



(10) **DE 10 2022 202 454 A1** 2023.09.14

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 202 454.0**

(22) Anmeldetag: **11.03.2022**

(43) Offenlegungstag: **14.09.2023**

(51) Int Cl.: **H01M 8/04089** (2016.01)

**H01M 8/0438** (2016.01)

**H01M 8/0444** (2016.01)

**G01F 1/34** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter Haftung, 70469 Stuttgart, DE**

**71640 Ludwigsburg, DE; Manga, Bilge, 71229 Leonberg, DE; Henke, Benjamin, 70374 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:  
**Schlingmeier, Daniel, 70376 Stuttgart, DE; Sander, Wolfgang, 71287 Weissach, DE; Lehmann, Dennis, 74379 Ingersheim, DE; Schenk, Michael,**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	103 31 698	A1
DE	10 2014 212 854	A1
DE	10 2015 118 063	A1
JP	2000- 163 134	A

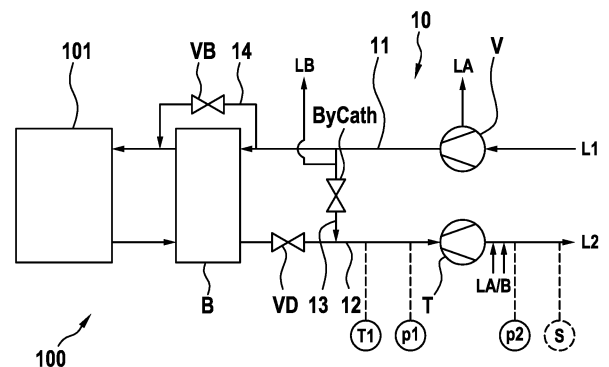
Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ermitteln eines Massenstroms**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Massenstroms ( $dm/dt$ ) in einem Kathodensystem (10) eines Brennstoffzellensystems (100) an einer Drosselstelle für den Massenstrom ( $dm/dt$ ), aufweisend:

- Erfassen eines Druckes ( $p_1$ ) des Massenstroms ( $dm/dt$ ) vor der Drosselstelle,
- Erfassen eines Druckes ( $p_2$ ) des Massenstroms ( $dm/dt$ ) nach der Drosselstelle,
- Bestimmen des Massenstroms ( $dm/dt$ ) durch die Drosselstelle in Abhängigkeit von den erfassten Drücken ( $p_1$ ,  $p_2$ ) vor und nach der Drosselstelle, insbesondere in Abhängigkeit von einem Druckabfall ( $p_2/p_1$ ) an der Drosselstelle.



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Massenstroms in einem Kathodensystem eines Brennstoffzellensystems. Ferner betrifft die Erfindung ein korrespondierendes Computerprogrammprodukt. Des Weiteren betrifft die Erfindung eine korrespondierende Steuereinheit zum Durchführen eines entsprechenden Verfahrens. Zudem betrifft die Erfindung ein korrespondierendes Brennstoffzellensystem mit einer entsprechenden Steuereinheit.

### Stand der Technik

**[0002]** Ein Brennstoffzellensystem muss, um Strom erzeugen zu können, im Wesentlichen mit drei Medien versorgt werden:

- Brennstoff, bspw. umfassend Wasserstoff,
- Kühlmittel, und
- Luft, bspw. umfassend Sauerstoff.

**[0003]** Dabei ist die genaue Dosierung der Versorgungsmedien entscheidend für einen effizienten und sicheren Betrieb des Brennstoffzellensystems. Um diese Dosierung zu optimieren und die Grenzwerte des sicheren Betriebs einzuhalten, müssen die Stoffströme im System bekannt sein, insbesondere bei der Luftversorgung.

**[0004]** Für die Messung der Luftmassenströme gibt es zum einen Sensoren, die die Luftmassenströme messen, wie z. B. ein Heißfilmluftmassenmesser oder ein druckbasierter Luftmassenmesser. Diese Sensoren sind zum einen kostenintensiv und zum anderen empfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Diese Sensoren benötigen zumeist redundante Signale zur Plausibilisierung.

**[0005]** In Brennstoffzellensystemen ergeben sich durch die Verzweigung des Luftsystems bzw. Kathodensystems lokal unterschiedliche Luftmassenströme. Von diesen lokalen Luftmassenströmen wird normalerweise aus Kostengründen oder aufgrund von Unzulänglichkeiten der üblichen Sensorik (z.B. bei Messung in feuchter Luft) nur ein Teil gemessen. Dadurch lässt sich nur grob abschätzen, ob die Luftversorgung dem gewünschten Wert entspricht.

