



(10) **DE 10 2008 047 871 B4** 2014.07.24

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2008 047 871.7**  
(22) Anmeldetag: **18.09.2008**  
(43) Offenlegungstag: **07.05.2009**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **24.07.2014**

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

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:  
**11/860,118**                      **24.09.2007**      **US**

(73) Patentinhaber:  
**GM Global Technology Operations LLC (n. d. Ges.  
d. Staates Delaware), Detroit, Mich., US**

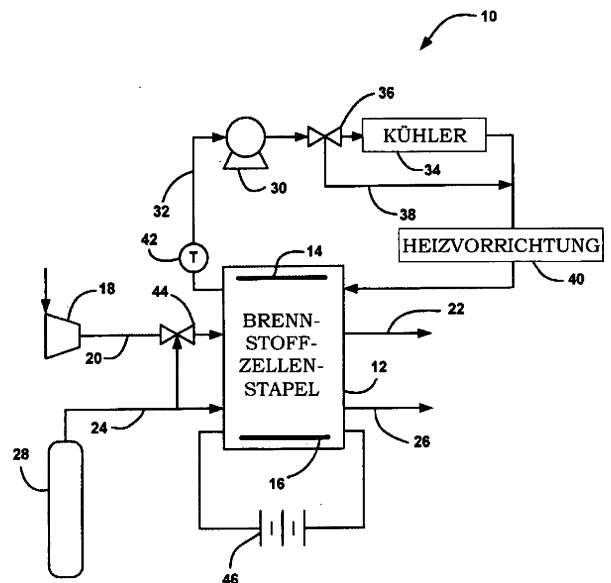
(74) Vertreter:  
**Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336,  
München, DE**

(72) Erfinder:  
**Alp, Abdullah B., West Henrietta, N.Y., US; Burch,  
Steven D., Honeoye Falls, N.Y., US; Becker, Marc,  
65510, Idstein, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**JP 2006- 114 336 A**

(54) Bezeichnung: **Brennstoffzellensystem-Aufwärmstrategie mit verringerten Wirkungsgradverlusten**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels (12) in einem Brennstoffzellensystem (10) bei Systeminbetriebnahme, wobei das Verfahren umfasst: Ermitteln, wie viel Wärme zum Erwärmen des Stapels (12) auf eine erwünschte Temperatur erforderlich ist; dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren ferner umfasst: Priorisieren mehrerer Wärmequellen, die den Stapel (12) erwärmen können, anhand ihres Erwärmungswirkungsgrads; und Nutzen der Wärmequellen in einer Reihenfolge beruhend auf ihrer Priorisierung zum Erwärmen des Stapels (12) auf die erwünschte Temperatur.



## Beschreibung

### Hintergrund der Erfindung

#### 1. Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels in einem Brennstoffzellensystem bei Systeminbetriebnahme gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

#### 2. Beschreibung des Stands der Technik

**[0002]** Wasserstoff ist ein sehr interessanter Brennstoff, da er sauber ist und zum effizienten Erzeugen von elektrischem Strom in einer Brennstoffzelle verwendet werden kann. Eine Wasserstoff-Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Vorrichtung, die eine Anode und eine Kathode mit einem Elektrolyt dazwischen aufweist. Die Anode erhält Wasserstoffgas und die Kathode erhält Sauerstoff oder Luft. Das Wasserstoffgas wird in der Anode aufgespalten, um freie Protonen und Elektronen zu erzeugen. Die Protonen bewegen sich durch den Elektrolyten zur Kathode. Die Protonen reagieren mit dem Sauerstoff und den Elektronen in der Kathode, um Wasser zu erzeugen. Die Elektronen von der Anode können nicht den Elektrolyten passieren und werden daher zum Erbringen von Arbeit durch eine Last geleitet, bevor sie zur Kathode geschickt werden.

**[0003]** Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC, vom engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cells) sind eine gängige Brennstoffzelle für Fahrzeuge.

