Schritten **326**, **328**, **330**, **332** und **334** verringert, bis die Steuerung **105** im Schritt **328** bestimmt, dass C_n größer als TC ist, worauf die Steuerung

105 zum Schritt **336** weitergeht.

[0095] Im Schritt **336** von [Fig. 11](#) wird im Wesentlichen die gleiche Funktion ausgeführt wie im Schritt **306** von [Fig. 10](#). Das heißt, wenn die Wasserstoffgaskonzentration abnimmt (d. h. $C_n - C_{(n-1)}$ ist negativ), geht die Steuerung über die Schritte **332** und **334** zum Schritt **326** zurück. Die Steuerung **105** überwacht weiterhin periodisch C_n , ohne irgendwelche Maßnahmen zu ergreifen, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie aktiv zu erhöhen. Wenn die Steuerung **105** im Schritt **328** jedoch bestimmt, dass $C_n > TC$ und im Schritt **336**, dass die Wasserstoffgaskonzentration konstant oder zunehmend ist (d. h. $C_n - C_{(n-1)}$ ist nicht negativ), geht die Steuerung **105** zum Schritt **338** weiter.

[0096] Wenn die Steuerung **105** im Schritt **338** feststellt, dass die vorige Messung der Wasserstoffgaskonzentration kleiner als TC war, erhöht die Steuerung **105** im Schritt **348** den Oxidationsmittelmassenstrom um $(X + Y)$. Wenn z. B. TC einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie von ca. Eins entspricht, wird im Verfahren von [Fig. 11](#) die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Schritt **348** so gesteuert, dass sie ca. $1,0 + Y$ beträgt. Das heißt, in der vorigen Schleife war die Wasserstoffkonzentration $C_{(n-1)}$ kleiner als TC, aber eine Erhöhung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie um X bewirkte, dass die Wasserstoffkonzentration in der nächsten Schleife (d. h. in der aktuellen Schleife) größer ist als TC. Demzufolge lag $C_{(n-1)}$ in der vorigen Schleife nahe dem Wert von TC, und da bei diesem Beispiel eine gemessene Wasserstoffkonzentration von etwa TC einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie von ca. Eins entspricht, resultiert die Erhöhung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie um $(X + Y)$ in einer Oxidationsmittel-Stöchiometrie von ca. $1,0 + Y$.

[0097] Wenn die Steuerung **105** im Schritt **338** feststellt, dass die zuvor gemessene Wasserstoffgaskonzentration größer als TC war, geht die Steuerung **105** zum Schritt **340** weiter, um zu bestimmen, ob der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer als oder gleich einem gewünschten Maximum ist. Falls nicht, geht die Steuerung **105** zum Schritt **350** weiter und erhöht die Oxidationsmittel-Stöchiometrie um Z . Der Wert von Z ist vorzugsweise höher als $(X + Y)$, so dass dann, wenn C_n während der Dauer von mehr als einer Schleife größer ist als TC, die Oxidationsmittel-Stöchiometrie rascher erhöht wird.

[0098] Wenn die Steuerung **105** im Schritt **340** jedoch feststellt, dass der Oxidationsmittelmassenstrom bereits größer als oder gleich einem gewünschten Maximum ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **342** weiter. Die Schritte **342**, **344** und **346** sind im Wesentlichen die gleichen wie die entsprechenden Schritte **312**, **314** und **316** in [Fig. 10](#).

[0099] [Fig. 12](#) zeigt eine andere bevorzugte Aus-

führungsform eines Verfahrens zum Steuern der Oxidationsmittelversorgung einer Brennstoffzelle. Beim Verfahren gemäß [Fig. 12](#) wird der bevorzugte Oxidationsmittel-Versorgungsmassenstrom für eine vorgegebene Oxidationsmittel-Stöchiometrie für einen Bereich spezifischer elektrischer Stromabgaben kalibriert. Während einer Kalibrierprozedur bestimmt die Steuerung **105** die gewünschten Oxidationsmittel-massenströme (für eine bestimmte Oxidationsmittel-stromzusammensetzung) für ausgewählte elektrische Stromabgaben und speichert die gewünschten Massenströme in einer Nachschlagetabelle. Wenn dieses Verfahren angewendet wird, bestimmt der Bedarf an elektrischem Strom den Oxidationsmittelmassenstrom. Das heißt, eine Steuerung überwacht den elektrischen Strombedarf und stellt den Oxidationsmittelmassenstrom anhand einer Nachschlagetabelle ein, die den gewünschten Oxidationsmittelmassenstrom für ausgewählte Bedarfswerte an elektrischem Strom angibt. Auf diese Weise wird die Oxidationsmittel-Stöchiometrie so gesteuert, dass die Menge des an den Brennstoffzellenstapel **100** gelieferten überschüssigen Oxidationsmittels verringert wird, wodurch der parasitäre elektrische Leistungsverbrauch gesenkt wird.

[0100] [Fig. 12](#) zeigt eine Kalibrierprozedur zur Bestimmung des Oxidationsmittelmassenstroms für verschiedene ausgewählte elektrische Stromabgaben. Wenn der Brennstoffzellenstapel **100** aktuell betrieben wird, kann der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom durch Interpolieren zwischen ausgewählten elektrischen Lasten bestimmt werden, um den gewünschten Oxidationsmittelmassenstrom zu bestimmen, falls die elektrische Stromabgabe zwischen gewählten Lasten in der Nachschlagetabelle enthaften ist.

[0101] Bei einer alternativen Ausführungsform kann die Kalibrierprozedur zur direkten Kalibrierung des Oxidationsmittelzufuhrsystems verwendet werden. Bei einem System, das z. B. einen Oxidationsmittel-Kompressor verwendet, wird das System so kalibriert, dass es die Drehzahl des Kompressors als Reaktion auf ausgewählte Bedarfswerte für elektrischen Strom steuert. Auf diese Weise braucht der Oxidationsmittelmassenstrom nicht gemessen zu werden, und mit jeder Kalibrierung kompensiert der Kalibrierungsprozess automatisch eine eventuelle Verschlechterung der Kompressorleistung während seiner Betriebslebensdauer.

[0102] Die in [Fig. 12](#) dargestellte Kalibrierprozedur kann periodisch ausgeführt werden, wenn der Brennstoffzellenstapel **100** im Zuge der regelmäßigen Wartung gewartet wird. Die Prozedur beginnt im Schritt **360** mit der Aktivierung der Steuerung **105**. Da bei dieser Ausführungsform die Kalibrierung typischerweise während der Wartungsperioden erfolgt, können die Steuerung **105** und der Sensor **104** vom

Brennstoffzellensystem abnehmbar ausgeführt sein. Auf diese Weise kann ein und dieselbe Ausrüstung zur Kalibrierung einer Mehrzahl Brennstoffzellenstapel verwendet werden. Es kann eine Kupplung vorgesehen werden, damit das Sensorelement so in die Brennstoffzelle eingesetzt werden kann, dass es dem Kathodenabluftstrom ausgesetzt ist.

[0103] Im Schritt **362** wird eine elektrische Stromabgabe gewählt und der Brennstoffzellenstapel **100** so betrieben, dass er diese elektrische Stromabgabe erzeugt. Die gewählte elektrische Stromabgabe kann jede elektrische Stromabgabe innerhalb des Betriebsbereichs des Brennstoffzellenstapels **100** sein. Während der Kalibrierprozedur wird typischerweise eine Mehrzahl elektrischer Stromabgaben gewählt, so dass es sich anbietet, mit der elektrischen Stromabgabe am unteren Ende des Bereichs zu beginnen; anschließend können progressiv höher werdende elektrische Stromabgaben gewählt werden, um die Kalibrierprozedur abzuschließen.

[0104] Im Schritt **364** greift die Steuerung **105** auf eine Nachschlagetabelle zu, um den zuvor kalibrierten Oxidationsmittelmassenstrom für die gewählte elektrische Stromabgabe zu ermitteln. Die Steuerung **105** stellt dann den Oxidationsmittelmassenstrom so ein, dass er zunächst um 1% höher ist als der zuvor für die gewählte elektrische Stromabgabe kalibrierte Oxidationsmittelmassenstrom. Vorzugsweise wird der Oxidationsmittelmassenstrom so kalibriert, dass eher mit einem erhöhten Oxidationsmittelmassenstrom als mit einem knapp bemessenen Oxidationsmittel begonnen wird, da diese Vorsichtsmaßnahme verhindert, dass die Kalibrierprozedur unter Oxidationsmittelmangelbedingungen beginnt.

[0105] Im Schritt **366** wird der Sensor **104** aktiviert, um das Vorhandensein von Wasserstoffgas im Kathodenabluftstrom zu detektieren. Wenn der Brennstoffzellenstapel **100** zunächst mit überschüssigem Oxidationsmittel versorgt wird, wird im Schritt **368** erwartet, dass die Wasserstoffgaskonzentration C niedriger ist als die Schwellenkonzentration TC. Wenn die Steuerung **105** bestimmt, dass C nicht größer ist als TC, setzt die Steuerung **105** die Verringerung des Oxidationsmittelmassenstroms fort, indem sie über Schritt **370** zum Schritt **366** zurückschleift. Mit jeder Schleife durch den Schritt **370** senkt die Steuerung **105** den Oxidationsmittelmassenstrom um eine Stufe A. Der Wert der Stufe A kann z. B. Stöchiometrieverringerungen von beispielsweise 0,05 oder 0,1 entsprechen, so dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie bei jeder Ausführung von Schritt **370** um diesen Betrag verringert wird. Da die gewählte Last während der Kalibrierprozedur konstant ist, resultieren Änderungen des Oxidationsmittelmassenstroms in entsprechenden Änderungen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie. Die Genauigkeit der Kalibrierprozedur kann erhöht werden, indem der Wert

von A verkleinert wird, so dass mehr Kalibrierungsschleifen mit kleineren inkrementellen Verringerungen des Oxidationsmittelmassenstroms ausgeführt werden.