### Offenbarung der Erfindung

**[0006]** Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem ersten Aspekt vor: ein Verfahren zum Ermitteln eines Massenstroms in einem Kathodensystem bzw. Luftsystem eines Brennstoffzellensystems mit den Merkmalen des unabhängigen Verfahrensanspruches. Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem zweiten Aspekt vor: ein Computerprogrammprodukt mit den Merkmalen des unabhängigen Produktanspruches. Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem dritten Aspekt vor: eine Steuereinheit mit den Merkmalen des unabhängigen Vorrichtungsanspruches. Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem vierten Aspekt vor: ein Fahrzeug mit den Merkmalen des nebengeordneten Vorrichtungsanspruches. Dabei gelten Merkmale und Details, die im Zusammenhang mit unterschiedlichen Ausführungsformen und/oder Aspekten der Erfindung beschrieben sind, selbstverständlich auch im Zusammenhang mit den anderen Ausführungsformen und/oder Aspekten und jeweils umgekehrt, sodass bezüglich der Offenbarung zu den einzelnen Ausführungsformen und/oder Aspekten stets wechselseitig Bezug genommen wird bzw. werden kann.

**[0007]** Die Erfindung stellt bereit: ein Verfahren zum Ermitteln eines Massenstroms in einem Kathodensystem (welches ebenfalls als ein Luftsystem bezeichnet werden kann) eines Brennstoffzellensystems, welches vorzugsweise an einer Drosselstelle für den Massenstrom durchgeführt wird, aufweisend:

- Erfassen eines Druckes des Massenstroms vor der Drosselstelle,
- Erfassen eines Druckes des Massenstroms nach der Drosselstelle,
- Bestimmen, insbesondere Berechnen, des Massenstroms durch die Drosselstelle in Abhängigkeit von den erfassten Drücken vor und nach der Drosselstelle, insbesondere in Abhängigkeit von einem Druckabfall an der bzw. verursacht durch die Drosselstelle, vorzugsweise mithilfe einer Drosselgleichung.

**[0008]** Ein Brennstoffzellensystem im Rahmen der vorliegenden Offenbarung umfasst mindestens ein Brennstoffzellenstack (oder kurz genannt Stack), ein Kathodensystem zum Versorgen des mindestens einen

Brennstoffzellenstacks mit einem sauerstoffhaltigen Reaktanten, insbesondere in Form einer verdichteten Luft, wie z. B. einfacher Umgebungsluft, ein Anodensystem zum Versorgen des mindestens einen Brennstoffzellenstacks mit einem brennstoffhaltigen Reaktanten, insbesondere einem wasserstoffhaltigen Reaktanten, ein Kühlmittelsystem zum Temperieren des mindestens einen Brennstoffzellenstacks und ein elektrisches System zum Abführen der elektrischen Energie an einen Verbraucher, wie z. B. einen Elektromotor eines Fahrzeuges.

**[0009]** Ein Kathodensystem im Rahmen der vorliegenden Offenbarung kann sämtliche Komponenten umfassen, die zum Versorgen des mindestens einen Brennstoffzellenstacks mit dem sauerstoffhaltigen Reaktanten, insbesondere in Form einer verdichteten Luft, wie z. B. einfacher Umgebungsluft, und zum Abführen der unverbrauchten, zumeist sauerstoffverarmten, Abluft aus dem System dienen können. Die Abluft kann ebenfalls als Abgas bezeichnet werden. Die Abluft kann zumindest zum Teil gasförmig und/oder zumindest zum Teil fluidförmig sein. Die Abluft kann Wassertröpfchen und/oder Wasserdampf enthalten.

**[0010]** Das Kathodensystem kann eine Zuluftleitung zum Stack und eine Abluftleitung vom Stack aufweisen. In der Zuluftleitung kann eine Gasfördermaschine bzw. ein Verdichter vorgesehen sein, um die Luft aus der Umgebung anzusaugen und in Form einer Zuluft an den Stack bereitzustellen. Ferner kann in der Zuluftleitung ein Wärmetauscher vorgesehen sein, um die verdichtete Zuluft abzukühlen. Weiterhin kann in der Zuluftleitung ein optionaler Befeuchter vorgesehen sein, um die verdichtete Zuluft zu befeuchten. Nach dem Durchlauf des Stacks kann eine Abluft aus dem System wieder an die Umgebung abgelassen werden. In der Abluftleitung kann eine Turbine vorgesehen sein, um die kinetische Energie der Abluft zu nutzen, bspw. für den Verdichter. Vor und nach dem Stack können Absperrventile vorgesehen sein. Zudem kann in der Abluftleitung ein separates Ventil als Druckregler vorgesehen sein. Der Druckregler bzw. dessen Regelfunktion kann in manchen Topologien in dem Absperrventil integriert sein. Zwischen der Zuluftleitung und der Abluftleitung kann eine Bypassleitung mit einem Bypassventil vorgesehen sein.

**[0011]** Zudem kann die Zuluft dazu genutzt werden, um weitere Komponenten im System zu belüften, wie z. B. den Stack bzw. die Stackumgebung, einen Brennstofftank, eine Fahrerkabine usw.