**[0004]** Die PEMFC umfasst im Allgemeinen eine Protonen leitende Festpolymer-Elektrolytmembran, beispielsweise eine Perfluorsulfonsäure-Membran. Die Anode und Kathode umfassen üblicherweise fein verteilte katalytische Partikel, für gewöhnlich Platin (Pt), die von Kohlenstoffpartikeln getragen werden und mit einem Ionomer gemischt sind. Die katalytische Mischung ist auf gegenüberliegenden Seiten der Membran aufgebracht. Die Kombination aus der katalytischen Mischung der Anode, der katalytischen Mischung der Kathode und der Membran bildet eine Membranelektrodenanordnung (MEA, vom engl. Membrane Electrode Assembly).

**[0005]** In einem Brennstoffzellenstapel werden zum Erzeugen der Sollleistung üblicherweise mehrere Brennstoffzellen kombiniert. Der Brennstoffzellenstapel erhält ein Kathodenreaktandengas, üblicherweise einen mittels eines Verdichters durch den Stapel getriebenen Luftstrom. Von dem Stapel wird nicht der gesamte Sauerstoff aufgebraucht, und ein Teil der Luft wird als Kathodenabgas ausgestoßen, das Wasser als Stapelnebenprodukt enthalten kann. Der Brennstoffzellenstapel nimmt auch ein Anoden-Wasserstoffreaktandengas auf, das in die Anodenseite des Stapels strömt. Der Stapel umfasst ferner Strömungskanäle, durch die ein Kühlfluid strömt.

**[0006]** Ein Brennstoffzellenstapel umfasst typischerweise eine Reihe von Bipolarplatten, die zwischen den mehreren MEAs in dem Stapel positioniert sind, wobei die Bipolarplatten und die MEAs zwischen zwei Endplatten positioniert sind. Die Bipolarplatten umfassen eine Anodenseite und eine Kathodenseite für angrenzende Brennstoffzellen im Stapel. An der Anodenseite der Bipolarplatten sind Anodengasströmungskanäle vorgesehen, die das Anodenreaktandengas zu der jeweiligen MEA strömen lassen. Kathodengasströmungskanäle sind an der Kathodenseite der Bipolarplatten vorgesehen, die das Kathodenreaktandengas zu der jeweiligen MEA strömen lassen. Eine Endplatte umfasst Anodengas-Strömungskanäle und die andere Endplatte umfasst Kathodengas-Strömungskanäle. Die Bipolarplatten und die Endplatten bestehen aus einem leitenden Material, wie zum Beispiel Edelstahl oder einem leitenden Verbundstoff. Die Endplatten leiten den von den Brennstoffzellen erzeugten elektrischen Strom aus dem Stapel heraus. Die Bipolarplatten umfassen auch Strömungskanäle, durch die ein Kühlfluid strömt.

**[0007]** Ein Brennstoffzellenstapel arbeitet bei einer bestimmten Stapelbetriebstemperatur, die typischerweise durch ein durch den Stapel strömendes Kühlfluid gesteuert wird, effizienter und stabiler. Bei Systeminbetriebnahme weist der Brennstoffzellenstapel typischerweise eine niedrige Temperatur auf, möglicherweise unter dem Gefrierpunkt. Es ist erwünscht, den Stapel bei Systeminbetriebnahme so schnell wie möglich auf die erwünschte Temperatur zu erwärmen, so dass der Stapel früher effizienter und stabiler arbeitet.

**[0008]** Die JP 2006 114 336 A offenbart ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

**[0009]** Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren zum Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels eines Brennstoffzellensystems bei Inbetriebnahme des Brennstoffzellensystems bereitzustellen.

#### Zusammenfassung der Erfindung

**[0010]** Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

**[0011]** Weitere Merkmale der vorliegenden Erfindung gehen aus der folgenden Beschreibung und den beigegeführten Ansprüchen in Verbindung mit den Begleitzeichnungen hervor.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0012]** Fig. 1 ist ein Blockdiagramm eines Brennstoffzellensystems und

**[0013]** Fig. 2 ist ein Blockdiagramm eines Steuergeräts, das einen Prozess zum schnellen und effizienten Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels bei Systeminbetriebnahme nach einer erfindungsgemäßen Ausführungsform zeigt.

#### Eingehende Beschreibung der Ausführungsformen

**[0014]** Die folgende Beschreibung der Ausführungsformen der Erfindung, die auf ein Verfahren zum Priorisieren und Nutzen verschiedener Wärmequellen zum Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels bei Systeminbetriebnahme beruhend auf deren Wirkungsgrad gerichtet ist, ist lediglich beispielhafter Natur.