[0106] Wenn der Oxidationsmittelmassenstrom schließlich so weit verringert worden ist, dass die Wasserstoffgaskonzentration C größer als TC ist, geht die Steuerung **105** zum Schritt **372** weiter und erhöht den Oxidationsmittelmassenstrom um eine Stufe B. Als Nächstes setzt die Steuerung **105** die Nachschlagetabelle im Schritt **374** zurück, so dass der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom in der Nachschlagetabelle dem aktuellen Massenstrom für die gewählte elektrische Stromabgabe entspricht. Schließlich kann die Steuerung **105** im Schritt **378** wählen, ob die Kalibrierprozedur beendet oder eine andere elektrische Stromabgabe für die Kalibrierung des Oxidationsmittelmassenstroms im Schritt **376** gewählt werden soll. Wenn Schritt **376** gewählt wird, wird eine andere elektrische Stromabgabe gewählt und die Steuerung **105** kehrt zum Schritt **364** zurück, in dem die Kalibrierprozedur für die neu gewählte elektrische Stromabgabe erneut beginnt.

[0107] Der Wert von A und B kann gleich sein, oder B kann größer als A sein. Wenn B größer ist als A, werden die Werte der Nachschlagetabelle so kalibriert, dass ein Oxidationsmittelüberschuss an die Kathode geliefert wird. Je größer die Differenz zwischen den Werten für B und A ist, umso größer ist der Überschuss. Eine Überschussversorgung mit Oxidationsmittel trägt dazu bei, die Wahrscheinlichkeit von Oxidationsmittelmangelbedingungen zu verringern, durch die Wasserstoffgas im Oxidationsmittelstrom erzeugt werden könnte. Wenn eine dynamische Stromabgabe erwartet wird, kann eine höhere Oxidationsmittel-Stöchiometrie bevorzugt sein, um einen Oxidationsmittelmangel während der Übergangsperioden, in denen sich die elektrische Stromabgabe ändert, zu vermeiden. Der Wert von B wird vorzugsweise so gewählt, dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie im Allgemeinen kleiner ist als Zwei und vorzugsweise zwischen ca. Eins und ca. 1,5 liegt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Brennstoffzellensystems, wobei das System ein Brennstoffzellen-Stromerzeugungsuntersystem mit mindestens einer Brennstoffzelle und ein Oxidationsmittelzufuhruntersystem aufweist, das ein mechanisches Gerät zum Liefern eines Oxidationsmittelstroms an eine Kathode der Brennstoffzelle aufweist, wobei das Verfahren das Steuern des mechanischen Geräts zum Verringern der parasitären Leistungsaufnahme umfasst, indem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert wird, bis $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ größer ist als ein vorgegebener Wert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Brennstoffzelle eine Festpolymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgegebene Wert von $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ größer als oder gleich 0,02 V ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgegebene Wert von $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ zwischen ca. 0,3 V und ca. 7,0 V liegt.

5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgegebene Wert von $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ bestimmt wird, wenn die Zellenspannung unter eine Schwellenspannung sinkt.

6. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgegebene Wert von $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ bestimmt wird, wenn ein Oxidationsmittelmangel an der elektrochemisch aktiven Fläche der Kathode eintritt.

7. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die Bestimmung, dass $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ größer ist als der vorgegebene Wert erfolgt, indem eine Schwellenkonzentration von Wasserstoff im Kathodenabluftstrom erfasst wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgegebene Wert für $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ bestimmt wird, wenn die Oxidationsmittel-Stöchiometrie kleiner ist als ein Schwellenwert, der zwischen ca. 1,0 und ca. 2,0 liegt.

9. Verfahren nach Anspruch 8, ferner die Messung der Sauerstoffkonzentration im Kathodenabluftstrom zur Berechnung der Oxidationsmittel-Stöchiometrie aufweisend, um zu bestimmen, wann die Oxidationsmittel-Stöchiometrie kleiner ist als die Schwellen-Oxidationsmittel-Stöchiometrie.

10. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der vorgegebene Wert für $dV/d(\text{Oxidationsmittel-Stöchiometrie})$ bestimmt wird, wenn der Wert der Zellenspannung kleiner ist als eine Schwellenzellenspannung, und die Zellenspannung überwacht wird, um zu bestimmen, wann das Verringern der Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu beenden ist.

11. Verfahren nach Anspruch 10, ferner das Steuern des Oxidationsmittelzufuhruntersystems aufweisend, um die Ausgangsspannung innerhalb eines vorgegebenen Spannungsbereichs zu halten, der einem Oxidationsmittel-Stöchiometriebereich zwischen ca. 1,0 und ca. 2,0 entspricht, wobei die Schwellenzellenspannung der Zellenspannung am unteren Grenzwert des vorgegebenen Spannungsbereichs entspricht.

12. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Oxidationsmittelstrom ein verdünnter Oxidationsmittelstrom ist.

13. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem der Oxidationsmittelstrom Luft ist.

14. Verfahren nach Anspruch 8, ferner das Steuern des mechanischen Geräts aufweisend, um die Oxidationsmittel-Stöchiometrie während stationärer Betriebsbedingungen bei ca. 1,0 konstant zu halten.

15. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das mechanische Gerät aus einer Gruppe bestehend aus einem Verdichter, einem Gebläse, einer Pumpe und einem Lüfter ausgewählt wird und bei dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie verringert wird, indem die Drehzahl des mechanischen Geräts verringert wird.

16. Verfahren nach Anspruch 9, ferner das Überwachen des elektrischen Stroms aufweisend, der vom Brennstoffzellen-Stromerzeugungsuntersystem abgegeben wird.

17. Verfahren zum Betreiben einer Brennstoffzelle, bei dem die Brennstoffzelle eine Kathode hat, an die ein Oxidationsmittelstrom geliefert wird, und eine Anode, an die ein Brennstoffstrom geliefert wird, wobei das Verfahren aufweist:

- (a) Überwachen eines Kathodenabluftstroms stromabwärts der Kathode, um die Wasserstoffgaskonzentration zu erfassen; und
- (b) Verringern der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffgaskonzentration geringer ist als eine erste Schwellenkonzentration.

18. Verfahren nach Anspruch 17, bei dem die Brennstoffzelle eine aus einer Mehrzahl Brennstoffzellen ist, die in einem Brennstoffzellenstapel angeordnet sind, und der Kathodenabluftstrom stromabwärts einer Mehrzahl Kathoden überwacht wird, die dieser Mehrzahl Brennstoffzellen zugehörig sind.

19. Verfahren nach Anspruch 17, ferner das Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie aufweisend, wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration.

20. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die erste Schwellenkonzentration der untere Detektionsgrenzwert eines Wasserstoffsensors ist, der zum Überwachen des Kathodenabluftstroms verwendet wird.

21. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die zweite Schwellenkonzentration ca. 20 ppm Wasserstoff entspricht.

22. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie eingestellt wird, in-

dem die Oxidationsmittelkonzentration in dem an die Kathode gelieferten Oxidationsmittelstrom geändert wird.

23. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie eingestellt wird, indem der von der Brennstoffzelle abgegebene elektrische Strom geändert wird.

24. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie eingestellt wird, indem der an die Kathode gelieferte Oxidationsmittelmassenstrom geändert wird.

25. Verfahren nach Anspruch 24, bei dem der Oxidationsmittelmassenstrom eingestellt wird, indem die Drehzahl eines mechanischen Geräts geändert wird, das den Oxidationsmittelstrom an die Kathode liefert.

26. Verfahren nach Anspruch 24, bei dem der Oxidationsmittelmassenstrom um einen festen Betrag oder einen festen Prozentsatz des momentanen Oxidationsmittelmassenstroms geändert wird.

27. Verfahren nach Anspruch 24, bei dem die Oxidationsmittel-Stöchiometrie eingestellt wird, indem der Oxidationsmittelmassenstrom um einen Betrag geändert wird, der von der Größe der erfassten Wasserstoffgaskonzentration abhängt.

28. Verfahren nach Anspruch 17, ferner Schritte zum Verringern der Wasserstoffgaskonzentration im Kathodenabluftstrom aufweisend, wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration, wobei diese Schritte den Vergleich des Oxidationsmittelmassenstroms mit einem maximalen gewünschten Massenstrom aufweisen; und

- (a) Erhöhen des Oxidationsmittelmassenstroms, wenn der Oxidationsmittelmassenstrom kleiner ist als der maximale erwünschte Massenstrom; und
- (b) wenn der Oxidationsmittelmassenstrom größer als oder gleich groß wie der maximale gewünschte Massenstrom ist, Beenden des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine dritte Konzentrationsschwelle, die größer ist als die erste und zweite Konzentrationschwelle; und Erzeugen eines Warnsignals und Fortsetzen des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn die Wasserstoffgaskonzentration niedriger ist als die dritte Konzentrationschwelle.

29. Verfahren nach Anspruch 19, bei dem das Verfahren ferner aufweist, keine Schritte zum Ändern der Oxidationsmittel-Stöchiometrie zu ergreifen, wenn die Wasserstoffgaskonzentration zwischen der ersten und zweiten Schwellenkonzentration liegt.

30. Verfahren nach Anspruch 24, ferner umfassend nach dem Erhöhen des Oxidationsmittelmassenstroms das Vergleichen des Oxidationsmittelmassenstroms mit einem gewünschten Oxidationsmittelmassenstrom für die momentane elektrische Stromabgabe der Brennstoffzelle und das Erzeugen eines Warnsignals oder das Beenden des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn der Oxidationsmittelmassenstrom um mehr als einen vorgegebenen Betrag höher ist als der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom.