**[0012]** Zudem kann die Zuluft dazu genutzt werden, um weitere Komponenten im System zu kühlen, wie z. B. die Lager des Verdichters, der Turbine, usw.

**[0013]** Als Drosselstellen im Sinne der Erfindung können zum einen Verengungen in den Leitungen verstanden werden. Ferner können als Drosselstellen im Sinne der Erfindung Ventile, wie z. B. Absperrventile, Bypassventile und/oder Druckregler, verstanden werden. Weiterhin kann als eine Drosselstelle im Sinne der Erfindung die Turbine verstanden werden.

**[0014]** Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens können Massenströme, wie z. B. der Abluftmassenstrom, mithilfe von kostengünstigeren, robusten und zuverlässigen Drucksensoren ermittelt werden. Diese Massenströme können zur Steuerung und/oder Regelung im Brennstoffzellensystem, insbesondere im Kathodensystem, bspw. zum Einstellen der Verdichterdrehzahl, und/oder zu Diagnose- und/oder Plausibilisierungszwecken, bspw. von Massenstromsensoren, verwendet werden. Der Kern der Erfindung liegt in der Ermittlung des Massenstromes durch die Drosselstelle, wie z. B. durch die Turbine, basierend auf der Drosselcharakteristik/Drosselgleichung für die Drosselstelle. Hierzu können auch mehrere Sensoren (für Drücke und/oder Temperaturen) verwendet werden. Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens kann ein virtueller oder mit anderen Worten indirekter Massenstromsensor bereitgestellt werden. Der bestimmte Massenstrom kann als ein Schätzsignal für den Massenstrom ausgegeben werden.

**[0015]** Bei der Steuerung/Regelung können solche Schätzsignale zur Verbesserung von Betriebsstrategien verwendet werden. Solche Schätzsignale können lokale Ist-Signale an Stellen im System bereitstellen, wo es keinen Sensor gibt, weil diese Stellen entweder schwer zugänglich sind und/oder dort ungünstige Bedingungen (bspw. zu feucht) zum Betreiben von Massenstromsensoren herrschen.

**[0016]** Bei der Diagnose/Plausibilisierung können solche Schätzsignale zuverlässige Werte liefern, die sehr nahe an tatsächlichen physikalischen Werten liegen. Solche Schätzsignale können redundant zu einem anderen Sensor verwendet werden, der aufgrund der eigenen Unzulänglichkeit eine Redundanz/Plausibilisierung benötigt.

**[0017]** Ferner kann vorgesehen sein, dass beim Bestimmen des Massenstroms mindestens ein geometrischer Parameter, insbesondere eine geometrische Querschnittsfläche der Drosselstelle berücksichtigt wird.

Auf diese Weise kann die Geometrie der Drosselstelle berücksichtigt werden, um die Genauigkeit bei dem Bestimmen des Massenstroms zu erhöhen, insbesondere beim Anwenden der Drosselgleichung.

**[0018]** Weiterhin kann vorgesehen sein, dass beim Bestimmen des Massenstroms eine Temperatur des Massenstroms vor der Drosselstelle berücksichtigt wird. Auf diese Weise kann die Genauigkeit bei dem Bestimmen des Massenstroms erhöht werden, insbesondere beim Anwenden der Drosselgleichung.

**[0019]** Des Weiteren kann vorgesehen sein, dass das Verfahren, welches wie oben beschrieben ablaufen kann, zum Ermitteln eines Abluftmassenstroms in einer Abluftleitung des Kathodensystems des Brennstoffzellensystems durchgeführt wird. Auf diese Weise können die erfindungsgemäßen Vorteile beim Ermitteln des Abluftmassenstroms ermöglicht werden. In Kenntnis des Abluftmassenstroms können mehrere Vorteile bei der Steuerung und/oder Regelung im Brennstoffzellensystem, insbesondere im Kathodensystem, bspw. zum Einstellen der Verdichterdrehzahl, erreicht werden. Vorteilhafterweise kann die Verdichterdrehzahl an die Arbeitspunkte des Systems angepasst werden. Beispielsweise kann zur Verdünnung von Wasserstoff in der Abluft die Verdichterdrehzahl erhöht werden, um einen ausreichenden Abluftmassenstrom zu erreichen. Auf diese Weise kann die elektrische Leistung zum Betreiben des Verdichters an die Arbeitspunkte des Systems angepasst werden. Dadurch kann das Kathodensystem energieoptimiert betrieben werden.