**[0015]** Wie nachstehend näher erläutert wird, schlägt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum schnellstmöglichen und so effizient wie möglichen Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels bei Systeminbetriebnahme vor, das die Stapelaufwärmzeit minimiert. Das Verfahren nutzt mehrere unterschiedliche Wärmequellen zum Erwärmen des Stapels bei Systeminbetriebnahme. Diese Wärmequellen umfassen die durch Stapelunwirtschaftlichkeiten beruhend auf Stapellast erzeugte Wärme, eine Kühlfluidheizvorrichtung, Endzellenheizvorrichtungen in dem Stapel, das Strömen von Wasserstoff in die Kathodenseite des Stapels, um katalytische Verbrennung zu erzeugen, und Überbelasten des Kathodenverdichters, um Wärme in der Kathodenluftzelle zu erzeugen. Die Stapelwärmeerzeugung kann durch Laden einer Hochspannungsbatterie angehoben werden, die als Stapellast dient. Da die zum Laden der Batterie verwendete Energie aus der Batterie rückgewinnbar ist, ist diese Technik des Erwärmens des Stapels die effizienteste. Das Verwenden der Kühlfluidheizvorrichtung und der Stapelendzellenheizvorrichtung erwärmt nicht nur das Kühlfluid und die Stapelendzellen, sondern erhöht auch den Stapellaststrom, der auch zum Erwärmen des Stapels dient. Aufgrund dieser doppelten Erwärmungswirkung sind die Kühlfluidheizvorrichtungen und die Endzellenheizvorrichtungen der zweiteffizienteste Weg zum Erwärmen des Brennstoffzellenstapels. Der nächsteffizienteste Weg zum Erwärmen des Brennstoffzellenstapels ist das Einspritzen einer kleinen Menge an Wasserstoff in die Kathodenseite des Stapels, wo er verbrennt, was Wärme erzeugt. Es gibt Komponentenbeschränkungen, wie viel Wasserstoff in die Kathodenseite des Stapels eingespritzt werden kann. Ferner kann ein Teil des eingespritzten Wasserstoffs zu dem Auslass strömen, was unerwünschte Emissionsspitzen in dem System erzeugt. Die letzte Technik zum Erzeugen von zusätzlicher Wärme zum Erwärmen des Stapels ist das Anheben des Druckverhältnisses über dem Verdichter, um die Kathodeneinlassluft zu erwärmen und die elektrische Last an dem Stapel anzuheben. Dieses Verfahren ist typischerweise ineffizient und führt zu zusätzlicher Geräuschbildung in dem System.

**[0016]** Fig. 1 ist eine Draufsicht auf ein Brennstoffzellensystem **10** mit einem Brennstoffzellenstapel **12**. Der Brennstoffzellenstapel **12** umfasst Endzellenheizvorrichtungen **14** und **16**, die in den Endzellen des Stapels **12** vorgesehen sind. Der Brennstoffzellenstapel **12** nimmt Kathodeneingangsluft von einem Verdichter **18** an einer Kathodeneingangsleitung **20** auf und gibt Kathodenabgas an einer Kathodenausgangsleitung **22** aus. Analog nimmt der Brennstoffzellenstapel **12** Wasserstoffgas an einer Anodeneingangsleitung **24** von einer Wasserstoffspeicherquelle **28** auf und gibt Anodenabgas an einer Anodenausgangsleitung **26** aus. Wasserstoffgas von der Quelle **28** kann der Kathodeneingangsleitung **20** und in die Kathodenseite des Stapels **12** durch ein Ventil **44** selektiv geliefert werden, um an der Kathodenseite des Stapels **12** Verbrennung zum Erwärmen des Stapels **12** in einer für den Fachmann verständlichen Weise vorzusehen.