31. Verfahren nach Anspruch 28, bei dem der gewünschte Oxidationsmittelmassenstrom aus einer Nachschlagetabelle bestimmt wird.

32. Verfahren nach Anspruch 17, bei dem das Überwachen das kontinuierliche Überwachen des Kathodenabluftstroms auf die Wasserstoffgaskonzentration und das Bestimmen, ob die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt oder abnimmt aufweist, und wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration, das Verfahren ferner aufweist:

Aufrechterhalten einer im Wesentlichen konstanten Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffkonzentration abnimmt; und Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffkonzentration zunimmt.

33. Verfahren nach Anspruch 32, ferner aufweisend:

Erzeugen eines Warnsignals, wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher als die erste Schwellenkonzentration ist, die Wasserstoffgaskonzentration im Kathodenabluftstrom zunimmt und der Oxidationsmittelstrom mit einem maximalen gewünschten Massenstrom fließt.

34. Verfahren nach Anspruch 33, ferner das Steuern des Brennstoffstroms zum Verringern des Brennstoffstromdrucks aufweisend, wenn das Warnsignal erzeugt wird.

35. Verfahren nach Anspruch 34, ferner das Überwachen der elektrischen Stromabgabe der Brennstoffzelle und das Fortsetzen des Betriebs der Brennstoffzelle aufweisend, wenn die elektrische Stromabgabe nicht geringer ist als ein Bedarf an elektrischem Strom, und das Beenden des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn die elektrische Stromabgabe um einen vorgegebenen Betrag geringer ist als der Bedarf an elektrischem Strom.

36. Verfahren nach Anspruch 34, ferner das Kontrollieren der elektrischen Stromabgabe aufweisend, und Fortsetzen des Betriebs der Brennstoffzelle, wenn die elektrische Stromabgabe nicht geringer ist als der Bedarf an elektrischem Strom, und

Erzeugen eines Warnsignals, wenn die elektrische Stromabgabe geringer ist als der Bedarf an elektrischem Strom und dann Wählen zwischen einem Betreiben bei reduzierter elektrischer Stromabgabe und einem Beenden des Betriebs der Brennstoffzelle.

37. Verfahren nach Anspruch 17, bei dem das Überwachen das kontinuierliche Überwachen des Kathodenabluftstroms auf die Wasserstoffgaskonzentration und das Bestimmen, ob die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt oder abnimmt aufweist, und wenn die Wasserstoffgaskonzentration höher ist als eine zweite Schwellenkonzentration, das Verfahren ferner aufweist:

Aufrechterhalten einer konstanten Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Wasserstoffkonzentration abnimmt; und

Messen der Brennstoffzellenspannung und Vergleichen der Brennstoffzellenspannung mit einem Spannungsschwellenwert; und

Senken des Brennstoffstromdrucks, wenn die Brennstoffzellenspannung den Spannungsschwellenwert überschreitet und die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt;

Erhöhen der Oxidationsmittel-Stöchiometrie, wenn die Brennstoffzellenspannung niedriger ist als der Spannungsschwellenwert, die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt und der Oxidationsmittelmassenstrom kleiner ist als das gewünschte Maximum; und Erhöhen des Brennstoffstromdrucks, wenn die Brennstoffzellenspannung niedriger ist als der Spannungsschwellenwert, die Wasserstoffgaskonzentration zunimmt und der Oxidationsmittelmassenstrom größer als oder gleich ist wie das gewünschte Maximum.

38. Verfahren nach Anspruch 37, ferner das Regeln des Fluiddrucks des Oxidationsmittel- und Brennstoffstroms aufweisend, um eine Druckdifferenz zwischen dem Oxidationsmittel- und dem Brennstoffstrom zu erhöhen.

39. Verfahren nach Anspruch 37, ferner das Regeln des Fluiddrucks des Oxidationsmittel- und Brennstoffstroms aufweisend, um eine Druckdifferenz zwischen dem Oxidationsmittel- und dem Brennstoffstrom zu verringern.

40. Verfahren nach Anspruch 37, bei dem der Spannungsschwellenwert ca. 100 mV beträgt.

41. Verfahren nach Anspruch 37, ferner das Beenden des Betriebs der Brennstoffzelle aufweisend, wenn die elektrische Stromabgabe geringer ist als der Bedarf an elektrischem Strom.

42. Verfahren nach Anspruch 17, bei dem die Überwachung periodisch erfolgt.

43. Verfahren nach Anspruch 24, bei dem der

Oxidationsmittelmassenstrom verringert wird, bis die zweite vorgegebene Schwellenkonzentration des Wasserstoffgases erfasst und dann der Oxidationsmittelmassenstrom um einen vorgegebenen Prozentsatz erhöht wird, so dass die Oxidationsmittel-Stöchiometrie um einen vorgegebenen Prozentsatz, der größer als ca. eins ist, erhöht wird.

44. Verfahren nach Anspruch 43, bei dem der vorgegebene Prozentsatz kleiner ist als 50%.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