**[0020]** Zudem kann vorgesehen sein, dass eine Turbine in einer Abluftleitung des Kathodensystems des Brennstoffzellensystems als eine Drosselstelle für den Massenstrom betrachtet wird. Dabei wird erkannt, dass die Turbine als eine Drosselstelle bei der Abluft aus dem Brennstoffzellensystem agiert. Auf diese Weise kann die Drosselgleichung an der Turbine als die Drosselstelle herangezogen werden, um den Massenstrom durch die Turbine zu bestimmen. Nach der Turbine kann die Abluft dazu genutzt werden, um ein Drain- und/oder Purgegas aus dem Anodensystem zu verdünnen. In Kenntnis des Massenstroms durch die Turbine kann auf eine vorteilhafte Weise der Abluftmassenstrom bestimmt, insbesondere berechnet, werden. Insbesondere kann in Kenntnis des Massenstroms durch die Turbine bewertet werden, ob der Abluftmassenstrom ausreichend ist, um ein Drain- und/oder Purgegas aus dem Anodensystem zu verdünnen.

**[0021]** Außerdem kann das Verfahren mindestens einen weiteren Schritt aufweisen:

- Ermitteln von mindestens einem Hilfsmassenstrom, welcher nach der Drosselstelle dem Massenstrom zugefügt wird.

**[0022]** Dabei wird erkannt, dass der Abluft nach der Turbine weitere Massenströme zugefügt werden können, die zuvor hilfsweise aus der Zuluft abgezweigt wurden, bspw. zu Belüftungs- und/oder Kühlzwecken. Diese Hilfsmassenströme fließen in die Abluft nach der Turbine ein und bilden zusammen mit dem Massenstrom durch die Turbine den Abluftmassenstrom aus dem Brennstoffzellensystem. Auf diese Weise kann der Abluftmassenstrom aus dem Brennstoffzellensystem mit einer erhöhten Genauigkeit bestimmt werden.

**[0023]** Ferner ist es denkbar, dass der mindestens eine Hilfsmassenstrom durch das Verfahren, welches wie oben beschrieben ablaufen kann, ermittelt wird, vorzugsweise mithilfe einer Drosselgleichung, insbesondere durch Bestimmen bzw. Berechnen des Hilfsmassenstroms durch eine passende Drosselstelle für den Hilfsmassenstrom in Abhängigkeit von den erfassten Drücken vor und nach der Drosselstelle für den Hilfsmassenstrom, insbesondere in Abhängigkeit von einem Druckabfall an der Drosselstelle für den Hilfsmassenstrom. Auf diese Weise können relativ genaue Ergebnisse bei dem Bestimmen des mindestens einen Hilfsmassenstroms erzielt werden.

**[0024]** Weiterhin ist es denkbar, dass der mindestens eine Hilfsmassenstrom in Abhängigkeit von den erfassten Drücken vor und nach der Drosselstelle für den Massenstrom, insbesondere von einem Druckabfall an der Drosselstelle für den Massenstrom, approximiert wird. Auf diese Weise können einfache Optimierungsmethoden genutzt werden, um den mindestens einen Hilfsmassenstrom abzuschätzen.

**[0025]** Des Weiteren kann das Verfahren mindestens einen weiteren Schritt aufweisen:

- Bestimmen eines Abluftmassenstroms in einer Abluftleitung des Kathodensystems des Brennstoffzellensystems in Abhängigkeit von dem bestimmten Massenstrom durch die Drosselstelle und von einem ermittelten Hilfsmassenstrom, welcher nach der Drosselstelle dem Massenstrom zugefügt wird.

**[0026]** Auf diese Weise kann der Abluftmassenstrom aus dem Brennstoffzellensystem mit einer erhöhten Genauigkeit bestimmt werden.

**[0027]** Vorteilhafterweise kann das Verfahren, welches wie oben beschrieben ablaufen kann, zum Steuern und/oder Regeln eines Betriebs des Brennstoffzellensystems, insbesondere eines Betriebs des Kathodensystems des Brennstoffzellensystems, verwendet werden.

**[0028]** Weitere Vorteile können erzielt werden, wenn das Verfahren, welches wie oben beschrieben ablaufen kann, zur Diagnose und/oder Plausibilisierung eines Massenstromsensors in dem Kathodensystem des Brennstoffzellensystems verwendet wird.

**[0029]** Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem zweiten Aspekt vor: ein Computerprogrammprodukt, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Computerprogrammprodukts durch einen Computer diesen veranlassen, ein Verfahren durchzuführen, welches wie oben beschrieben ablaufen kann. Mithilfe des erfindungsgemäßen Computerprogrammprodukts werden die gleichen Vorteile erreicht, die oben im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren beschrieben wurden. Auf diese Vorteile wird vorliegend vollumfänglich Bezug genommen.

**[0030]** Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem dritten Aspekt vor: eine Steuereinheit, aufweisend eine Recheneinheit und eine Speichereinheit, in welcher ein Code hinterlegt ist, welcher bei zumindest teilweiser Ausführung durch die Recheneinheit ein Verfahren durchführt, welches wie oben beschrieben ablaufen kann. Mithilfe der erfindungsgemäßen Steuereinheit werden die gleichen Vorteile erreicht, die oben im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren beschrieben wurden. Auf diese Vorteile wird vorliegend vollumfänglich Bezug genommen.

