

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
25. Januar 2018 (25.01.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/015336 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01M 8/04089 (2016.01) *H01M 8/04746* (2016.01)
H01M 8/04992 (2016.01) *H01M 8/04828* (2016.01)
H01M 8/04701 (2016.01) *F02D 41/00* (2006.01)

(72) Erfinder: **KÜGELE, Christoph**; Bergstraße 1, 8020 Graz (AT). **JAKUBEK, Stefan**; Carlberggasse 69/27, 1230 Wien (AT). **KANCSÁR, János**; Stromstraße 36-38/3/19, 1200 Wien (AT).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/067999

(74) Anwalt: **PATENTANWÄLTE PINTER & WEISS OG**; Prinz-Eugen-Strasse 70, 1040 Wien (AT).

(22) Internationales Anmeldedatum:

17. Juli 2017 (17.07.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

A50663/2016 20. Juli 2016 (20.07.2016) AT

(71) Anmelder: **AVL LIST GMBH** [AT/AT]; Hans-List-Platz 1, 8020 Graz (AT).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,

(54) Title: REGULATED GAS CONDITIONING PROCESS FOR A REACTION GAS OF A FUEL CELL

(54) Bezeichnung: GEREGLTE GASKONDITIONIERUNG FÜR EIN REAKTIONSGAS EINER BRENNSTOFFZELLE

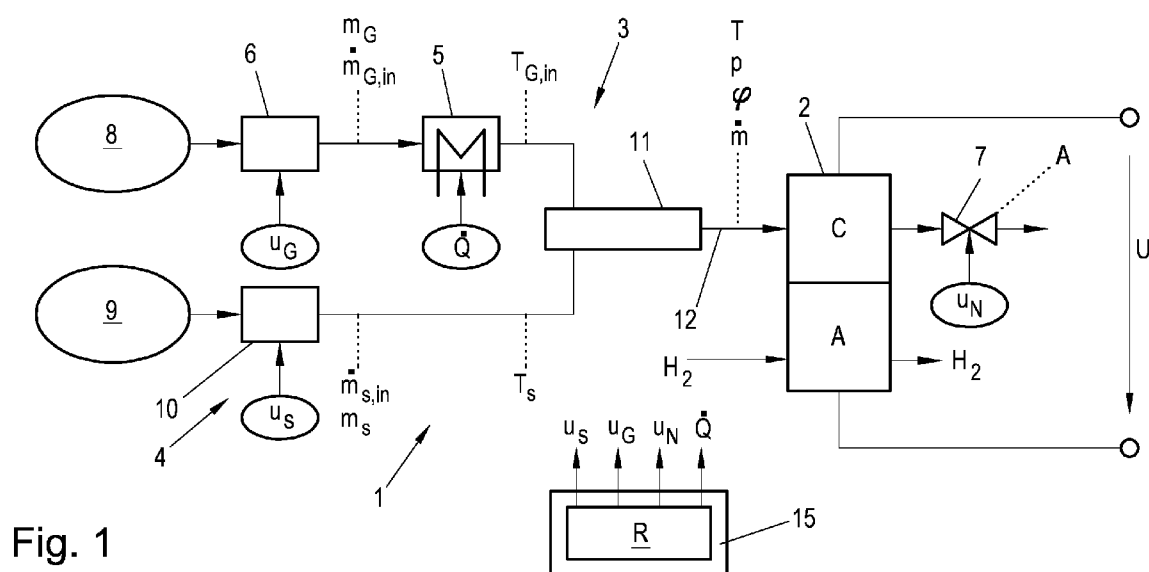


Fig. 1

(57) Abstract: The aim of the invention is to allow a precise and quick regulation of the influencing variables in the operation of a fuel cell. This is achieved in that a regulator (R) is used for the regulation, said regulator being designed on the basis of a model of the gas conditioning unit (3) in the form of a coupled nonlinear multivariable system in that the coupled nonlinear multivariable system is decoupled and linearized using Lie derivatives, and the regulator (R) is designed for the decoupled linear multivariable system. The regulator (R) calculates the control variables (u_G , u_S , u_N , Q) for at least three present actuators of the influencing variables of the gas conditioning unit (3) at each sampling time of the regulation using specified target variables ($y_{j,dmd}$), and at least the three actuators of the gas conditioning unit (3) adjust the calculated control variables (u_G , u_S , u_N , Q) at each sampling time of the regulation.

SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(57) Zusammenfassung: Um die Einflussgrößen des Betriebs einer Brennstoffzelle genau und schnell regeln zu können ist vorgesehen, dass für die Regelung ein Regler (R) verwendet wird, der auf Basis eines Modells der Gaskonditioniereinheit (3) in Form eines gekoppelten, nichtlinearen Mehrgrößensystems entworfen wurde, indem das gekoppelte, nichtlineare Mehrgrößensystem mittels Lie-Ableitungen entkoppelt und linearisiert wurde und der Regler (R) für das entkoppelte, lineare Mehrgrößensystem entworfen wurde, wobei der Regler (R) zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung anhand vorgegebener Sollgrößen ($y_{j,dmd}$) die Stellgrößen (u_G, u_S, u_N, Q) für zumindest drei vorhandene Aktuatoren der Einflussgrößen der Gaskonditioniereinheit (3) berechnet und zumindest diese drei Aktuatoren der Gaskonditioniereinheit (3) die berechneten Stellgrößen (u_G, u_S, u_N, Q) zu jeden Abtastzeitpunkt der Regelung einstellen.

Geregelte Gaskonditionierung für ein Reaktionsgas einer Brennstoffzelle

Die gegenständliche Erfindung betrifft eine geregelte Gaskonditionierung für ein Reaktionsgas einer Brennstoffzelle und ein Verfahren zur Regelung einer Gaskonditionierung für eine Brennstoffzelle zum Betreiben der Brennstoffzelle.

5 Brennstoffzellen werden als Energiequelle der Zukunft gesehen, insbesondere auch für die mobile Anwendung in Fahrzeugen beliebiger Art. Hierbei hat sich die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane Fuel Cell oder PEMFC) als eine der vielversprechendsten Technologien herauskristallisiert, weil diese bei niedrigen Temperaturen betrieben werden kann, hohe Ansprechzeiten bietet, eine hohe Leistungsdichte aufweist und emissionsfrei (Reaktionspartner nur Wasserstoff und Sauerstoff) betrieben werden kann. Daneben gibt es allerdings noch eine Reihe anderer Brennstoffzellen Technologien, wie beispielsweise eine Alkalische Brennstoffzelle (AFC), eine Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC), eine Direkt-Ethanol-Brennstoffzelle (DEFC), eine Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC), eine Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC), usw. Eine Brennstoffzelle verwendet für die Anode und für die Kathode je ein Reaktionsgas, z.B. Sauerstoff O_2 (bzw. Luft) und Wasserstoff H_2 , die elektrochemisch reagieren um elektrischen Strom zu erzeugen. Der Aufbau und die Funktionen der verschiedenen Brennstoffzellen sind hinreichend bekannt, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Eine Konditionierung der Reaktionsgase ist für einen Betrieb einer Brennstoffzelle nicht zwingend erforderlich. Jedoch kann nur mit korrekter Gaskonditionierung die Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit sowie Leistungsdichte erreicht werden, die für einen wirtschaftlichen und effizienten Einsatz von Brennstoffzellen, beispielsweise in einem Fahrzeug, notwendig sind. Dabei kann es abhängig vom Typ der Brennstoffzelle notwendig sein nur eines der Reaktionsgase oder beide Reaktionsgase zu konditionieren. Die korrekte Prozessführung einer Brennstoffzelle, was insbesondere die Gaskonditionierung inkludiert, ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit, Haltbarkeit und den sicheren Betrieb der Brennstoffzelle, insbesondere auch bei Einwirken von externen und internen Störungen. Allgemein führt eine fehlerhafte verfahrenstechnische Prozessführung bei Brennstoffzellen zu einem reversiblen oder irreversiblen Leistungsverlust (Degradation). Ein Indikator für die aktuelle Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle stellt der Gesundheitszustand (gängige Abkürzung SoH für Englisch State of Health) dar. Erreicht eine Brennstoffzelle einen definierten Wert des SoH (im Automobil typischerweise 80% der Dauerleistung im Neuzustand) spricht man von End-of-Service, was natürlich unerwünscht ist und vermieden werden soll.