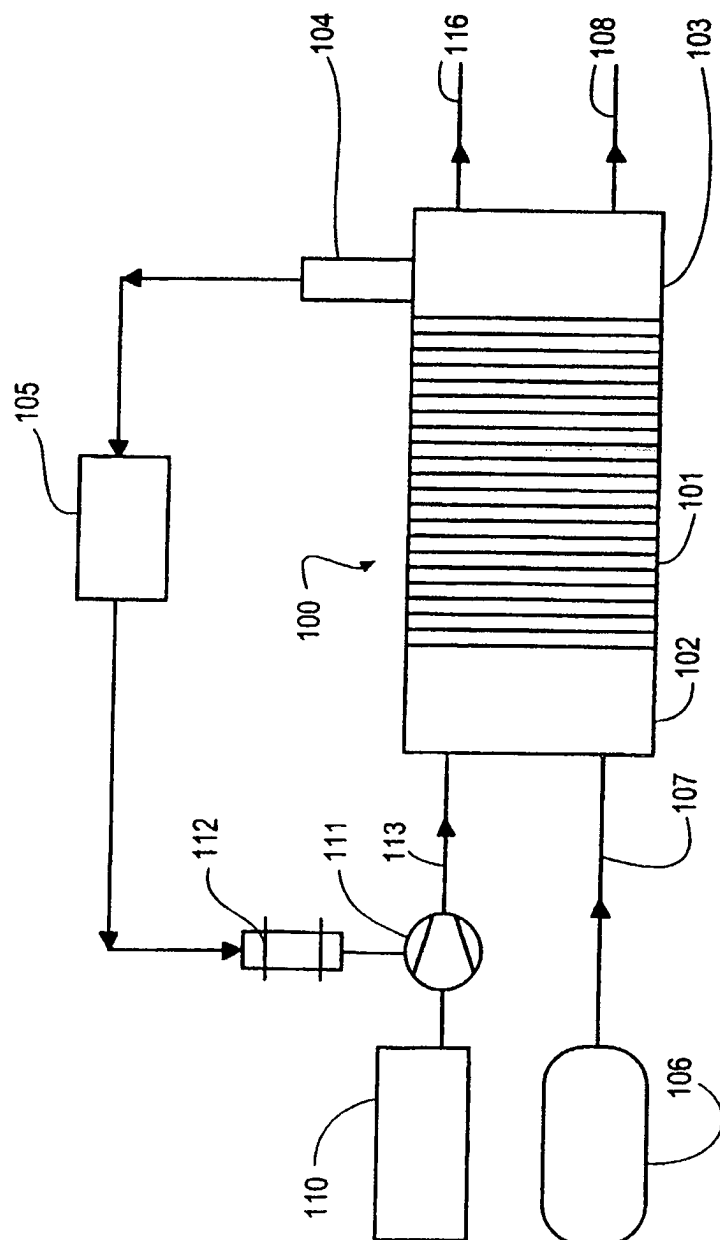


FIG. 2A

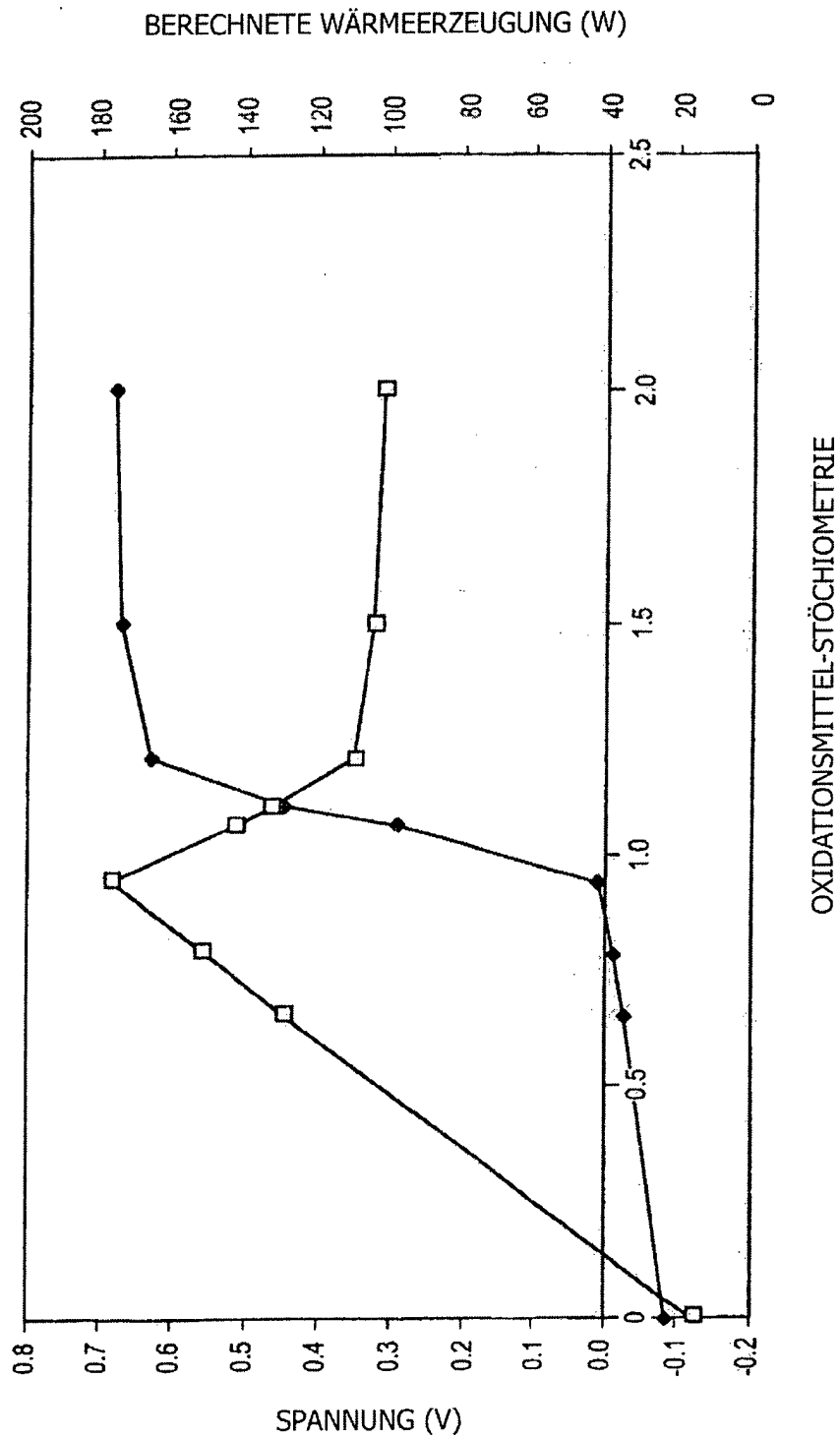


FIG. 2B

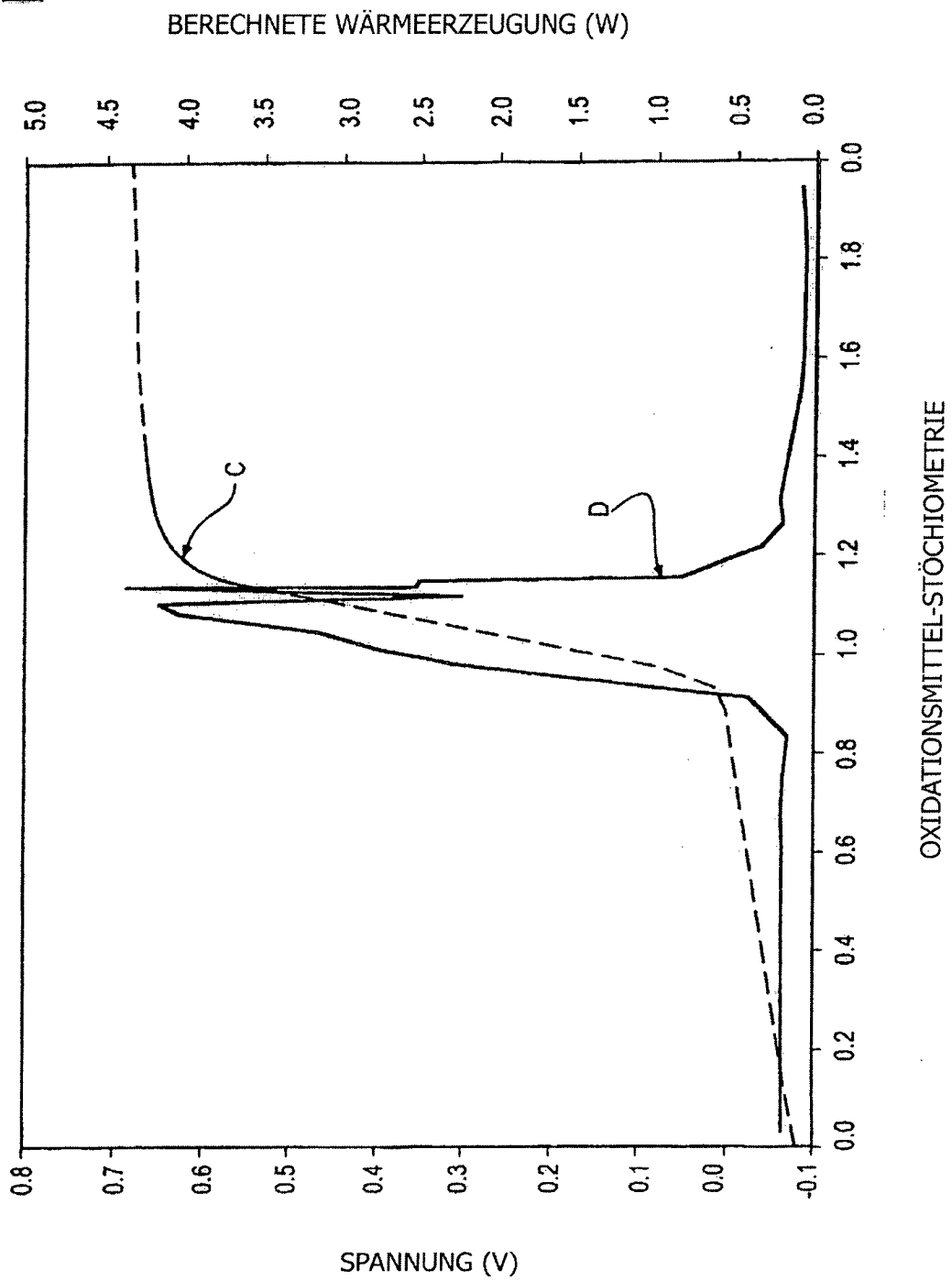