**[0017]** In den Bipolarplatten in dem Brennstoffzellenstapel **12** sind Kühlfluidströmungskanäle vorgesehen. Von einer Pumpe **30** wird ein Kühlfluid durch die Kühlfluidströmungskanäle und durch einen Kühlfluidkreislauf **32**

außerhalb des Stapels **12** gepumpt. Das Kühlfluid in dem Kreislauf **32** von dem Stapel **12** wird zu einem Kühler **34** geschickt, wo vor dem Zurückschicken zu dem Brennstoffzellenstapel **12** seine Temperatur gesenkt wird. Ein Umgehungsventil **36** in dem Kreislauf **32** kann gesteuert werden, um eine selektive Menge des Kühlfluids den Kühler **34** an einer Umgehungsleitung **38** umgehen zu lassen, so dass das Kühlfluid nicht durch den Kühler **34** gekühlt wird. Eine Kühlfluidheizvorrichtung **40** in dem Kühlfluidkreislauf **32** kann zum Erwärmen des Kühlfluids bei Stapelinbetriebnahme verwendet werden. Ein Temperatursensor **42** misst die Temperatur des Kühlfluids in dem Kreislauf **32**, das aus dem Stapel **12** herauskommt.

**[0018]** Das System **10** umfasst auch eine Hochspannungsbatterie **46**, die mit dem Brennstoffzellenstapel **12** elektrisch verbunden ist und durch den Stapel **12** geladen werden kann.

**[0019]** Erfindungsgemäß erwärmt ein Stapelaufwärmalgorithmus den Stapel **12** bei Systeminbetriebnahme, so dass der Stapel **12** seine erwünschte Betriebstemperatur schneller und effizient erreicht. Der Algorithmus ermittelt zunächst, wie viel Wärme von den verschiedenen Wärmequellen erzeugt wird, die den Stapel **12** von dem Normalbetrieb des Systems **10** erwärmen. Wenn zum Beispiel große Lasten unmittelbar bei Systeminbetriebnahme an dem Stapel **12** angelegt werden, dann sollte die von dem Stapel **12** selbst erzeugte Wärme ausreichend sein, um den Stapel **12** schnell auf seine Betriebstemperatur zu erwärmen. Wenn von normalem Systembetrieb nicht genügend Wärme erzeugt wird, da der Stapel **12** zu kalt ist oder die Wärmequellen nicht ausreichend sind, aktiviert und priorisiert der Algorithmus die verschiedenen Wärmequellen beruhend auf Wirkungsgrad und erwünschtem Wärmebetrag. Dieses Priorisieren umfasst zunächst das Abziehen von elektrischem Strom von dem Stapel **12** zum Laden der Batterie **46**. Wenn der Stapel **12** durch Laden der Batterie **46** nicht genügend Wärme erzeugen kann, um den Stapel **12** schnell genug zu erwärmen, dann schaltet der Algorithmus die Kühlfluidheizvorrichtung **40** ein. Wenn immer noch mehr Wärme erforderlich ist, dann führt der Algorithmus Wasserstoff in die Kathodenseite des Stapels **12** durch das Ventil **44** ein, um Verbrennung zu erzeugen. Ist immer noch mehr Wärme erforderlich, dann kann das Druckverhältnis über dem Verdichter **18** zum Beispiel durch Schließen eines Ventils in der Leitung **20**, was den Verdichter **18** stärker arbeiten lässt, angehoben werden.

**[0020]** Erfindungsgemäß beruht der Sollwert für den Aufwärmalgorithmus auf der Kühlfluid-Auslasstemperatur von dem Temperatursensor **42** und der Umgebungstemperatur, die zum Feststellen einer Wärmeleistung in Kilowatt verwendet werden, die angibt, wie viel Wärme zu liefern ist. Beruhend auf der nachstehenden Gleichung (1) wird die Bruttowärmeerzeugung  $\dot{Q}_{gross}$  durch Addieren der Stapelwärmeerzeugung  $\dot{Q}_{stack}$ , der Kühlfluidheizvorrichtung-Wärmeerzeugung  $\dot{Q}_{coolant\ heater}$ , der Endzellenheizvorrichtung-Wärmeerzeugung  $\dot{Q}_{end\ cell\ heater}$  der von dem Kathodenwasserstoffstrom erzeugten Wärme  $\dot{Q}_{H_2}$  und der Verdichterwärmeerzeugung  $\dot{Q}_{compressor}$  berechnet.

$$\dot{Q}_{gross} = \dot{Q}_{stack} + \dot{Q}_{coolant\ heater} + \dot{Q}_{end\ cell\ heater} + \dot{Q}_{H_2} + \dot{Q}_{compressor} \quad (1)$$