Bei der Gaskonditionierung sind die Zustandsgrößen Druck, Temperatur und relativer Feuchtigkeit (p , T , rH), sowie der Massenstrom des Reaktionsgases entscheidend.

Zum Beispiel führt ein zu geringer Massenstrom zu Reaktandenmangel, was sofort die Leistung negativ beeinflusst und je nach Dauer und Intensität irreversible Schäden an der Brennstoffzelle verursacht. Eine weitere wichtige Einflussgröße ist der Druck des Reaktionsgases. Zwar hat ein gewisser Druckgradient zwischen Anode und Kathode einen positiven Einfluss auf die Wirkungsweise, jedoch wird bei einem zu großen Differenzdruck die Membran und damit die Brennstoffzelle beschädigt. Ein weiteres Beispiel stellt die relative Feuchtigkeit des Reaktionsgases dar. In einer Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle ist es beispielsweise entscheidend, die Membran vor dem Austrocknen zu schützen, da nur eine hydrierte Membrane Wasserstoffkationen leitet und damit leistungsfähig ist. Jedoch muss gleichzeitig eine Blockade der Gaskanäle und des Diffusionspapiers durch zu viel Flüssigwasser, welche in Reaktandenunterversorgung resultiert, vermieden werden. Zusätzlich führt eine zyklische Be- und Entfeuchtung der Membrane zu mechanischen Stress für diese und damit wieder zu Rissen und Fehlstellen (Pin Holes) in der Membran, die ein direktes Durchtreten von Wasserstoff und Sauerstoff begünstigen. Beide Effekte haben folglich wieder einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Gesundheitszustand einer Brennstoffzelle. Nicht zuletzt spielt auch die Temperatur eine Rolle. Neben der beschleunigten chemischen Zersetzung der Membrane bei hohen Temperaturen sind die relative Feuchtigkeit und die Temperatur auch physikalisch gekoppelt, womit auch letztere die oben genannten Effekte herbeiführen kann. Die genannten Beispiele stellen nur ein Auszug der möglichen Effekte bei mangelhafter Gaskonditionierung dar und sollen dem besseren Verständnis der Problematik dienen.

Das große Problem für die Gaskonditionierung ist, dass die genannten vier Einflussgrößen aufgrund physikalischer (z.B. thermodynamischer) Zusammenhänge voneinander abhängig sind und dazu nichtlineares Verhalten aufweisen. Dieses Problem umgeht man oftmals dadurch, dass die Komponenten der Gaskonditionierung sowie das Regelungskonzept für die Gaskonditionierung aufeinander abgestimmt sind. Dadurch ist eine recht einfache Regelung basierend auf Kennfeldern, Kennwerten, Kennpunkten, etc. zusammen mit einfachen Reglern (wie z.B. PID-Regler) zu weiten Teilen ausreichend. Dabei ist es auch möglich, dass die Parameter der Regelung (Kennfelder, Kennwerte, Kennpunkte) in Abhängigkeit des SoH mit Korrekturfaktoren versehen werden.

Will man die Möglichkeiten einer Brennstoffzelle voll ausschöpfen, ist eine derartig einfache Regelung der Gaskonditionierung oftmals nicht ausreichend. Insbesondere kann damit in der Regel kein (hoch)dynamischer Betrieb der Brennstoffzelle (am Prüfstand oder in der realen Anwendung) realisiert werden. Unter (hoch)dynamischen Betrieb wird dabei insbesondere ein rasches Ansprechverhalten der Regelung verstanden, d.h. dass die Regelung in der Lage ist, auch schnellen Änderungen in den Sollgrößen der Regelung mit möglichst geringer Regelabweichung zu folgen. Vor allem bei der Entwicklung einer Brennstoffzelle auf einem

Prüfstand, wo man die Brennstoffzelle in der Regel dynamischen Prüfläufen (im Sinne der Änderungsrate der Einflussgrößen, aber auch der Last der Brennstoffzelle) unterwerfen möchte, um das Verhalten der Brennstoffzelle zu prüfen oder zu verbessern ist dies ein Problem.

- 5 Damit benötigt man für eine dynamische Regelung der Gaskonditionierung einen Regler, der in der Lage ist, die geregelten Größen schnell und genau und vor allem auch transient einstellen zu können.

Dazu finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze zur Regelung der Gaskonditionierung einer Brennstoffzelle. Viele dieser Ansätze basieren auf einer mehr oder weniger starken Vereinfachung der thermodynamischen Zusammenhänge. Meistens werden nur zwei der
10 genannten Einflussgrößen geregelt und für die anderen Einflussgrößen werden Annahmen getroffen. Dazu wird dann ein geeigneter Regler entworfen. In den meisten Fällen wird dabei der Druck oder die Feuchtigkeit geregelt. Ein Beispiel hierfür ist Damour C. et al. „A novel non-linear model-base control strategy to improve PEMFC water management – The flat-
15 ness-based approach“, Int. Journal of Hydrogen Energy 40 (2015), S.2371-2376. Darin wird ein Regler für die relative Feuchtigkeit unter Verwendung der bekannten Theorie der differentiellen Flachheit auf Basis eines Modells der Membranfeuchtigkeit entworfen. Der flachheitsbasierte Regler zeigt ein ausgezeichnetes Verhalten der Sollwertnachführung, eine hohe Störungsunterdrückung und eine hohe Stabilität. Trotzdem können damit nicht alle Ein-
20 flussgrößen geregelt werden, was diesen Regler für die angedachte Regelung der Gaskonditionierung ungeeignet macht.

Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung eine geregelte Gaskonditionierung für ein Reaktionsgas einer Brennstoffzelle, und ein entsprechendes Regelverfahren dafür, anzugeben, die eine genaue und schnelle Regelung von Einflussgrößen des Betriebs
25 der Brennstoffzelle ermöglichen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst. Die Erfindung beruht darauf, dass das hochgradig nichtlineare und gekoppelte Mehrgrößensystem, das sich aus der mathematischen Modellierung der Gaskonditioniereinheit ergibt durch Anwendung der Lie-Ableitungen entkoppeln und linearisieren lässt. Für das dar-
30 aus entstehende lineare, nicht gekoppelte Mehrgrößensystem kann dann mit herkömmlicher linearer Regelungstheorie ein Regler entworfen werden. Auf diese Weise kann die Gaskonditioniereinheit hinsichtlich der Einflussgrößen genau modelliert werden, was eine Voraussetzung für eine genaue, schnelle Regelung der Einflussgrößen darstellt.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 4 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

Fig.1 ein Prüfstand für eine Brennstoffzelle mit erfindungsgemäße Gaskonditionierung,
Fig.2 den Verlauf der Ausgangsgrößen bei sich ändernden Eingangsgrößen des gekoppelten Mehrgrößensystems,
Fig.3 einen erfindungsgemäßen Regler mit zwei Freiheitsgraden für die Gaskonditionierung und
Fig.4 den Verlauf der Ausgangsgrößen bei sich ändernden Eingangsgrößen beim erfindungsgemäß entkoppelten Mehrgrößensystem.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig.1 ohne Beschränkung der Allgemeinheit am Beispiel eines Prüfstands 1 für eine Protonenaustauschmembran (PEMFC) Brennstoffzelle 2 erläutert. Selbstverständlich könnte die Brennstoffzelle 2 auch als elektrische Versorgung in einer Maschine oder Anlage eingesetzt werden. Die Gaskonditionierung und die Regelung dafür wären dann in dieser Maschine oder Anlage realisiert. Wenn im nachfolgenden vom Betrieb einer Brennstoffzelle 2 gesprochen wird, wird damit daher immer der Betrieb der Brennstoffzelle 2 auf einem Prüfstand 1 und der reale Betrieb der Brennstoffzelle 2 in einer Maschine oder Anlage verstanden.