FIG. 2C

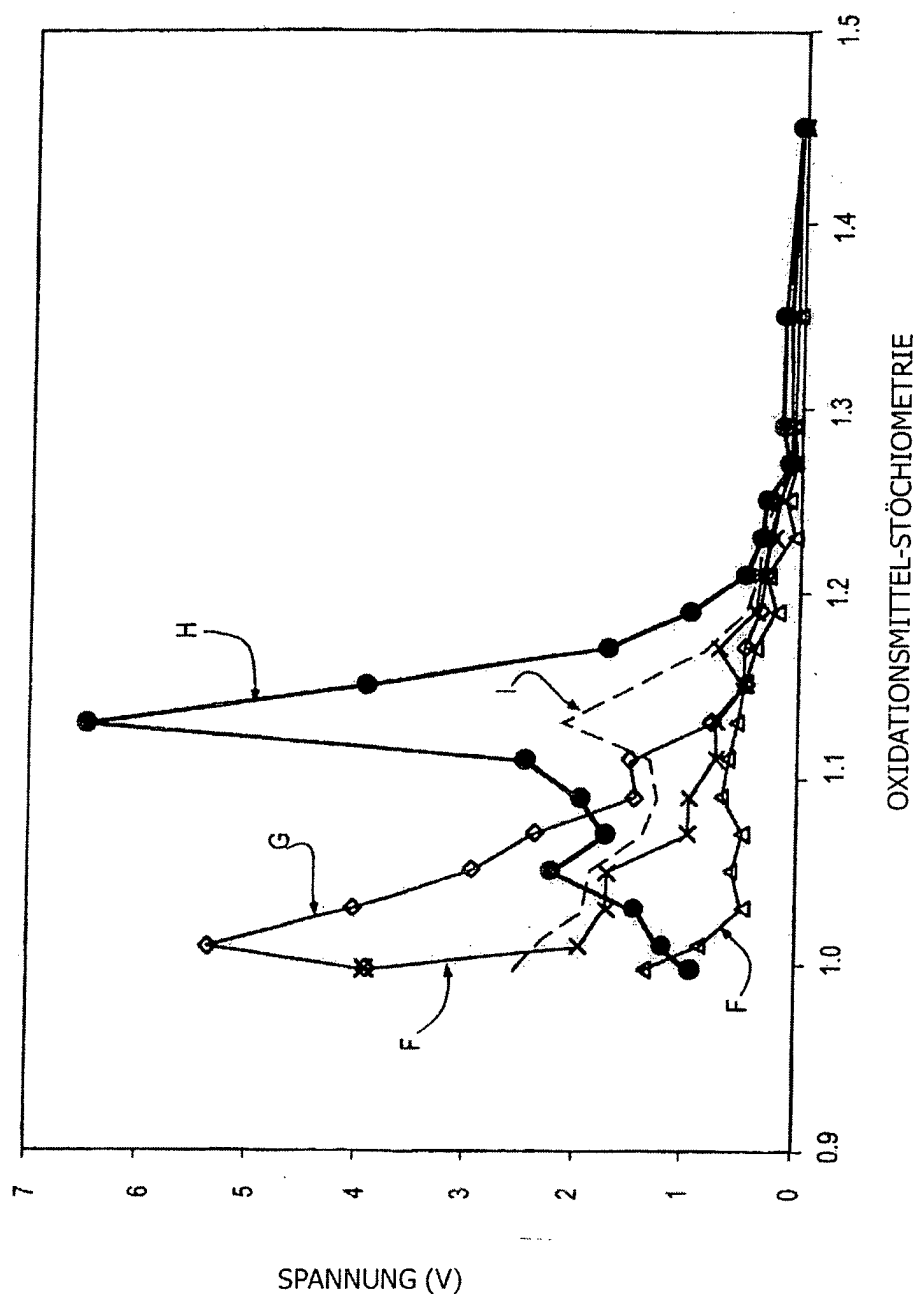


FIG. 3A

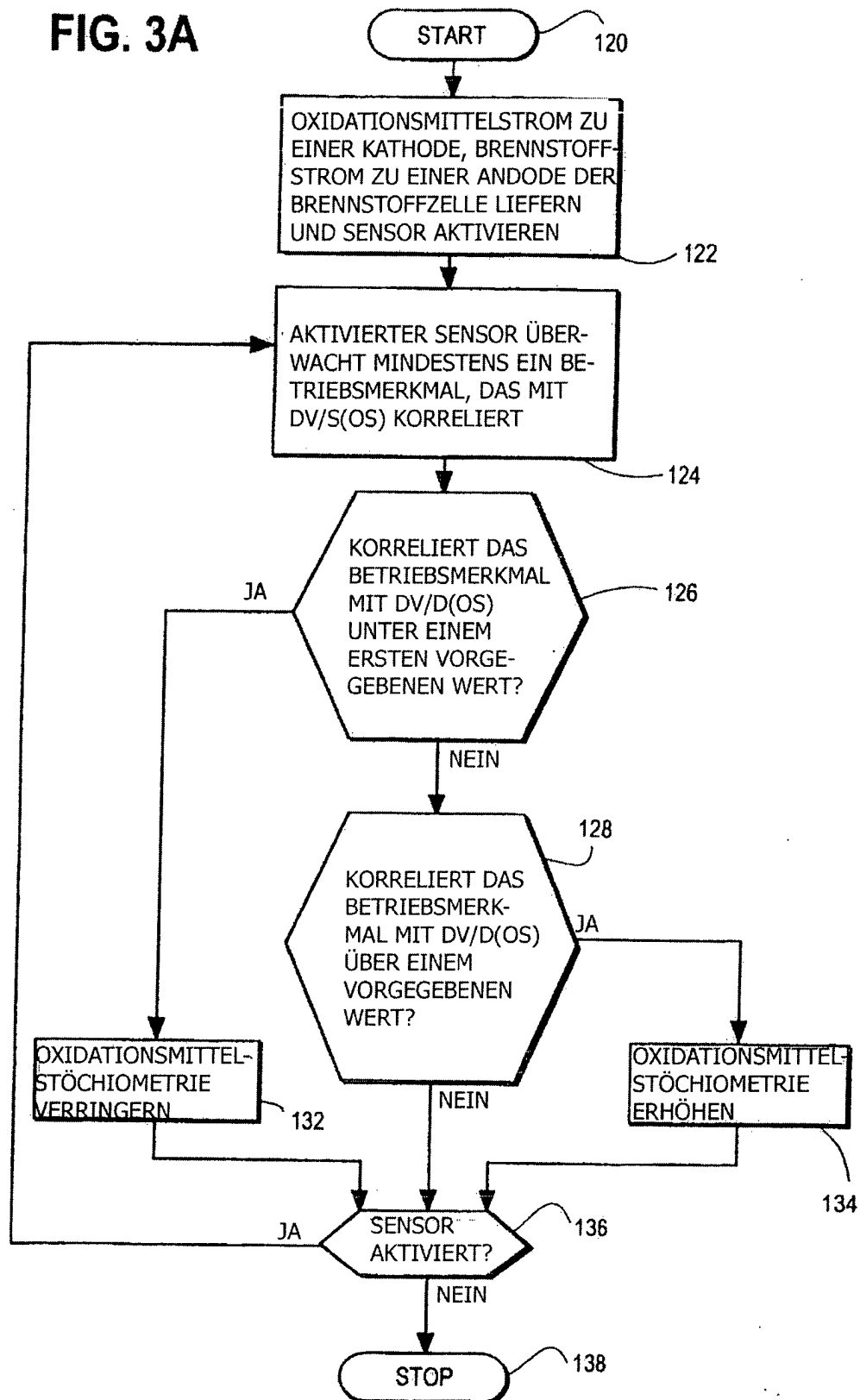


FIG. 3B

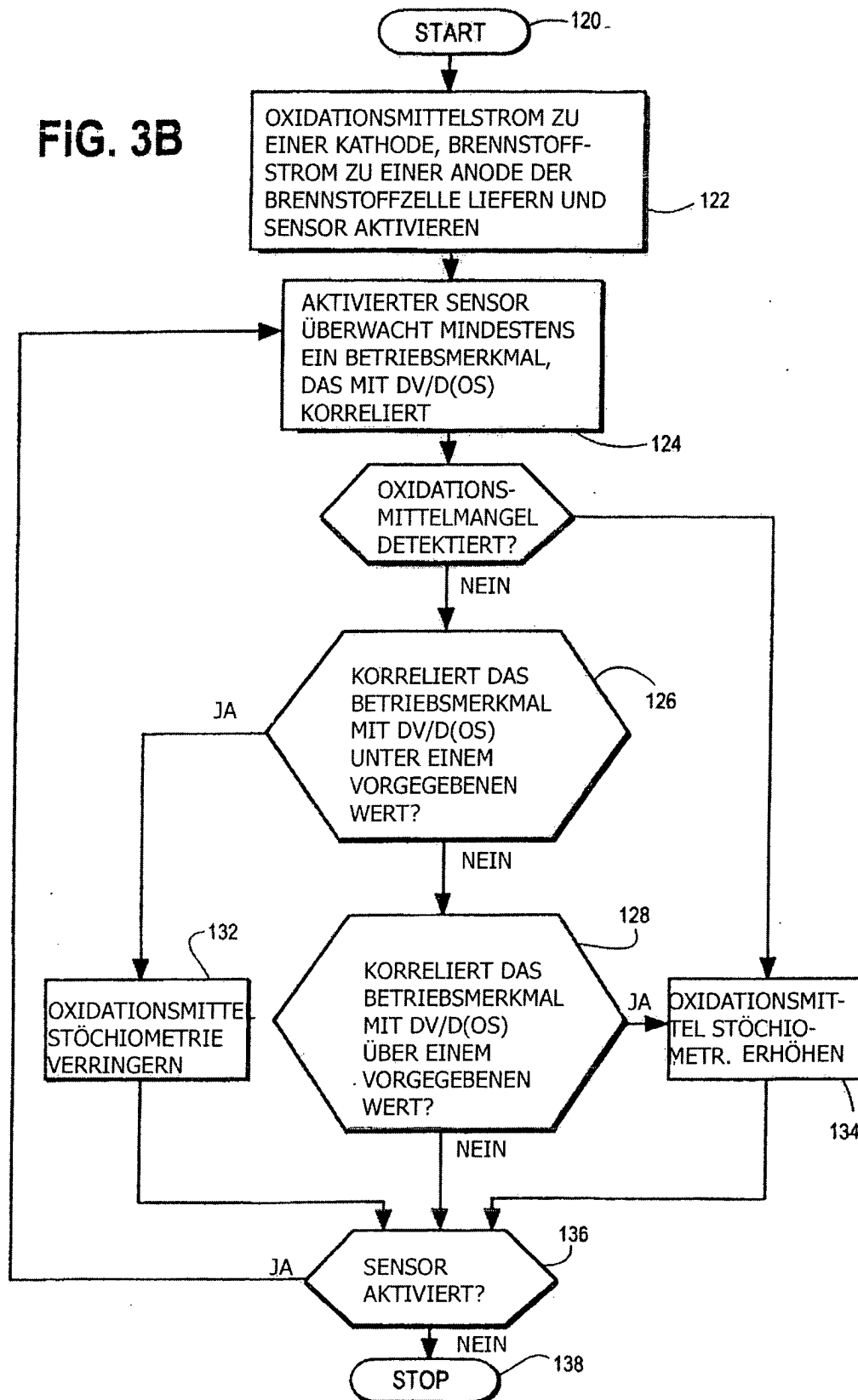