**[0021]** Die Stapelwärmeerzeugung lässt sich berechnen als:

$$\dot{Q}_{stack} = \dot{P}_{gross} * \left( \frac{1.25}{V_{avg\ cell}} - 1 \right) \quad (2)$$

**[0022]** Die Verdichterwärme in das Kühlfluid kann vernachlässigt werden, da sie allgemein im Verhältnis zu den anderen Wärmequellen von kleiner Größenordnung ist und schwer präzise zu messen ist. Die Wirkung von zusätzlicher Verdichterleistung auf die Stapellast und vom Stapel erzeugter Wärme wird in Gleichung (2) berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} * LHV_{H_2} * r_{slip} \quad (3)$$

**[0023]** Wobei der untere Erwärmungswert ( $LHV_{H_2}$ ) für Wasserstoff bei 120 kW/(g/s) liegt und  $r_{slip}$  eine Funktion von Kühlfluid-Auslasstemperatur und mittlerer Zellenspannung ist ( $V_{avg\ cell}$ ) und  $\dot{m}_{H_2}$  der Kathodenwasserstoffstrom ist.

**[0024]** Fig. 2 ist ein Blockdiagramm **50**, das einen Prozess zum Ermitteln der erforderlichen Wärme zum Erwärmen des Stapels **12** auf die erwünschte Temperatur binnen eines kurzen Zeitraums bei Systeminbetriebnahme nach einer erfindungsgemäßen Ausführungsform zeigt. An Leitung **52** wird von einer Lookup- bzw. Nachschlagetabelle **54** abhängig von der Umgebungstemperatur von einem Umgebungstemperatursensor **56**

und der Kühlfluidtemperatur an Leitung **58** von dem Temperatursensor **42** ein Wärmeerzeugungsanforderungssignal vorgesehen. Das Wärmeerzeugungsanforderungssignal wird zu einem Summierblock **60** gesendet, der an Leitung **62** einen Wärmeerzeugungsfehler als Differenz zwischen der Wärme, die gerade dem Stapel **12** durch normale Systemwärmequellen geliefert wird, und der erwünschten Erwärmung des Stapels **12** ermittelt. Der Fehler wird einem Proportional-Integral-Differential(PID)-Regler **64** geliefert, der eine Wärme-Delta-Anforderung erzeugt, die der Aufwärmalgorithmus dann zum Priorisieren zusätzlicher Erwärmung des Stapels **12** beruhend auf der vorstehenden Erläuterung nutzt.

**[0025]** Wenn das System **10** gestartet wird und der Fahrzeugbediener das Fahrzeug sofort betreibt, liefert die Last an dem Stapel **12** die Stapelwärmeerzeugung an Leitung **66** beruhend auf Gleichung (2). Diese Stapelwärmeerzeugung kann ausreichen, um den Bedarf zum schnellen und effizienten Erwärmen des Stapels **12** zu decken. Der Stapel **12** kann Leistung zum Betreiben des Verdichters **18**, der Kühlfluidpumpe **30** etc. liefern, was den an Leitung **66** vorgesehenen Wärmebetrag beruhend auf Gleichung (2) ebenfalls erhöht. Die Endzellen-Heizvorrichtungen **14** und **16** können gesteuert durch einen Endzellenerwärmungsalgorithmus ein sein, was an Leitung **68** zusätzliche Wärmeerzeugung vorsieht, die den Fehler aus dem Summierblock **60** verringert.