Die Brennstoffzelle 2 ist im Beispiel nach Fig.1 am Prüfstand 1 aufgebaut und wird am Prüfstand 1 betrieben. Wie hinreichend bekannt umfasst die Brennstoffzelle 2 eine Kathode C, der ein erstes Reaktionsgas, beispielsweise Sauerstoff, auch in Form von Luft, zugeführt wird und eine Anode A, der ein zweites Reaktionsgas, beispielsweise Wasserstoff H_2 , zugeführt wird. Die beiden Reaktionsgase sind im Inneren der Brennstoffzelle 2 durch eine Polymermembran voneinander getrennt. Zwischen Kathode C und Anode A kann eine elektrische Spannung U abgegriffen werden. Dieser grundlegende Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle 2 sind hinlänglich bekannt, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

Zumindest ein Reaktionsgas, in der Regel das Sauerstoff führende Reaktionsgas, insbesondere Luft, wird in einer Gaskonditioniereinheit 3 konditioniert. In der Gaskonditioniereinheit 3 wird der Druck p , die relative Feuchtigkeit φ , die Temperatur T und der Massenfluss \dot{m} des konditionierten Reaktionsgases eingestellt – in Fig.1 sind diese vier Einflussgrößen am Eingang der Kathode C angedeutet. Erfindungsgemäß werden dabei zumindest drei, vorzugsweise alle vier, dieser vier Einflussgrößen konditioniert. „Konditionieren“ bedeutet dabei, dass der Wert einer Einflussgröße auf einen vorgegebenen Wert, eine Sollgröße, geregelt wird. Im Falle einer nicht mit der Gaskonditioniereinheit 3 konditionierten Einflussgröße kön-

nen für diese Einflussgröße Annahmen getroffen werden, beispielsweise kann diese Einflussgröße konstant gehalten werden.

Zur Regelung dieser Einflussgrößen sind in der Gaskonditioniereinheit 3 entsprechende Aktuatoren vorgesehen. Insbesondere sind eine Befeuchtungseinrichtung 4 zum Befeuchten
5 des Reaktionsgases zur Einstellung einer relativen Feuchtigkeit φ des Reaktionsgases, eine Temperiereinrichtung 5 zum Temperieren des Reaktionsgases zur Einstellung einer Temperatur T des Reaktionsgases, eine Massenflussregeleinrichtung 6 zum Regeln des Massenflusses \dot{m} des Reaktionsgas und eine Druckregeleinrichtung 7 zum Regeln des Druckes p des Reaktionsgases vorgesehen. Analog zu den zu konditionierenden Einflussgrößen sind
10 zumindest drei dieser vier Einrichtungen, vorzugsweise alle vier, in der Gaskonditioniereinheit 3 vorgesehen. Selbstverständlich ist auch eine Gasquelle 8 für das Reaktionsgas vorgesehen, die mit der Gaskonditioniereinheit 3 verbunden ist oder ebenfalls in der Gaskonditioniereinheit 3 angeordnet ist.

Die Gasquelle 8 ist beispielsweise ein Druckspeicher mit komprimierten, trockenen Reaktionsgas, beispielsweise Luft. Alternativ kann als Gasquelle 8 bei Verwendung von Luft auch
15 Umgebungsluft aufbereitet, beispielsweise gefiltert, komprimiert, getrocknet, usw. werden.

Die Temperiereinrichtung 5 ist beispielsweise eine elektrische Heiz- und Kühleinrichtung oder ein Wärmetauscher. Als Temperiereinrichtung 5 kann auch eine Einrichtung wie in der AT 516 385 A1 beschrieben verwendet werden.

Die Befeuchtungseinrichtung 4 umfasst in diesem Ausführungsbeispiel einen Wasserdampf-
20 generator 9, einen Massenflussregler 10 für den Wasserdampf und eine Mischkammer 11. Als Massenflussregler 10 für den Wasserdampf, und auch als Massenflussregeleinrichtung 6 für das Reaktionsgas, können herkömmliche, geeignete, kommerziell erhältliche, regelbare Massenflussregler eingesetzt werden. In der Mischkammer 11 wird der Wasserdampf mit
25 dem von der Gasquelle 8 stammenden Gas zum konditionierten Reaktionsgas für die Brennstoffzelle 2 gemischt.

Selbstverständlich sind auch andere Ausführungen einer Befeuchtungseinrichtungen 4 denkbar. Beispielsweise könnte Wasser dem Gas aus der Gasquelle 8 zugeführt, z.B. eingespritzt, werden.

Als Druckregeleinrichtung 7 wird in diesem Beispiel ein Gegendruckventil verwendet, das
30 über den regelbaren Öffnungsquerschnitt den Druck p des Reaktionsgases einstellt. Das Gegendruckventil 7 ist in der Gaskonditioniereinheit 3 stromabwärts der Brennstoffzelle 2 angeordnet. Das ermöglicht es, den Druck vor der Brennstoffzelle 2 zu regeln, womit die

Druckregelung von allfälligen Druckverlusten in den anderen Komponenten der Gaskonditioniereinheit 3 unbeeinflusst bleibt.

Nach der Mischkammer 11 liegt das Reaktionsgas in einer Reaktionsgasleitung 12, die mit der Brennstoffzelle 2, bzw. mit der Kathode C oder Anode A der Brennstoffzelle 2, verbunden ist daher mit einer bestimmten Temperatur T , einer bestimmten relativen Feuchtigkeit φ , einem bestimmten Druck p und einem bestimmten Massenfluss \dot{m} vor.

Dieser anhand der Fig.1 beschriebene Aufbau einer Gaskonditioniereinheit 3 ist allerdings nur beispielhaft und es sind natürlich andere Aufbauten der Gaskonditioniereinheit 3 und auch andere konkrete Ausführungen der Befeuchtungseinrichtung 4, Massenflussregelrichtung 6, Temperiereinrichtung 5 und Druckregelrichtung 7 denkbar.

Um die Einflussgrößen regeln zu können, sind die Befeuchtungseinrichtung 4, Massenflussregelrichtung 6, Temperiereinrichtung 5 und Druckregelrichtung 7 über eine jeweilige Stellgröße regelbar. Die Stellgrößen werden dabei von einer Regelungseinheit 15, in der ein Regler R implementiert ist, berechnet. Im in Fig.1 gezeigten Ausführungsbeispiel wird die Befeuchtungseinrichtung 4 über den Massenflussregler 10 für den Wasserdampf mit der Stellgröße u_s , die Massenflussregelrichtung 6 mit der Stellgröße u_G , die Temperiereinrichtung 5 mit der Stellgröße \dot{Q} und die Druckregelrichtung 7 mit der Stellgröße u_N geregelt. Mit der Stellgröße wird der jeweilige Aktuator angesteuert, um eine Veränderung der Einflussgröße hervorzurufen.

Für den Reglerentwurf des Reglers R zum Regeln der Gaskonditioniereinheit 3 ist zuerst ein Modell der Gaskonditioniereinheit 3 zu erstellen. Auch hierbei sind verschiedenste Modelle denkbar. Ein vorteilhaftes Modell wird nachfolgend beschrieben, wobei alle vier Einflussgrößen berücksichtigt werden. Dazu werden zuerst die Systemgleichungen für den Aufbau nach Fig.1 aufgestellt.