FIG. 4

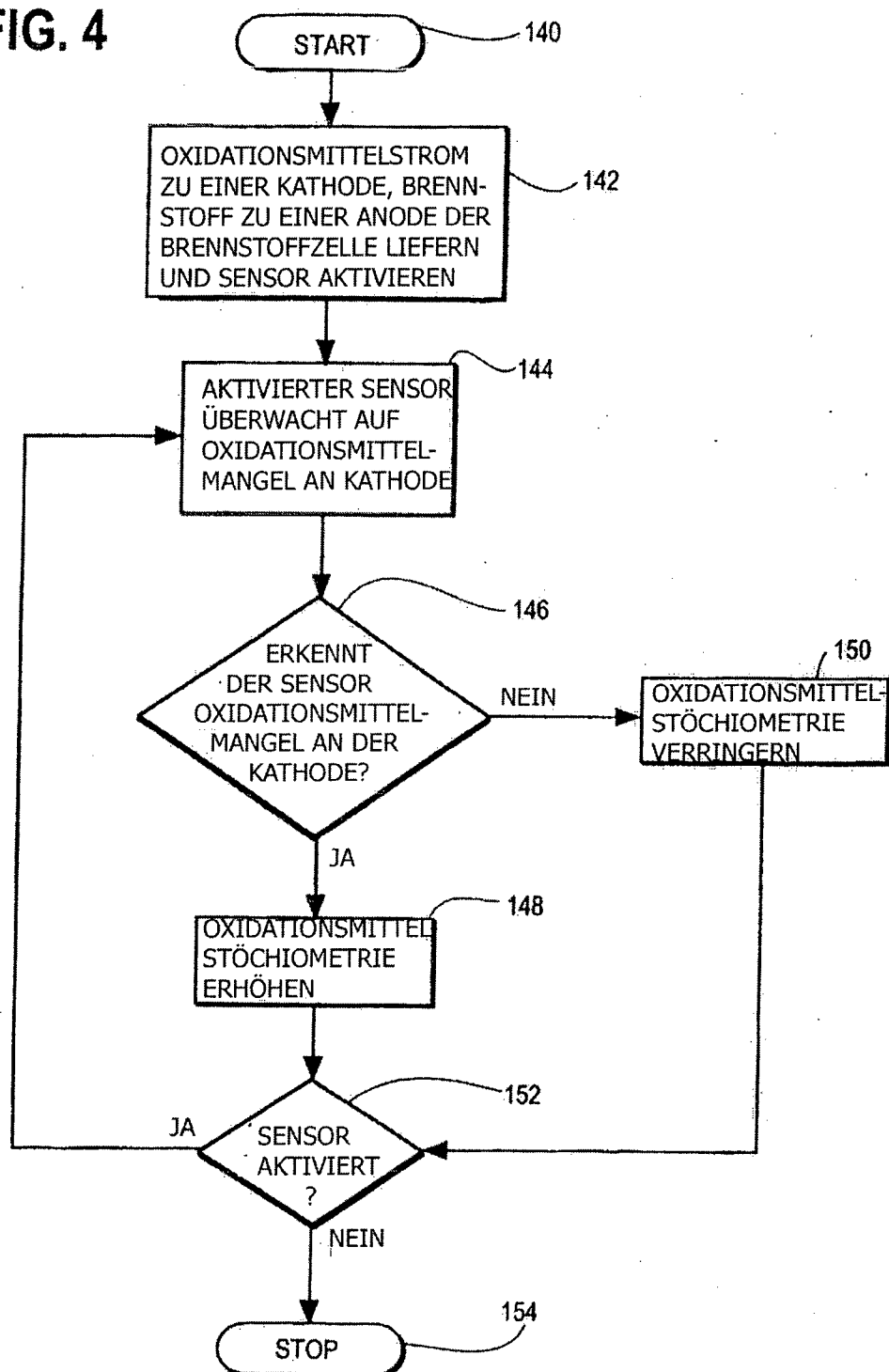


FIG. 5

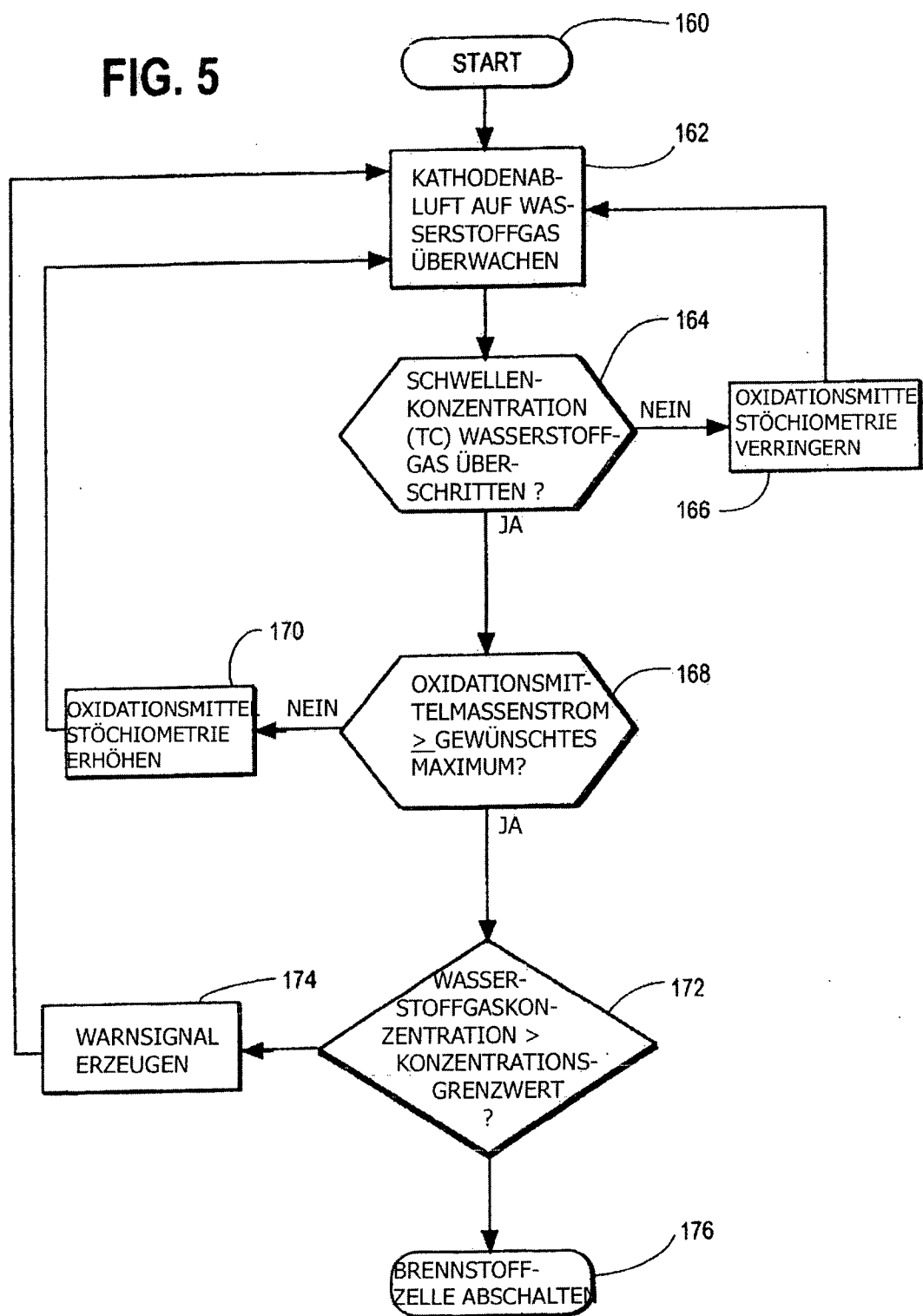


FIG. 6