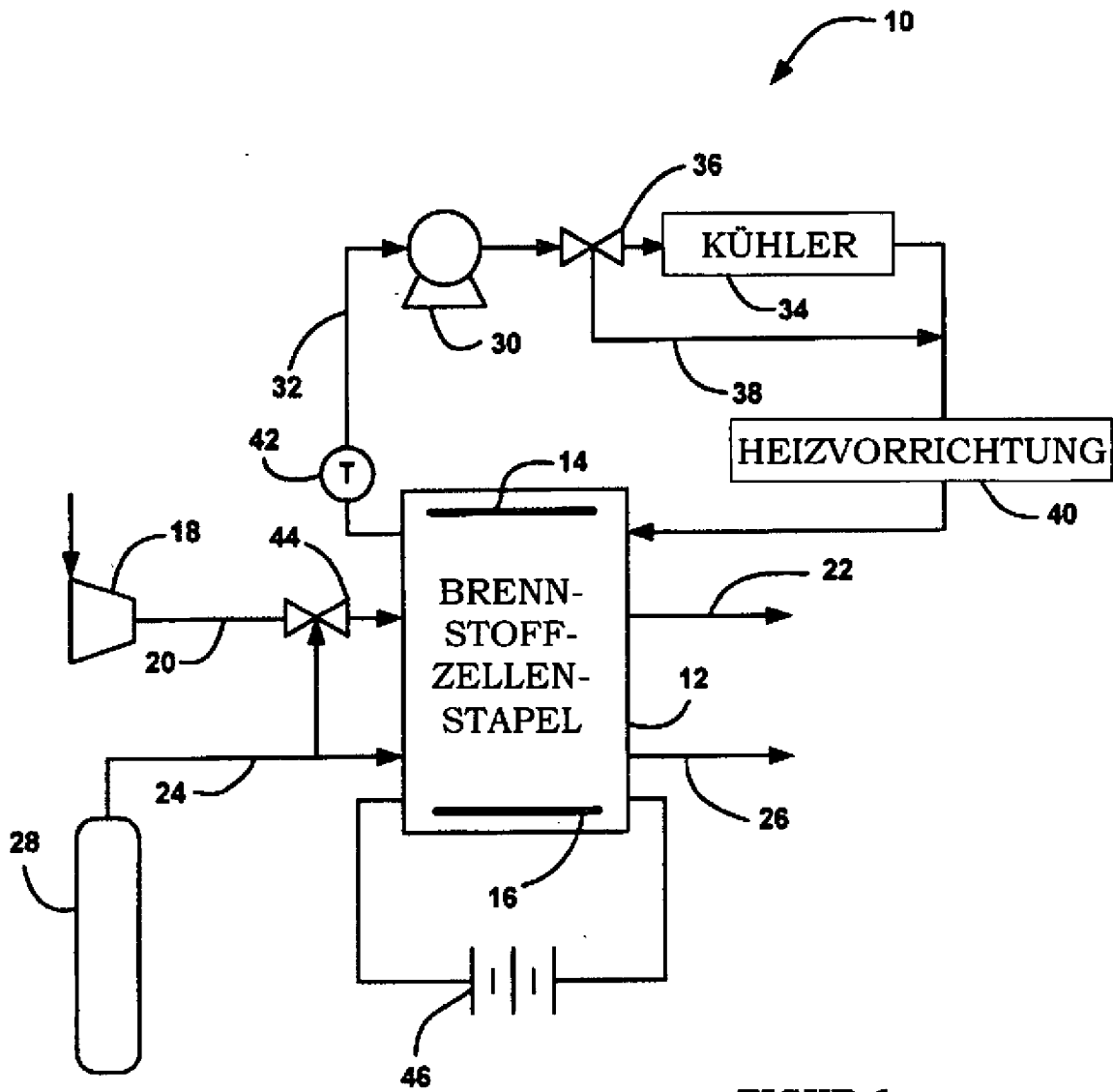
**[0026]** Wenn die von den verschiedenen Wärmequellen bei Systeminbetriebnahme erzeugte Wärme nicht groß genug ist, um den Fehler auf Null zu senken, dann kann der Aufwärmalgorithmus zusätzliche Wärme vorsehen, wobei verschiedene Stapelwärmequellen beruhend auf deren Wirkungsgrad beim Erwärmen des Stapels priorisiert werden. Der Algorithmus sieht zunächst eine Batterieladeanforderung von dem Stapel **12** vor, die die Stapelwärmeerzeugung an der Leitung **66** erhöht. Als Nächstes schaltet der Algorithmus die Kühlfluidheizvorrichtung **40** ein, um an Leitung **70** Stapelerwärmen vorzusehen. Der Algorithmus kann auch durch Liefern von Wasserstoff zu der Kathodenseite des Stapels **12**, was an Leitung **72** Wärme vorsieht, dem Stapel **12** Wärme zuführen. Ferner kann der Algorithmus dann ein Verdichtervertil schließen, um mehr Verdichterlast an Leitung **74** vorzusehen. Durch selektives Steuern der verschiedenen Wärmequellen, um genügend Wärme zum Erfüllen der Wärmeanforderung beruhend auf der Umgebungstemperatur und der Kühlfluid-Auslasstemperatur vorzusehen, kann der Algorithmus den Stapel **12** bei Systeminbetriebnahme so schnell wie möglich effizienter erwärmen.