Aus der Massenbilanz in der Mischkammer 11 ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} m_G &= \dot{m}_{G,in} - \dot{m}_{G,out} \\ \frac{d}{dt} m_S &= \dot{m}_{S,in} - \dot{m}_{S,out} \end{aligned},$$

mit der Masse m_G des Gases, dem Massenfluss des Gases $\dot{m}_{G,in}$ in die Mischkammer 11, dem Massenfluss des Gases $\dot{m}_{G,out}$ aus der Mischkammer 11, dem Massenfluss des Wasserdampfes $\dot{m}_{S,in}$ in die Mischkammer 11 und dem Massenfluss des Wasserdampfes $\dot{m}_{S,out}$

aus der Mischkammer 11. Der Massenfluss von Gas und Wasserdampf aus der Mischkammer 11 ist gegeben durch $\dot{m}_{G,out} = \frac{m_G}{m} \dot{m}$, $\dot{m}_{S,out} = \frac{m_S}{m} \dot{m}$ mit der Gesamtmasse m in der Gaskonditioniereinheit 3 und den Massen m_G des Gases und m_S des Wasserdampfes und dem Massenfluss des Reaktionsgases \dot{m} . Dabei muss natürlich gelten $m = m_G + m_S$.

- 5 Aus der Energiebilanz der Gaskonditioniereinheit 3 folgt

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_{G,in} \cdot h_{G,in} + \dot{m}_{S,in} \cdot h_{S,in} - \dot{m} \cdot h$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} (m_G u_{iG} + m_S u_{iS})$$

- Dabei bezeichnet U die innere Energie und h die spezifische Enthalpie des Gases (hier und im nachfolgenden markiert durch Index G), des Wasserdampfes (hier und im nachfolgenden markiert durch Index S) und des Reaktionsgases (hier und im nachfolgenden ohne Index)
- 10 nach der Mischkammer 11 und u_i bezeichnet die spezifische innere Energie des Gases und des Wasserdampfes. Die spezifische Enthalpie h eines Gases ist bekanntermaßen das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität c_p bei konstanten Druck und der Temperatur T des Gases. Bei Wasserdampf kommt noch die latente Wärme r_0 additiv hinzu. Die innere Energie u_i eines Gases ist das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität c_v bei konstanten Volumen und der Temperatur T des Gases. Bei Wasserdampf kommt noch die latente Wärme r_0 additiv hinzu. Setzt man dass alles in die Energiebilanz ein und berücksichtigt man
- 15 die Massenbilanz erhält man die folgende Systemgleichung, die die Temperaturdynamik der Gaskonditioniereinheit 3 beschreibt.

$$\frac{d}{dt} T = \frac{1}{m_G c_{vG} + m_S c_{vS}} \cdot$$

$$\cdot \left(\dot{m}_{G,in} c_{pG} T_{G,in} + \dot{m}_{S,in} (c_{pS} T_{S,in} + r_0) \right) -$$

$$- \frac{1}{m} \dot{m} \left(m_G c_{pG} T + m_S (c_{pS} T + r_0) \right) -$$

$$- \frac{d}{dt} m_G c_{vG} T - \frac{d}{dt} m_S (c_{vS} T + r_0)$$

- 20 Aus der thermodynamischen Zustandsgleichung für ein ideales Gas ergibt sich weiter

$$pV = (m_G R_G + m_S R_S) T$$

mit dem Druck p und der Temperatur T am Eingang der Brennstoffzelle 2. R bezeichnet in bekannter Weise die Gaskonstante für Gas (Index G), Wasserdampf (Index S) oder für das

Reaktionsgas (ohne Index). Das Volumen V bezeichnet dabei vorzugsweise nicht nur das Volumen der Mischkammer 11, sondern auch die Volumina der Verrohrung in der Gaskonditioniereinheit 3. Der Druck p und der Massenfluss \dot{m} des Reaktionsgases werden auch maßgeblich vom Gegendruckventil 7 beeinflusst, das wie folgt modelliert werden kann.

$$\dot{m} = A \cdot p \sqrt{\frac{2}{RT}} \cdot \psi$$

5

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}, \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Darin bezeichnet A den Öffnungsquerschnitt des Gegendruckventils 7 und p_0 den Umgebungsdruck.

Die relative Feuchtigkeit φ wird durch

$$\varphi = \frac{X}{\frac{R_G}{R_S} + X} \cdot \frac{p}{p_w(T)}, \quad X = \frac{m_S}{m_G}$$

10 modelliert, wobei $p_w(T)$ den Sättigungs-Partialdruck bezeichnet, der beispielsweise durch

$p_w(T) = p_m \cdot e^{\frac{C_1 T}{C_2 + T}}$ gegeben ist. Die Parameter p_m , C_1 , C_2 können beispielsweise aus Plant R.S. et al., „Parameterization of Atmospheric Convection“, Vol.1, Imperial College Press, 2015 entnommen werden.

Zusätzlich wird noch die Dynamik der Aktuatoren in Abhängigkeit von den Stellgrößen u_S , u_G ,

15 \dot{Q} und u_N in Form von Verzögerungsglieder 1.Ordnung mit den Zeitkonstanten τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , modelliert:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \dot{m}_{G,in} &= \frac{1}{\tau_1} (u_G - \dot{m}_{G,in}) \\ \frac{d}{dt} T_{G,in} &= \frac{1}{\tau_2} \frac{1}{c_{pG} \dot{m}_{G,in}} \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{G,in}} - c_{pG} (T_{G,in} - T_{G,0}) \right) \\ \frac{d}{dt} \dot{m}_{S,in} &= \frac{1}{\tau_3} (u_S - \dot{m}_{S,in}) \\ \frac{d}{dt} \dot{A} &= \frac{1}{\tau_4} (u_N - (\dot{A} - \dot{A}_0)) \end{aligned}$$

Darin sind $T_{G,0}$ und \dot{A}_0 vorgegebene Offsetgrößen.

Aus den obigen Systemgleichungen erkennt man, dass ein nichtlineares Mehrgrößensystem (MIMO, multiple input multiple output) System der Form

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) u_i$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$$

vorliegt, mit dem Zustandsvektor \mathbf{x} , Eingangsvektor \mathbf{u} und Ausgangsvektor \mathbf{y} wie folgt:

$$5 \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} m_G \\ m_S \\ T \\ \dot{m}_{G,in} \\ T_{G,in} \\ \dot{m}_{S,in} \\ A \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_G \\ \dot{Q} \\ u_S \\ u_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} T \\ p \\ \varphi \\ \dot{m} \end{pmatrix}.$$

In Fig.1 ist zum besseren Verständnis angedeutet, wo diese Größen jeweils auftreten.

Die Nichtlinearität ergibt sich aus den Systemfunktionen $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ aus der Zustandsgleichung und der Systemfunktion $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ aus der Ausgangsgleichung, die jeweils vom Zustandsvektor \mathbf{x} abhängig sind.

- 10 Das Modell der Gaskonditioniereinheit 3 ist aber nicht nur nichtlinear, sondern die einzelnen Zustandsgleichungen sind auch mehrfach gekoppelt, wodurch die Stellgrößen u_S , u_G , \dot{Q} , u_N des Eingangsvektors \mathbf{u} den Ausgangsgrößen T , p , φ , \dot{m} im Ausgangsvektor \mathbf{y} nicht zugeordnet werden können. Damit werden mehrere Ausgangsgrößen beeinflusst, wenn man eine der Stellgrößen u_S , u_G , \dot{Q} , u_N ändert. Das ist in Fig.2 dargestellt.

- 15 In Fig.2 sind rechts die Stellgrößen u_S , u_G , \dot{Q} , u_N über der Zeit t aufgetragen und links die Ausgangsgrößen des Ausgangsvektors \mathbf{y} . Zu den Zeitpunkten 50s, 100s, 150s und 200s wurde jeweils eine der Stellgrößen u_S , u_G , \dot{Q} , u_N geändert. Dabei änderten sich jeweils alle Ausgangsgrößen T , p , φ , \dot{m} .

- 20 Für das gekoppelte, nichtlineare, MIMO System muss nun ein Regler entworfen werden, mit dem die Gaskonditioniereinheit 3 geregelt werden kann. Dazu gibt es viele Möglichkeiten wobei im Nachfolgenden ein bevorzugter Reglerentwurf beschrieben wird.