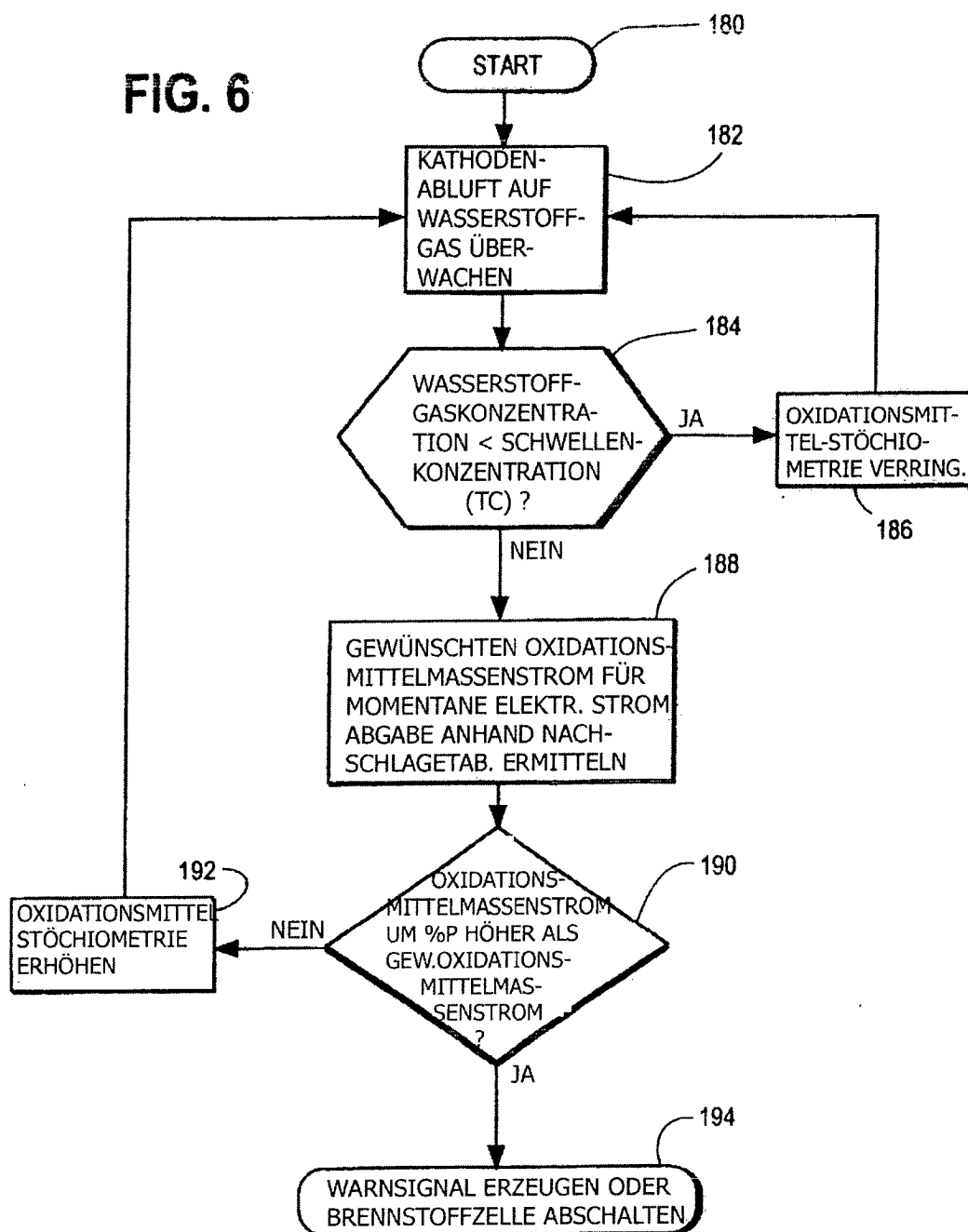


FIG. 7

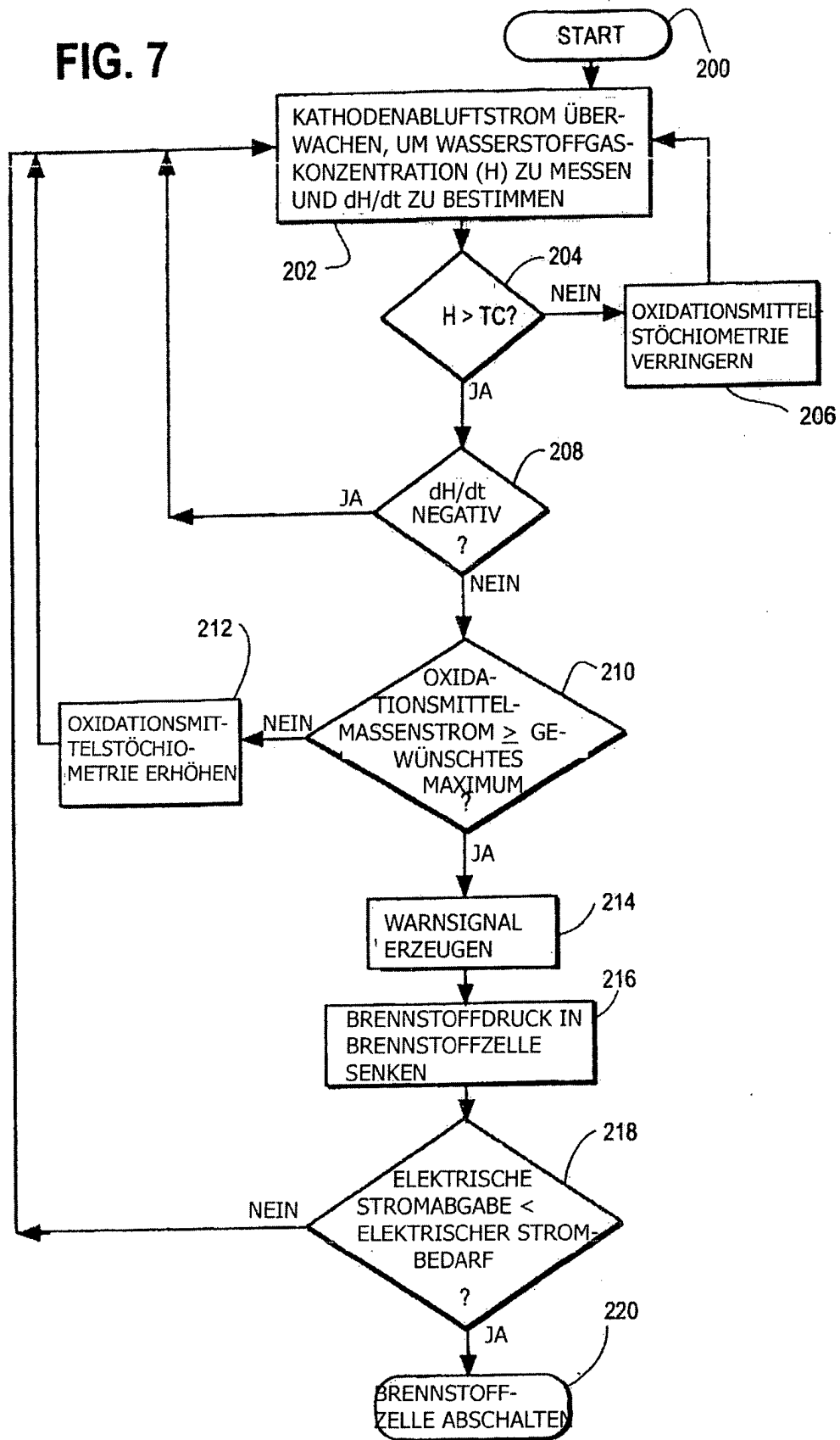


FIG. 8

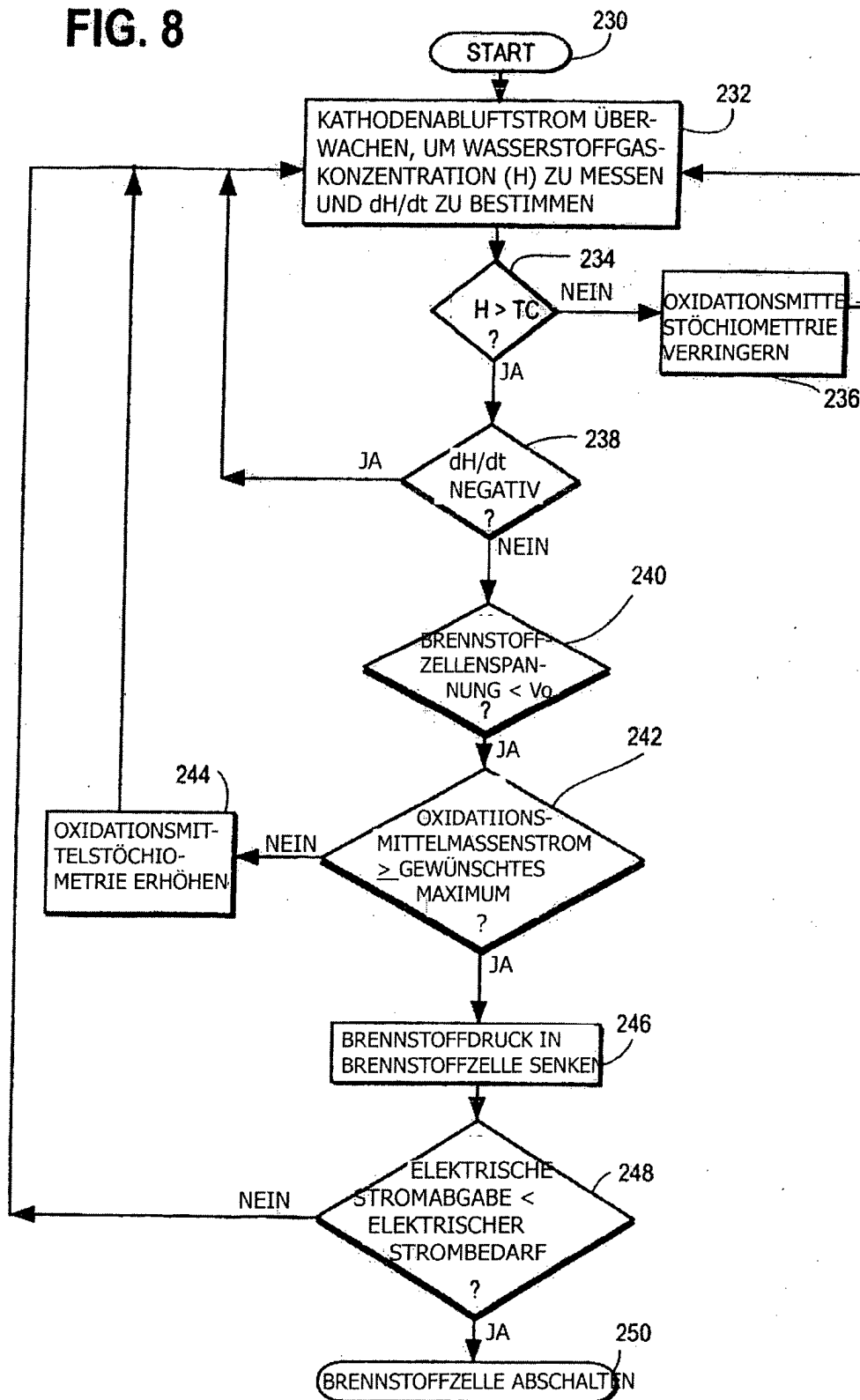


FIG. 9