### Patentansprüche

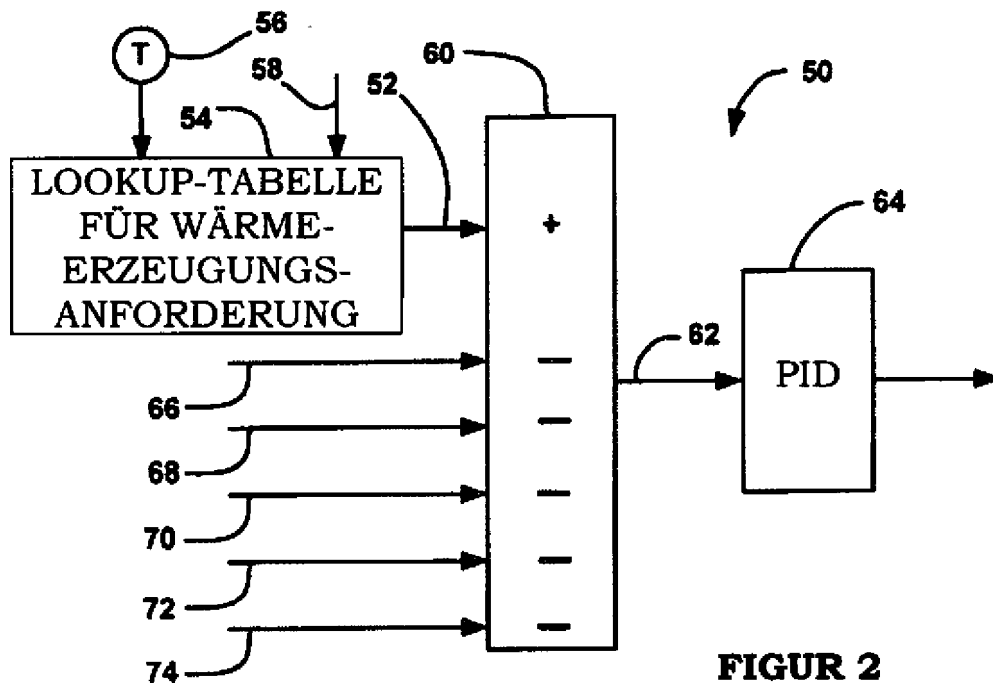
1. Verfahren zum Erwärmen eines Brennstoffzellenstapels (**12**) in einem Brennstoffzellensystem (**10**) bei Systeminbetriebnahme, wobei das Verfahren umfasst:  
Ermitteln, wie viel Wärme zum Erwärmen des Stapels (**12**) auf eine erwünschte Temperatur erforderlich ist;  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
das Verfahren ferner umfasst:  
Priorisieren mehrerer Wärmequellen, die den Stapel (**12**) erwärmen können, anhand ihres Erwärmungswirkungsgrads; und  
Nutzen der Wärmequellen in einer Reihenfolge beruhend auf ihrer Priorisierung zum Erwärmen des Stapels (**12**) auf die erwünschte Temperatur.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ermitteln, wie viel Wärme erforderlich ist, abhängig von der Umgebungstemperatur und einer Temperatur eines durch den Stapel (**12**) strömenden Kühlfluids erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Wärmequellen zum Priorisieren das Abziehen von elektrischem Strom vom Stapel (**12**) zum Laden einer Hochspannungsbatterie (**46**), eine Kühlfluidheizvorrichtung (**40**), das Einleiten von Wasserstoff in eine Kathodenseite des Brennstoffzellenstapels (**12**) und das Anheben eines Verdichterdruckverhältnisses für einen Verdichter (**18**), der dem Stapel (**12**) Kathodenluft liefert, umfassen.
4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei das Priorisieren der Wärmequellen zunächst das Laden der Hochspannungsbatterie (**46**), dann das Einschalten der Kühlfluidheizvorrichtung (**40**), dann das Einleiten von Wasserstoff in eine Kathodenseite des Brennstoffzellenstapels (**12**) und dann das Anheben des Verdichterdruckverhältnisses umfasst.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



FIGUR 1



FIGUR 2