**[0031]** Die vorliegende Erfindung sieht gemäß dem vierten Aspekt vor: ein Brennstoffzellensystem, aufweisend eine Steuereinheit, welche wie oben beschrieben ausgeführt werden kann, Mithilfe des erfindungsgemäßen Brennstoffzellensystems werden die gleichen Vorteile erreicht, die oben im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren beschrieben wurden. Auf diese Vorteile wird vorliegend vollumfänglich Bezug genommen.

**[0032]** Bevorzugte Ausführungsbeispiele:

Die Erfindung und deren Weiterbildungen sowie deren Vorteile werden nachfolgend anhand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

**Fig. 1** ein beispielhaftes Brennstoffzellensystem, und

**Fig. 2** einen beispielhaften Verlauf eines geschätzten Massenstroms im Vergleich zu einem gemessenen Massenstrom.

**[0033]** In den unterschiedlichen Figuren sind gleiche Teile der Erfindung stets mit denselben Bezugszeichen versehen, weshalb diese i. d. R. nur einmal beschrieben werden.

**[0034]** Die **Fig. 1** und **Fig. 2** dienen zum Erklären eines Verfahrens zum Ermitteln eines Massenstroms  $dm/dt$  in einem Kathodensystem 10 eines Brennstoffzellensystems 100, welches vorzugsweise an einer Drosselstelle, bspw. in Form einer Turbine T, für den Massenstrom  $dm/dt$  durchgeführt wird. Das Verfahren kann dabei folgende Schritte/Aktionen aufweisen:

- Erfassen eines Druckes  $p_1$  des Massenstroms  $dm/dt$  vor der Drosselstelle,
- Erfassen eines Druckes  $p_2$  des Massenstroms  $dm/dt$  nach der Drosselstelle,
- Bestimmen, insbesondere Berechnen, des Massenstroms  $dm/dt$  durch die Drosselstelle in Abhängigkeit von den erfassten Drücken  $p_1$ ,  $p_2$  vor und nach der Drosselstelle, insbesondere in Abhängigkeit von einem Druckabfall  $p_2/p_1$  an der bzw. verursacht durch die Drosselstelle, vorzugsweise mithilfe einer Drosselgleichung.

**[0035]** Wie es die **Fig. 1** andeutet, kann ein Brennstoffzellensystem 100 im Rahmen der vorliegenden Offenbarung ein Brennstoffzellenstack 101 (oder kurz genannt Stack 101) aufweisen.

**[0036]** Weiterhin zeigt die **Fig. 1**, dass das Brennstoffzellensystem 100 ein Kathodensystem 10 zum Versorgen des Brennstoffzellenstacks 101 mit einem sauerstoffhaltigen Reaktanten, insbesondere in Form einer verdichteten Luft, wie z. B. einfacher Umgebungsluft, aufweisen kann.

**[0037]** Des Weiteren kann das Brennstoffzellensystem 100 ein Anodensystem zum Versorgen des Brennstoffzellenstacks 101 mit einem brennstoffhaltigen Reaktanten, insbesondere einem wasserstoffhaltigen Reaktanten, ein Kühlmittelsystem zum Temperieren des Brennstoffzellenstacks 101 und ein elektrisches System zum Abführen der erzeugten elektrischen Energie aufweisen. Das Anodensystem, das Kühlmittelsystem und das elektrische System sind lediglich aus Einfachheitsgründen nicht gezeigt.

**[0038]** Wie es die **Fig. 1** andeutet, kann das Kathodensystem 10 mehrere Komponenten umfassen, die zum Versorgen des Brennstoffzellenstacks 101 mit einer Zuluft L1 und zum Abführen der unverbrauchten, zumeist sauerstoffverarmten, Abluft L2 aus dem System 100 dienen können. Die Abluft L2 kann dabei gasförmig sein und/oder Wassertröpfchen und/oder Wasserdampf enthalten.

**[0039]** Wie es die **Fig. 1** zeigt, kann das Kathodensystem 10 eine Zuluftleitung 11 zum Stack 101 und eine Abluftleitung 12 vom Stack 101 aufweisen.

**[0040]** In der Zuluftleitung 11 kann ein Verdichter V vorgesehen sein, um die Luft aus der Umgebung anzusaugen und in Form einer Zuluft L1 an den Stack 101 bereitzustellen. Ferner kann in der Zuluftleitung 11 ein Wärmetauscher vorgesehen sein, um die verdichtete Zuluft abzukühlen. Optional kann in der Zuluftleitung 11 ein Befeuchter B vorgesehen sein, um die verdichtete Zuluft L1 zu befeuchten. Um den Befeuchter B zu umgehen, kann eine Befeuchter-Bypassleitung 14 mit einem Befeuchter-Bypassventil VB vorgesehen sein.