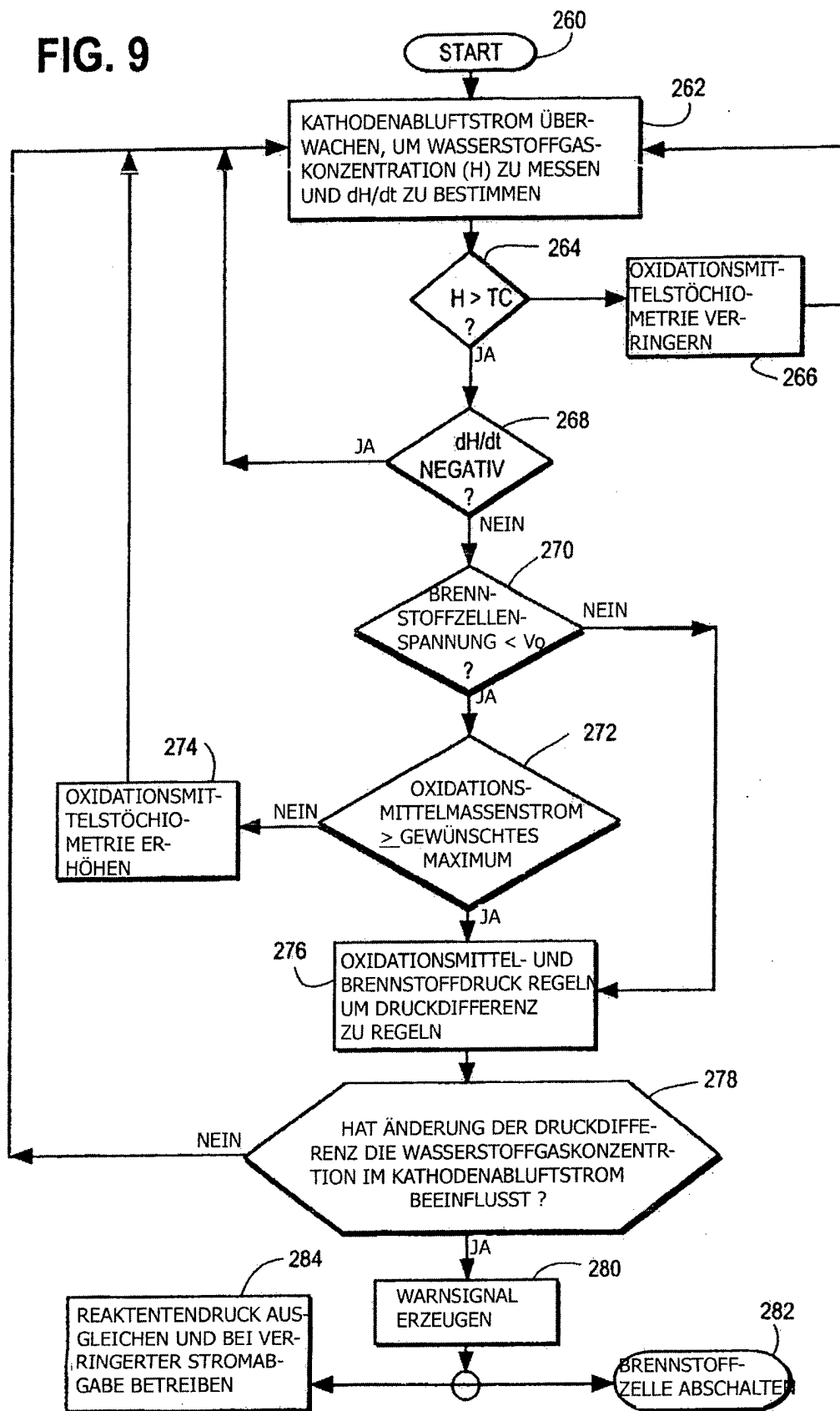


FIG. 10

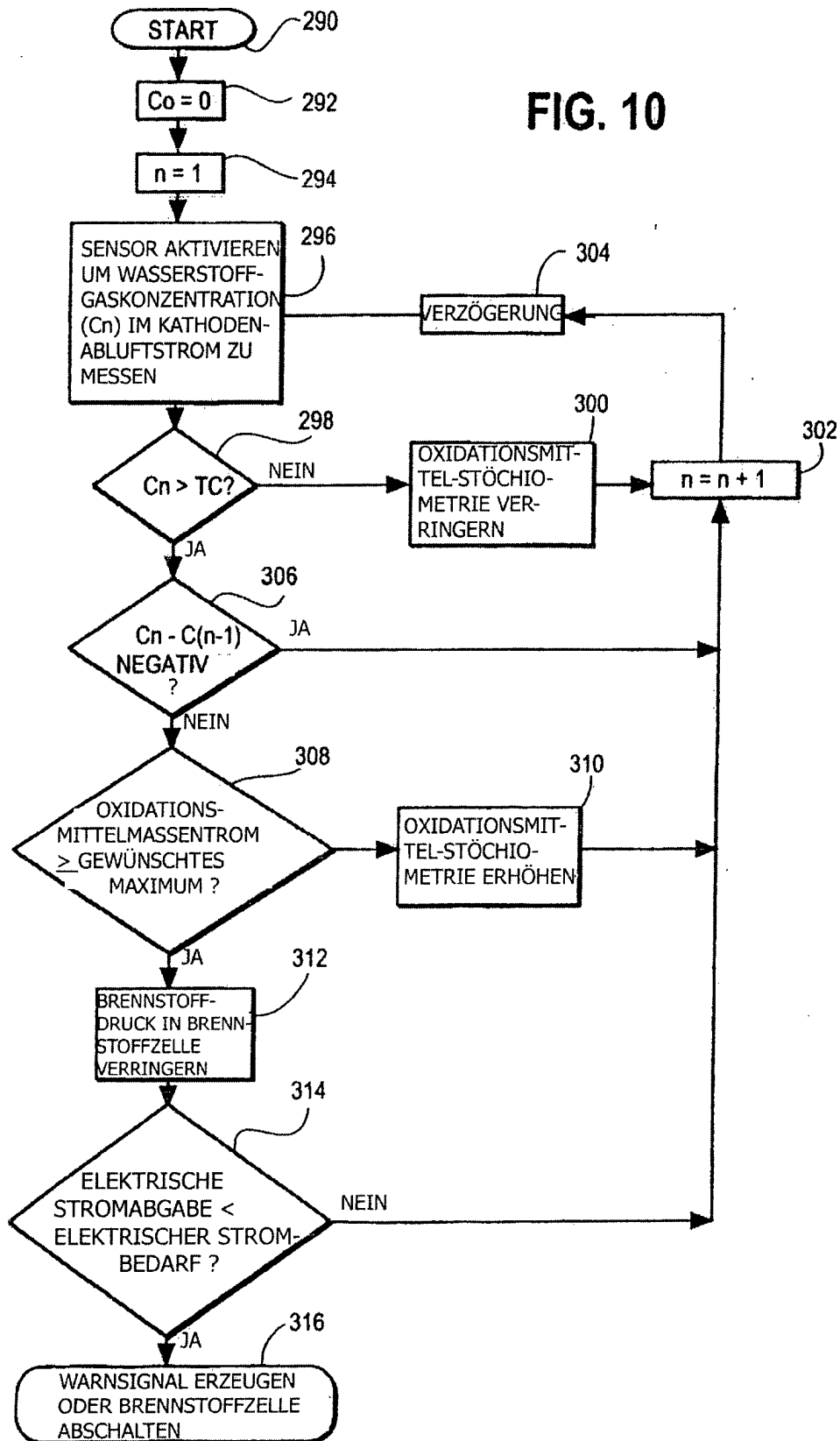


FIG. 11

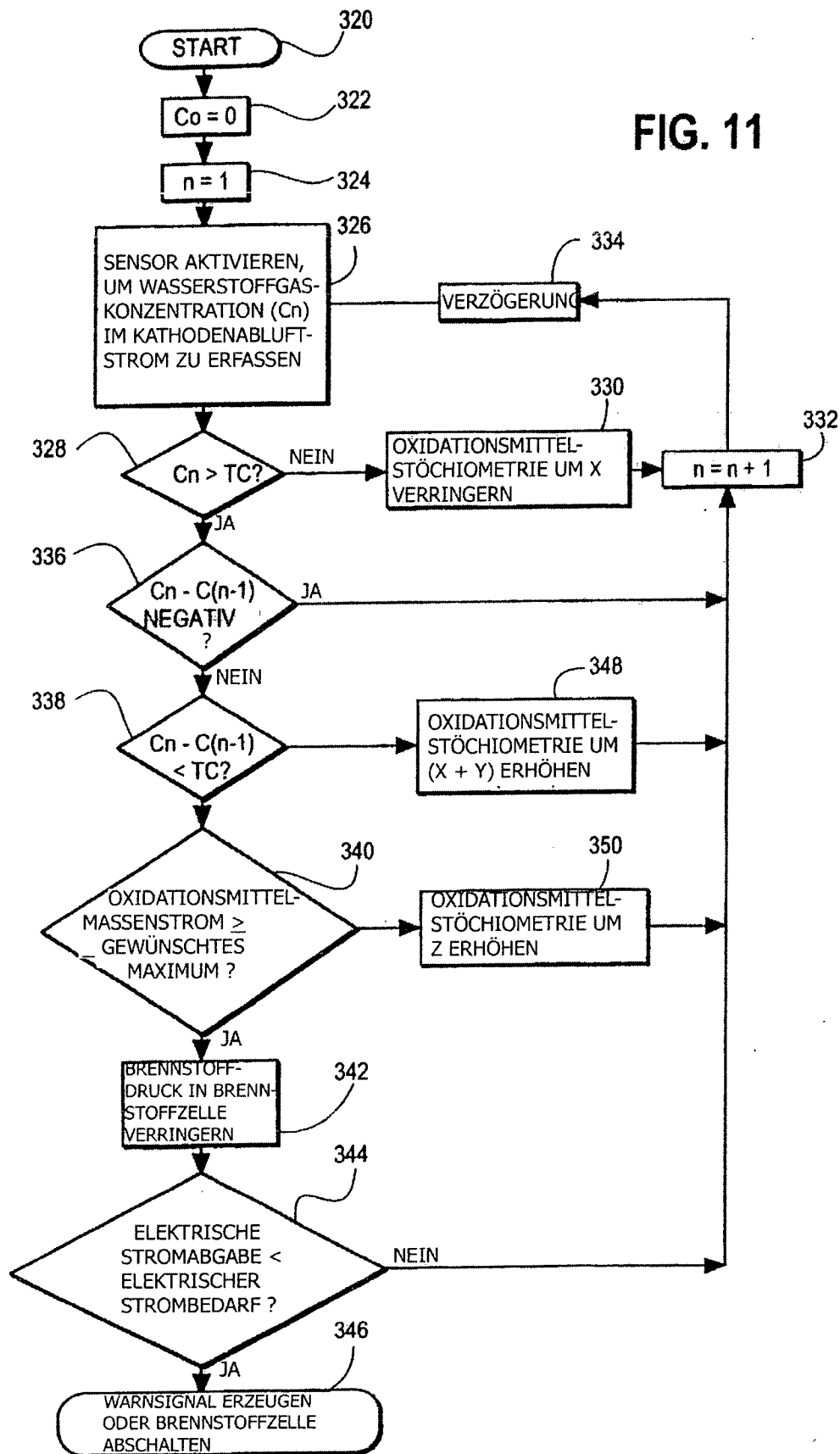


FIG. 12