Als ersten Schritt wird das nichtlineare, gekoppelte Mehrgrößensystem

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) u_i$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$$

entkoppelt und linearisiert. Dazu wird der Ausgang, d.h. eine Ausgangsgröße y_j , in der Form

$\frac{d}{dx} \frac{dx}{dt}$ zeitlich abgeleitet, wodurch sich

$$\dot{y}_j = \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) u_i =$$

$$= L_f h_j(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m L_{g_i} h_j(\mathbf{x}) u_i$$

- 5 ergibt. Darin bezeichnen $L_f h$ und $L_{g_i} h$ die bekannten Lie-Ableitungen der Systemfunktion $h(\mathbf{x})$ der Ausgangsgleichung bezüglich der Systemfunktionen $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ und $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ der Zustandsgleichung des gekoppelten, nichtlinearen Mehrgrößensystem. Die Lie-Ableitungen L_f und L_{g_i} sind demnach definiert als $L_f h_j(\mathbf{x}) = \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x})$ und $L_{g_i} h_j(\mathbf{x}) = \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_i(\mathbf{x})$.

- 10 Aus dem Obigen folgt, dass eine Stellgröße u_i keinen Einfluss auf die jeweilige zeitliche Ableitung der Ausgangsgröße y_j hat, wenn gilt $L_{g_i} h_j(\mathbf{x}) = 0$. Es wird daher der Ausgangsvektor \mathbf{y} für jede Ausgangsgröße y_j solange zeitlich abgeleitet, solange die Stellgröße u_i einen Einfluss auf die Ausgangsgröße y_j hat, also bis zur δ_j -ten Ableitung. Mit δ_j wird dann der relative Grad der j -ten Ausgangsgröße y_j bezeichnet, woraus sich die folgende Schreibweise mit den Lie-Ableitungen ergibt.

15
$$y_j^{(\delta_j)} = L_f^{\delta_j} h_j + \sum_{i=1}^m (L_{g_i} L_f^{\delta_j-1} h_j) u_i$$

Darin bezeichnet $L_f^{\delta_j}$ die δ_j -te Lie-Ableitung und (δ_j) bezeichnet die δ_j -te zeitliche Ableitung. Wenn das auf alle $j=1, \dots, m$ Ausgangsgrößen angewendet wird erhält man in allgemeiner Matrixschreibweise

$$\begin{pmatrix} y_1^{(\delta_1)} \\ y_2^{(\delta_2)} \\ \vdots \\ y_m^{(\delta_m)} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} L_f^{\delta_1} h_1(\mathbf{x}) \\ L_f^{\delta_2} h_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ L_f^{\delta_m} h_m(\mathbf{x}) \end{pmatrix}}_{\mathbf{l}(\mathbf{x})} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{\delta_1-1} h_1(\mathbf{x}) & \dots & L_{g_m} L_f^{\delta_1-1} h_1(\mathbf{x}) \\ L_{g_1} L_f^{\delta_2-1} h_2(\mathbf{x}) & \dots & L_{g_m} L_f^{\delta_2-1} h_2(\mathbf{x}) \\ \vdots & & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{\delta_m-1} h_m(\mathbf{x}) & \dots & L_{g_m} L_f^{\delta_m-1} h_m(\mathbf{x}) \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}(\mathbf{x})} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}$$

mit der Entkoppelungsmatrix $J(x)$. Der Vektor, der die δ_j -te zeitlichen Ableitungen der Ausgangsgrößen \mathbf{y} enthält wird mit einem neuen synthetischen Eingangsvektor \mathbf{v} gleichgesetzt,

also $\mathbf{v} = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_m)^T = (y_1^{(\delta_1)} \quad y_2^{(\delta_2)} \quad \dots \quad y_m^{(\delta_m)})^T$. Damit ergibt sich

$\mathbf{v} = \mathbf{I}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{u}$. Daraus folgt, dass der Zusammenhang zwischen dem neuen synthetischen

- 5 Eingang \mathbf{v} und den Ausgangsgrößen im Ausgangsvektor \mathbf{y} des Mehrgrößensystems entkoppelt ist und als Kette von Integratoren aufgefasst werden kann. Wird eine neue synthetische Eingangsgröße v_j δ_j -mal nach der Zeit integriert, erhält man die Ausgangsgröße y_j des Mehrgrößensystems.

Wird nun noch ein neuer Zustandsvektor \mathbf{z} definiert in der Form

$$10 \quad \mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{\delta_1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1(x) \\ L_f h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{\delta_1-1} h_1(x) \\ h_2(x) \\ L_f h_2(x) \\ \vdots \\ L_f^{\delta_2-1} h_2(x) \\ \vdots \\ L_f^{\delta_m-1} h_m(x) \end{pmatrix}$$

dann erhält man ein neues Mehrgrößensystem als lineares, nicht gekoppeltes Zustandsraummodell gemäß

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_c \mathbf{z} + \mathbf{B}_c \mathbf{v}$$

$$\text{mit } \mathbf{A}_c = \begin{pmatrix} A_{c,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{c,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{c,m} \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{B}_c = \begin{pmatrix} B_{c,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_{c,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{c,m} \end{pmatrix}, \text{ sowie der } (\delta_j \times \delta_j) \text{ Matrix}$$

$$15 \quad \mathbf{A}_{c,j} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ und dem } (\delta_j \times 1) \text{ Vektor } \mathbf{B}_{c,j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Auf das lineare, nicht gekoppelte Mehrgrößensystem der Form $\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_c \mathbf{z} + \mathbf{B}_c \mathbf{v}$ kann dann beliebige lineare Regelungstheorie angewendet werden und ein beliebiger linearer Regler dazu entworfen werden.

Für die Regelung ist es ein angestrebtes Ziel, dass die eingestellten Ausgangsgrößen y_j den vorgegebenen Sollgrößen $y_{j,dmd}$ möglichst gut folgen (trajectory tracking). Die Regelung soll dabei möglichst störunanfällig sein. Dazu bietet sich beispielsweise ein bekannter Regler R mit zwei Freiheitsgraden (Two-Degree-of-Freedom (2DoF) Regler) an, der aus einem Feedforward Regler FW und einem Feedback Regler FB besteht und z.B. in Fig.3 dargestellt ist. Dabei soll der Feedforward Regler FW das Führungsgrößenverhalten (trajectory tracking) sicherstellen und der Feedback Regler FB das Ausregeln allfälliger Störungen.

Eine neue Eingangsgröße v_j des entkoppelten, linearen Mehrgrößensystems 20 entspricht der δ_j -ten Ableitung der Ausgangsgröße y_j . Damit ergibt sich der Feedforward Teil des Reglers R als δ_j -te Ableitungen der Sollgrößen $y_{j,dmd}$. Jede Sollgröße $y_{j,dmd}$ des Sollgrößenvektors \mathbf{y}_{dmd} wird entsprechend ihres relativen Grades δ_j abgeleitet und additiv auf den Ausgang des Feedback Regler FB aufgeschaltet.

Der Feedback Regler FB erhält in bekannter Weise einen Regelfehlervektor \mathbf{e} als Abweichung zwischen den Sollgrößen $y_{j,dmd}$ im Sollgrößenvektor \mathbf{y}_{dmd} und den aktuellen Istwerten der Ausgangsgrößen \mathbf{y} , also $e_j(t) = y_j(t) - y_{j,dmd}(t)$. Grundsätzlich kann ein beliebiger Feedbackregler zum Ausregeln des Fehlers verwendet werden und es sind hinreichende Methoden bekannt, einen solchen Regler zu bestimmen. Ein einfacher Feedback Regler FB wird nachfolgend beschrieben.