**[0041]** Nach dem Durchlauf des Stacks 101 kann eine Abluft L2 aus dem System 100 wieder an die Umgebung abgelassen werden. In der Abluftleitung 12 kann eine Turbine T vorgesehen sein, um die kinetische Energie der Abluft L2 zu nutzen, bspw. zum Antreiben des Verdichters V. Zudem kann in der Abluftleitung ein Druckregler VD vorgesehen sein.

**[0042]** Zwischen der Zuluftleitung 11 und der Abluftleitung 12 kann eine Bypassleitung 13 mit einem Bypassventil ByCath vorgesehen sein.

**[0043]** Wie es die **Fig. 1** zudem andeutet, kann die Zuluft L1 dazu genutzt werden, um weitere Komponenten im System 100 zu belüften, wie z. B. den Stack 101 bzw. die Stackumgebung, einen Brennstofftank, eine Fahrerkabine usw. Hierzu kann aus der Zuluft L1 ein Belüftungsmassenstrom  $dm_{LB}/dt$  abzweigt werden.

**[0044]** Wie es die **Fig. 1** außerdem andeutet, kann die Zuluft L1 dazu genutzt werden, um weitere Komponenten im System 100 zu kühlen, wie z. B. die Lager des Verdichters V, der Turbine T, usw. Hierzu kann aus der Zuluft L1 ein Kühlmassenstrom  $dm_{LA}/dt$  abzweigt werden.

**[0045]** Als Drosselstellen im Sinne der Erfindung können sämtliche Verengungen in den Leitungen, Ventile oder Turbinen verstanden werden.

**[0046]** Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens können Massenströme im Kathodensystem 10, wie z. B. der Abluftmassenstrom  $dm_{L2}/dt$ , mithilfe von kostengünstigeren, robusten und zuverlässigen Drucksensoren  $p_1$ ,  $p_2$  ermittelt werden.

**[0047]** Die so bestimmten Massenströme können zur Steuerung und/oder Regelung im Brennstoffzellensystem 100, insbesondere im Kathodensystem 10, bspw. zum Einstellen einer geeigneten Verdichterdrehzahl für einen aktuellen Betriebspunkt des Systems 100, genutzt werden. Die so bestimmten Massenströme können ferner zu Diagnose- und/oder Plausibilisierungszwecken, bspw. von Massenstromsensoren, verwendet werden. Ein beispielhafter Massenstromsensor S ist in der **Fig. 1** angedeutet.

**[0048]** Der Kern der Erfindung liegt in der Ermittlung des Massenstromes  $dm/dt$  durch die Drosselstelle, wie z. B. durch die Turbine T, basierend auf der Drosselcharakteristik/Drosselgleichung:

$$dm/dt = \frac{C_d A p_1}{\sqrt{RT_1}} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{p_2}{p_1} > \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}};$$

$$dm/dt = \frac{C_d A p_1}{\sqrt{RT_1}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, \frac{p_2}{p_1} \leq \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}.$$

**[0049]** Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens kann somit ein virtueller oder mit anderen Worten indirekter Massenstromsensor bereitgestellt werden, der geschätzte bzw. berechnete Massenstromwerte ausgibt.

**[0050]** Die in der Drosselgleichung verwendeten Größen sind der Massenstrom  $dm/dt$  durch die Drosselstelle, die geometrische Querschnittsfläche  $A$ , der effektive Flächenfaktor  $C_d$ , der Druck  $p_1$  und die Temperatur  $T_1$  vor der Drosselstelle, der Druck  $p_2$  nach der Drosselstelle, die spezifische Gaskonstante  $R$  und der Isentropenexponent  $\gamma$ .

**[0051]** Vorteilhafterweise kann das Verfahren, welches wie oben beschrieben ablaufen kann, zum Ermitteln eines Abluftmassenstroms  $dm_{L2}/dt$  in einer Abluftleitung 12 des Kathodensystems 10 des Brennstoffzellensystems 100 verwendet werden. Dabei kann die Turbine  $T$  als eine Drosselstelle betrachtet werden.

**[0052]** Der Abluftmassenstrom  $dm_{L2}/dt$  hat eine besondere Bedeutung im Brennstoffzellensystem 100, denn er dient zur Verdünnung des unverbrauchten Wasserstoffs im System 100, der über das Abgasrohr abgelassen wird. Steigt die Konzentration im Abgasgemisch über 4%vol entsteht ein zündfähiges Gemisch und es besteht Explosionsgefahr. Daher ist die genaue Kenntnis des Abluftmassenstroms  $dm_{L2}/dt$  speziell für Diagnosefunktionen wichtig, damit eine kritische Grenze der Konzentration nicht überschritten wird.

**[0053]** Da direkte Massenstromsensoren, wie z. B. ein Heißfilmluftmassenmesser oder ein druckbasierter Luftmassenmesser, durch das Produktwasser des Brennstoffzellenstacks an Messgenauigkeit verlieren können oder sogar beschädigt werden können, können sie nicht optimal zum Vermessen des Abluftmassenstroms  $dm_{L2}/dt$  genutzt werden.