Der Feedback Regler FB stellt auf den relativen Grad δ_j ab und es werden die folgenden Fehlerteile e_{j,δ_j} definiert.

$$e_{j,0} = \int_0^t e_j(\tau) d\tau, \quad e_{j,1} = e_j, \quad e_{j,2} = \dot{e}_j, \quad \dots, \quad e_{j,\delta_j} = e_j^{(\delta_j-1)}$$

Damit kann eine neue Eingangsgröße v_j des entkoppelten, linearen Mehrgrößensystems 20 gemäß Fig.3 angeschrieben werden als

$$v_j = y_{j,dmd}^{(\delta_j)} - K_{j,0} e_{j,0} - K_{j,1} e_{j,1} - \dots - K_{j,\delta_j} e_{j,\delta_j}.$$

Für einen relativen Grad δ_j von Zwei kann man eine Analogie zu einem PID-Regler herstellen, wobei $K_{j,0}$ ein Integralanteil, $K_{j,1}$ ein Proportionalanteil und $K_{j,2}$ einen Differentialanteil bilden. Für einen relativen Grad δ_j von Eins ergäbe sich ein PI-Regler.

Das ergibt in vektorieller Schreibweise

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A}_c - \mathbf{B}_c \mathbf{K}) \mathbf{e}(t)$$

Mit den oben definierten Matrizen \mathbf{A}_c , \mathbf{B}_c und $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_2 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_m \end{bmatrix}$ und

$$\mathbf{K}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{j,0} & \mathbf{K}_{j,1} & \cdots & \mathbf{K}_{j,\delta_j} \end{bmatrix}.$$

- 5 Die Reglerparameter \mathbf{K}_j des Feedback Reglers FB können anschließend festgelegt werden, um ein gewünschtes Reglerverhalten zu erzielen. Auch hierfür gibt es verschiedene bekannte Ansätze, beispielsweise die Methode der Polvorgabe für $(\mathbf{A}_c - \mathbf{B}_c \mathbf{K})$. Dabei werden alle gewünschten Pole vorzugsweise links der Imaginärachse gelegt, um die Stabilität zu sichern. Auf diese Weise können die Reglerparameter \mathbf{K}_j bestimmt werden.
- 10 Für die oben beschriebene Linearisierung und Entkopplung des nichtlinearen, gekoppelten Mehrgrößensystems, gekennzeichnet durch Σ^{-1} in Fig.3, werden auch noch die Zustandsgrößen \mathbf{x} benötigt, wie aus den Gleichungen ersichtlich und wie auch in Fig.3 angedeutet.

- Dazu können die Zustandsgrößen \mathbf{x} in der Gaskonditioniereinheit 3 gemessen werden, vorzugsweise zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung. Alternativ können die Zustandsgrößen \mathbf{x} auch durch einen Beobachter aus den Eingangsgrößen \mathbf{u} und/oder Ausgangsgrößen \mathbf{y} geschätzt werden, vorzugsweise wieder zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung. Die Zustandsgrößen \mathbf{x} können aber auch noch auf andere, einfache Weise berechnet werden.
- 15

- Ein nichtlineares Mehrgrößensystem der allgemeinen Form $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ hat die Eigenschaft der differentiellen Flachheit, wenn es einen Vektor differentiell unabhängiger Ausgangsgrößen $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)$ gibt, sodass die Zustandsgrößen \mathbf{x} und die Eingangsgrößen \mathbf{u} Funktionen dieses als flach bezeichneten Ausgangs \mathbf{y} und deren Ableitungen sind:
- 20

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$$

$$\mathbf{x} = \Phi(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n-1)})$$

$$\mathbf{u} = \Psi(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n)})$$

- Daraus folgt, dass für jeden beliebigen zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße $\mathbf{y}(t)$ der zugehörige zeitliche Verlauf der Eingangsgrößen $\mathbf{u}(t)$ und der zeitliche Verlauf der Zustandsgrößen
- 25

ßen $\mathbf{x}(t)$ einzig aus dem zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße $\mathbf{y}(t)$ berechnet werden kann, ohne die Differentialgleichungen des Mehrgrößensystem zu integrieren.

Es kann gezeigt werden, dass das oben beschriebene nichtlineare Mehrgrößensystem differentiell flach ist. Damit können die Zustandsgrößen \mathbf{x} einfach aus dem zeitlichen Verlauf der

Sollgrößen \mathbf{y}_{dmd} berechnet werden und müssen weder gemessen, noch geschätzt werden.

Das ist in Fig.3 durch den Index F bei den Zustandsgrößen \mathbf{x} angedeutet. Am Prüfstand 1 ist der zeitliche Verlauf der Sollgrößen \mathbf{y}_{dmd} beispielsweise durch den durchzuführenden Prüflauf festgelegt und damit bekannt. Die Zustandsgrößen \mathbf{x}_F können damit offline aus dem zeitlichen Verlauf der Sollgrößen \mathbf{y}_{dmd} vorab berechnet werden und liegen dann für die Regelung bei der Durchführung des Prüflaufs vor.

Für die Regelung der Gaskonditioniereinheit 3 für den Betrieb einer Brennstoffzelle 2 kann wie nachfolgend beschrieben vorgegangen werden.

Zuerst wird gegebenenfalls ein Regler R wie oben beschrieben entworfen, der ein gutes Führungsgrößenverhalten aufweist, sowie stabil und robust ist, also im Wesentlichen auch un-

empfindlich gegen Störungen ist. Das wird beispielsweise hauptsächlich durch die Wahl der Pole des Feedback Reglers FB erzielt. Gegebenenfalls kann aber auch auf einen bereits parametrisierten Regler R zurückgegriffen werden. Für den Betrieb der Brennstoffzelle 2 wird ein zeitlicher Sollgrößenverlauf $\mathbf{y}_{\text{dmd}}(t)$ für die als Sollgrößen dienenden Ausgangsgrößen T , p , φ , \dot{m} vorgegeben. Dieser Sollgrößenverlauf $\mathbf{y}_{\text{dmd}}(t)$ kann sich aus dem realen Betrieb der

Brennstoffzelle 2 ergeben, kann vorgegeben sein oder kann durch einen Prüflauf zur Prüfung der Brennstoffzelle 2 auf einem Prüfstand festgelegt sein. Im realen Betrieb der Brennstoffzelle 2 in einer Maschine oder Anlage lässt sich beispielsweise beim Übergang von einem Arbeitspunkt auf einen neuen Arbeitspunkt eine Trajektorie berechnen, entlang derer die Brennstoffzelle 2 bzw. die Gaskonditionierung geführt werden sollte. Das kann beispielsweise in einer Brennstoffzellensteuereinheit erfolgen. Die Brennstoffzellensteuereinheit gibt dabei auch die Arbeitspunkte aus dem realen Betrieb heraus vor. Kriterien für die Trajektorie sind z.B. ein schneller Übergang, wobei der transiente Verlauf die Brennstoffzelle 2 nicht beschädigen soll. Die Zustandsgrößen $\mathbf{x}_F(t)$ können damit offline aus dem zeitlichen Verlauf der Sollgrößen $\mathbf{y}_{\text{dmd}}(t)$ vorab berechnet werden. Alternativ können die Zustandsgrößen $\mathbf{x}_F(t)$

auch online zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung (also zu jedem Zeitpunkt zu dem neue Stellgrößen berechnet werden) berechnet oder gemessen werden. Die Abtastzeit für die Regelung ist typischerweise im Millisekundenbereich, beispielsweise wird die Regelung auf einem Prüfstand 1 mit 100Hz (10ms Abtastzeit) betrieben. Die Gaskonditioniereinheit 3 wird daraufhin mit dem zeitlichen Sollgrößenverlauf $\mathbf{y}_{\text{dmd}}(t)$, beispielsweise gemäß dem Prüflauf, beaufschlagt. Am Prüfstand 1 können dazu beispielsweise auch gewünschte Messungen an

der Brennstoffzelle 2 durchgeführt werden, um das Verhalten der Brennstoffzelle 2 beim vorgegebenen Prüflauf zu ermitteln.