**[0054]** Mithilfe der Erfindung kann der Abluftmassenstrom  $dm_{L2}/dt$  relativ genau geschätzt, insbesondere berechnet, werden, wie es die **Fig. 2** mithilfe von Messungen des Massenstroms  $dm/dt$  durch die Turbine  $T$  andeutet.

**[0055]** Der Abluftmassenstrom  $dm_{L2}/dt$  kann über die Bilanz der verzweigten Massenströme im Kathodensystem 10 berechnet werden. Der Abluftmassenstrom  $dm_{L2}/dt$  setzt sich aus dem Massenstrom  $dm/dt$  durch die Turbine  $T$  und aus den Hilfsmassenströmen (aus dem Kühlmassenstrom  $dm_{LA}/dt$  und/oder aus dem Belüftungsmassenstrom  $dm_{LB}/dt$ ) zusammen:

$$dm_{L2}/dt = dm/dt + dm_{LA}/dt + dm_{LB}/dt$$

**[0056]** Der Massenstrom  $dm/dt$  durch die Turbine  $T$  kann mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens, insbesondere mithilfe der Drosselgleichung, ermittelt, vorzugsweise berechnet werden. Hierzu können Sensoren für die Drücke  $p_1$ ,  $p_2$  vor und nach der Turbine  $T$  und ein Sensor für die Temperatur  $T_1$  vor der Turbine  $T$  verwendet werden, die in der **Fig. 1** schematisch gezeigt sind.

**[0057]** Die Hilfsmassenströme  $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$  können ebenfalls mithilfe der Drosselgleichung berechnet werden. Hierzu kann eine geeignete Drosselstelle für den jeweiligen Hilfsmassenstrom  $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$  bestimmt werden. Dabei können Sensoren für die Drücke vor und nach der Drosselstelle und ein Sensor für die Temperatur vor der Drosselstelle verwendet werden.

**[0058]** Weiterhin ist es denkbar, dass die Hilfsmassenströme  $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$  in Abhängigkeit von den erfassten Drücken  $p_1$ ,  $p_2$  vor und nach der Drosselstelle für den Massenstrom  $dm/dt$  durch die Turbine  $T$  approximiert wird. Hierzu kann eine einfache Formel benutzt werden:

$$dm_{LA}/dt + dm_{LB}/dt = (p_1/p_2) * f_{AB} - \text{Offset}_{AB}.$$

**[0059]** Die Messsignale sind dabei die Drücke  $p_1$ ,  $p_2$  vor und nach der Turbine  $T$ . Der Proportionalitätsfaktor  $f_{AB}$  und der Offset  $\text{Offset}_{AB}$  können über den Vergleich mit Referenzmessungen bei der Zuluft  $L_1$  und/oder unter Einbeziehen des berechneten Turbinenmassenstroms  $dm/dt$  ermittelt werden.

**[0060]** Die voranstehende Beschreibung der Figuren beschreibt die vorliegende Erfindung ausschließlich im Rahmen von Beispielen. Selbstverständlich können einzelne Merkmale der Ausführungsformen, sofern es technisch sinnvoll ist, frei miteinander kombiniert werden, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln eines Massenstroms ( $dm/dt$ ) in einem Kathodensystem (10) eines Brennstoffzellensystems (100) an einer Drosselstelle für den Massenstrom ( $dm/dt$ ), aufweisend:

- Erfassen eines Druckes ( $p_1$ ) des Massenstroms ( $dm/dt$ ) vor der Drosselstelle,
- Erfassen eines Druckes ( $p_2$ ) des Massenstroms ( $dm/dt$ ) nach der Drosselstelle,
- Bestimmen des Massenstroms ( $dm/dt$ ) durch die Drosselstelle in Abhängigkeit von den erfassten Drücken ( $p_1$ ,  $p_2$ ) vor und nach der Drosselstelle, insbesondere in Abhängigkeit von einem Druckabfall ( $p_2/p_1$ ) an der Drosselstelle.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

**dadurch gekennzeichnet,**

dass beim Bestimmen des Massenstroms ( $dm/dt$ ) mindestens ein geometrischer Parameter, insbesondere eine geometrische Querschnittsfläche ( $A$ ), der Drosselstelle berücksichtigt wird, und/oder dass beim Bestimmen des Massenstroms ( $dm/dt$ ) eine Temperatur ( $T_1$ ) des Massenstroms ( $dm/dt$ ) vor der Drosselstelle berücksichtigt wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet,**

dass das Verfahren zum Ermitteln eines Abluftmassenstroms ( $dm_{L2}/dt$ ) in einer Abluftleitung (12) des Kathodensystems (10) des Brennstoffzellensystems (100) durchgeführt wird, und/oder dass eine Turbine ( $T$ ) in einer Abluftleitung (12) des Kathodensystems (10) des Brennstoffzellensystems (100) als eine Drosselstelle für den Massenstrom ( $dm/dt$ ) betrachtet wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass das Verfahren mindestens einen weiteren Schritt aufweist:

- Ermitteln von mindestens einem Hilfsmassenstrom ( $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$ ), welcher nach der Drosselstelle dem Massenstrom ( $dm/dt$ ) zugefügt wird.

5. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch,

**dadurch gekennzeichnet,**

dass der mindestens eine Hilfsmassenstrom ( $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$ ) durch das Verfahren nach Anspruch 1 an einer Drosselstelle für den mindestens einen Hilfsmassenstrom ( $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$ ) ermittelt wird, und/oder dass der mindestens eine Hilfsmassenstrom ( $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$ ) in Abhängigkeit von den erfassten Drücken ( $p_1$ ,  $p_2$ ) vor und nach der Drosselstelle für den Massenstrom ( $dm/dt$ ), insbesondere von einem Druckabfall ( $p_2/p_1$ ) an der Drosselstelle für den Massenstrom ( $dm/dt$ ), approximiert wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass das Verfahren mindestens einen weiteren Schritt aufweist:

- Bestimmen eines Abluftmassenstroms ( $dm_{L2}/dt$ ) in einer Abluftleitung (12) des Kathodensystems (10) des Brennstoffzellensystems (100) in Abhängigkeit von dem bestimmten Massenstrom ( $dm/dt$ ) durch die Drosselstelle und von einem ermittelten Hilfsmassenstrom ( $dm_{LA}/dt$ ,  $dm_{LB}/dt$ ), welcher nach der Drosselstelle dem Massenstrom ( $dm/dt$ ) zugefügt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet,**

dass das Verfahren zum Steuern und/oder Regeln eines Betriebs des Brennstoffzellensystems (100), insbesondere eines Betriebs des Kathodensystems (10) des Brennstoffzellensystems (100), durchgeführt wird, und/oder dass das Verfahren zur Diagnose und/oder Plausibilisierung eines Massenstromsensors ( $S$ ) in dem Kathodensystem (10) des Brennstoffzellensystems (100) durchgeführt wird.

8. Computerprogrammprodukt, umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Computerprogrammprodukts durch einen Computer diesen veranlassen, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen.



9. Steuereinheit, aufweisend eine Recheneinheit und eine Speichereinheit, in welcher ein Code hinterlegt ist, welcher bei zumindest teilweiser Ausführung durch die Recheneinheit ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchführt.

10. Brennstoffzellensystem (100), aufweisend eine Steuereinheit nach dem vorhergehenden Anspruch.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

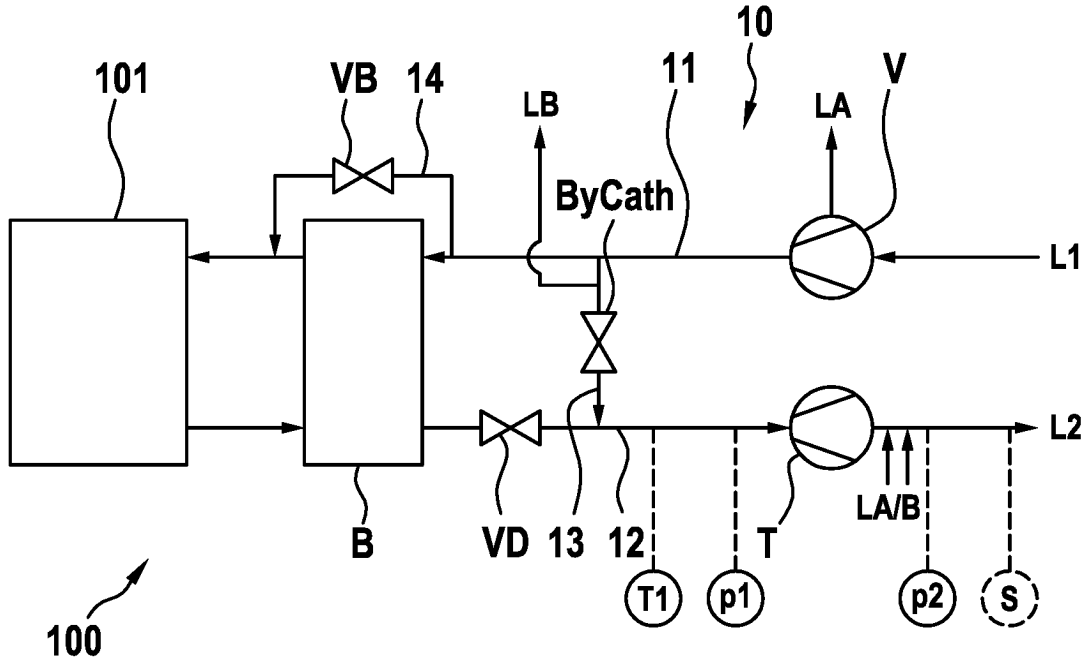


Fig. 2