Ein solcher Prüflauf in Form eines vorgegebenen Sollgrößenverlaufs $\mathbf{y}_{\text{dmd}}(t)$ wurde simuliert und das Ergebnis in der Fig.4 dargestellt. Für die Simulation wurden die folgenden Parameter angenommen: Stellbereich der Befeuchtungseinrichtung 4 $u_S=[0 - 30 \text{ kgh}^{-1}]$, Stellbereich der Temperiereinrichtung 5 $\dot{Q}=[0 - 9\text{kW}]$, Stellbereich der Massenflussregeleinrichtung 6 $u_G=[4 - 40 \text{ kgh}^{-1}]$, Stellbereich der Druckregeleinrichtung 7 $u_N=[0 - 2 \text{ cm}^2]$, Regelbereich der Temperatur $T=[20 - 100^\circ\text{C}]$, Regelbereich des Drucks $p=[1.1 - 3 \text{ bar}]$, Regelbereich der relativen Feuchtigkeit $\phi=[0 - 100\%]$ und Regelbereich des Massenflusses $\dot{m}=[0 - 70 \text{ kgh}^{-1}]$.

Dazu wurden noch folgende Parameter definiert: Volumen $V=14137 \text{ cm}^3$, Temperatur des Wasserdampfes $T_S=141^\circ\text{C}$, Umgebungsdruck $p_0=1 \text{ bar}$, spezifischen Wärmekapazität des Gases $c_{p,G}=1.04 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, spezifischen Wärmekapazität des Wasserdampfes $c_{p,S}=1.89 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Die Pole des Feedback Reglers FB wurden für die Ausgangsgrößen y_j mit relativem Grad $\delta_j=2$ auf $s_1=-1$, $s_{2,3}=-8\pm 1j$ festgelegt und für die Ausgangsgrößen y_j mit relativem Grad $\delta_j=1$ auf $s_{1,2}=-5$.

In Fig.4 links ist der vorgegebene Sollgrößenverlauf $\mathbf{y}_{\text{dmd}}(t)$ dargestellt. Rechts davon sind die Eingangsgrößen \mathbf{u} dargestellt, die vom Regler R eingestellt werden. Ebenfalls im linken Diagramm sind die in der Simulation berechneten Ausgangsgrößen \mathbf{y} dargestellt. Man erkennt zum Einen, das hervorragende Führungsgrößenverhalten des Reglers, d.h., dass die Ausgangsgrößen \mathbf{y} den Sollgrößen \mathbf{y}_{dmd} ohne erkennbare Abweichungen folgen. Zum anderen ist aber auch ersichtlich, dass nun die einzelnen Ausgangsgrößen y_j entkoppelt voneinander eingestellt werden können. Eine Änderung einer Ausgangsgröße y_j lässt die anderen Ausgangsgrößen unberührt. Dazu berechnet der Regler R zu jedem Abtastzeitpunkt die Kombination der neuen Eingangsgrößen \mathbf{v} , die die Eingangsgrößen \mathbf{u} ergeben, die mit den Aktuatoren der Gaskonditioniereinheit 3 eingestellt werden müssen.

Die Erfindung wurde anhand der Regelung aller vier Einflussgrößen bzw. Ausgangsgrößen y_j , also Temperatur T , Druck p , relative Feuchtigkeit ϕ und Massenfluss \dot{m} , erläutert. Es können allerdings auch nur drei dieser vier Einflussgrößen geregelt werden. Für die vierte, nicht geregelte Einflussgröße können dann entsprechende Annahmen getroffen werden, beispielsweise könnte diese vierte Einflussgröße konstant gehalten werden. Bei nur drei geregelten Einflussgrößen würde sich die Dimension der obigen Systemgleichungen um eins verringern. Der grundsätzliche Ansatz zur Entkoppelung und Linearisierung des gekoppelten, nichtlinearen Mehrgrößensystems wäre dadurch allerdings nicht betroffen, ebenso nicht der beschriebene Ansatz des Reglerentwurfs. Es könnte aber auch einfach die der vierten, nicht geregelten Einflussgrößen entsprechende Sollgröße gemäß der Annahmen vorgegeben

werden. So könnte diese Sollgröße im vorgegebenen Sollgrößenverlauf $y_{\text{dmd}}(t)$ beispielsweise konstant gehalten werden.

Die Anwendungen der geregelten Gaskonditioniereinheit 3 zur Gaskonditionierung eines Reaktionsgases einer Brennstoffzelle 2 sind vielfältig. Die Gaskonditionierung kann insbesondere sowohl auf einem Prüfstand (Stack oder Zellenprüfstand), aber auch in einem Brennstoffzellensystem, beispielsweise in einem Fahrzeug (Schiff, Zug, Flugzeug, PKW, LKW, Fahrrad, Motorrad, etc.), in einem Kraftwerk (auch in Kraft-Wärme-Koppelungen), in Notstromanlagen, in einem Handheld Gerät, bis zu jeglichem Gerät in dem Brennstoffzellensysteme eingebaut werden können, eingesetzt werden. Die Gaskonditionierung kann damit sowohl im realen Betrieb einer Brennstoffzelle in einem Brennstoffzellensystem, aber auch auf einem Prüfstand zum Prüfen oder Entwickeln einer Brennstoffzelle eingesetzt werden.

Die Gaskonditionierung ist grundsätzlich auch für andere Anwendungen verwendbar, beispielsweise für die Konditionierung der Ansaugluft einer Verbrennungskraftmaschine, ebenfalls wieder im realen Betrieb oder auf einem Prüfstand. Es könnte damit aber auch Gase in der Prozesstechnik, Verfahrenstechnik oder Medizintechnik konditioniert werden. Ebenso könnte die Gaskonditionierung auch in der Messtechnik verwendet werden, um ein Messgas für eine genaue Messung exakt zu Konditionieren.

Patentansprüche

1. Geregelte Gaskonditionierung für ein Reaktionsgas einer Brennstoffzelle (2), **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Gasquelle (8) für ein Reaktionsgas der Brennstoffzelle (2), eine Befeuchtungseinrichtung (4) zum Befeuchten des Reaktionsgases zur Einstellung einer relativen Feuchtigkeit (φ) des Reaktionsgases, eine Temperiereinrichtung (5) zum Temperieren des Reaktionsgases zur Einstellung einer Temperatur (T) des Reaktionsgases, eine Massenflussregleinrichtung (6) zum Regeln des Massenflusses (\dot{m}) des Reaktionsgases und eine Druckregleinrichtung (7) zum Regeln des Druckes (p) des Reaktionsgases vorgesehen sind, **dass** eine Regelungseinheit (15) mit einem Regler (R) vorgesehen ist, der Stellgrößen (u_G, u_S, u_N, \dot{Q}) für zumindest drei Aktuatoren aus der Gruppe der Befeuchtungseinrichtung (4), der Temperiereinrichtung (5), der Massenflussregleinrichtung (6) und der Druckregleinrichtung (7) berechnet, um damit einen vorgegebenen zeitlichen Verlauf von zumindest drei zugehörigen Einflussgrößen auf den Betrieb der Brennstoffzelle (2) aus der Gruppe der relativen Feuchtigkeit (φ), der Temperatur (T), des Massenflusses (\dot{m}) und des Druckes (p) des Reaktionsgases in einer Reaktionsgasleitung (12) einzustellen, **dass** der Regler (R) auf Basis eines Modells der Gaskonditioniereinheit (3) in Form eines gekoppelten, nichtlinearen

Mehrgrößensystems der Form
$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i$$
 entworfen ist, indem der Regler (R) für
$$y = h(x)$$

das mittels Lie-Ableitungen entkoppelte und linearisierte Mehrgrößensystem entworfen wird.

2. Verfahren zur Regelung einer Gaskonditioniereinheit (3) für eine Brennstoffzelle (2) zum Betreiben der Brennstoffzelle (2), **dadurch gekennzeichnet, dass** für die Regelung ein Regler (R) verwendet wird, der auf Basis eines Modells der Gaskonditioniereinheit (3) in

Form eines gekoppelten, nichtlinearen Mehrgrößensystems der Form
$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) u_i$$

$$y = h(x)$$

entworfen wurde, indem das gekoppelte, nichtlineare Mehrgrößensystem mittels Lie-Ableitungen entkoppelt und linearisiert wurde und der Regler (R) für das entkoppelte, lineare Mehrgrößensystem entworfen wurde, wobei der Regler (R) zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung aus vorgegebenen Sollgrößen ($y_{j,dmd}$) die Stellgrößen (u_G, u_S, u_N, \dot{Q}) für zumindest drei vorhandene Aktuatoren der Gaskonditioniereinheit (3) aus der Gruppe einer Befeuchtungseinrichtung (4) zum Befeuchten des Reaktionsgases zur Einstellung einer relativen Feuchtigkeit (φ) des Reaktionsgases, einer Temperiereinrichtung (5) zum Temperieren des

Reaktionsgases zur Einstellung einer Temperatur (T) des Reaktionsgases, einer Massenflussregleinrichtung (6) zum Regeln des Massenflusses (\dot{m}) des Reaktionsgases und einer Druckregleinrichtung (7) zum Regeln des Druckes (p) des Reaktionsgases berechnet **und dass** zumindest diese drei Aktuatoren der Gaskonditioniereinheit (3) die berechneten Stellgrößen (u_G, u_S, u_N, \dot{Q}) zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung einstellen.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** jede Ausgangsgröße (y_j) des gekoppelten, nichtlinearen Mehrgrößensystems gemäß ihrem relativen Grad (δ_j) in der

Form $y_j^{(\delta_j)} = L_f^{\delta_j} h_j + \sum_{i=1}^m (L_{g_i} L_f^{\delta_j-1} h_j) u_i$ zeitlich abgeleitet wird, wobei $L_f^{\delta_j}$ die δ_j -te Lie-Ableitung

bezeichnet, **dass** die δ_j -ten zeitlichen Ableitungen der Ausgangsgrößen (y_j) mit neuen Eingangsgrößen v_i gleichgesetzt werden, woraus ein lineares, nicht gekoppeltes Zustandsraummodell der Form $\dot{z} = A_c z + B_c v$ abgeleitet werden kann, mit definiten Matrizen A_c und

B_c und einem neuen Zustandsvektor

$$z^T = \left(h_1(x) \quad L_f h_1(x) \quad \cdots \quad L_f^{\delta_1-1} h_1(x) \quad h_2(x) \quad L_f h_2(x) \quad \cdots \quad L_f^{\delta_2-1} h_2(x) \quad \cdots \quad L_f^{\delta_m-1} h_m(x) \right)^T$$

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Regler (R) für das lineare, nicht gekoppelte Zustandsraummodell der Form $\dot{z} = A_c z + B_c v$ entworfen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Regler (R) mit zwei Freiheitsgraden mit einem Feedforward Regler (FW) und einem Feedback Regler (FB) entworfen wird, wobei die Ausgänge des Feedforward Reglers (FW) und des Feedback Reglers (FB) zu den neuen Eingangsgrößen (v) addiert werden und sich der Feedforward Teil aus den δ_j -ten zeitlichen Ableitungen der Sollgrößen ($y_{j,dmd}$) ergeben, und der Feedback Teil den Fehler (e) zwischen den aktuellen Istwerten der Ausgangsgrößen (y_j) und den Werten der Sollgrößen ($y_{j,dmd}$) ausregelt.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** Fehleranteile (e_{j,δ_j}) ge-

mäß $e_{j,0} = \int_0^t e_j(\tau) d\tau$, $e_{j,1} = e_j$, $e_{j,2} = \dot{e}_j$, ..., $e_{j,\delta_j} = e_j^{(\delta_j-1)}$ definiert werden, woraus sich

$\dot{e}(t) = (A_c - B_c K) e(t)$ ergibt, mit den definierten Matrizen A_c und B_c und einer Matrix K mit Parametern des Feedback Reglers (FB), die festgelegt werden, um ein gewünschtes Reglerverhalten des Feedback Reglers (FB) zu erzielen.

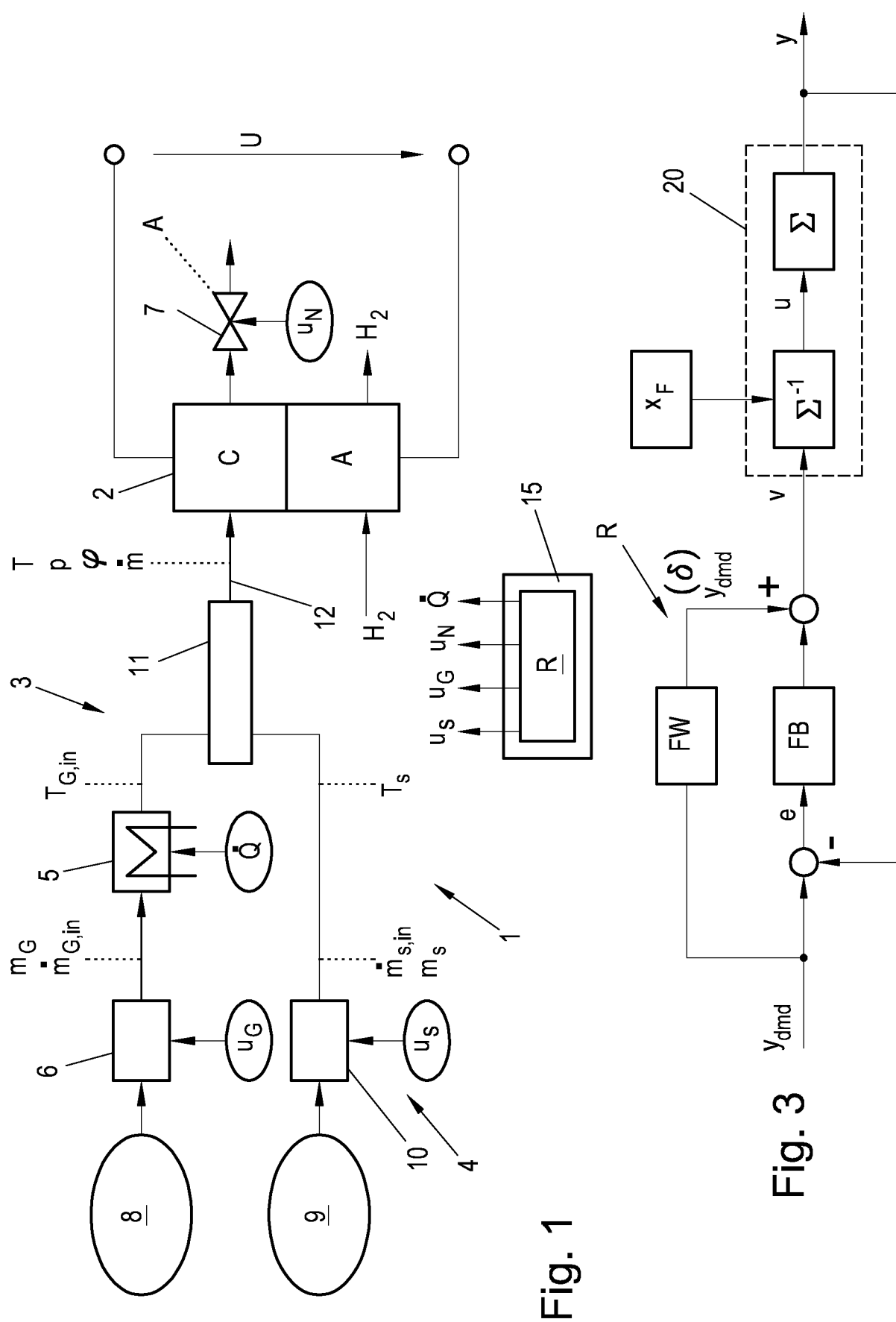
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit der Eigenschaft der differentiellen Flachheit des nichtlinearen, gekoppelten Mehrgrößensystems

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$$

der zeitliche Verlauf der Zustandsgrößen (\mathbf{x}) gemäß $\mathbf{x} = \Phi(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n-1)})$ aus dem zeitlichen

$$\mathbf{u} = \Psi(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n)})$$

Verlauf der Sollgrößen ($y_{j,dmd}$) vorab berechnet werden.



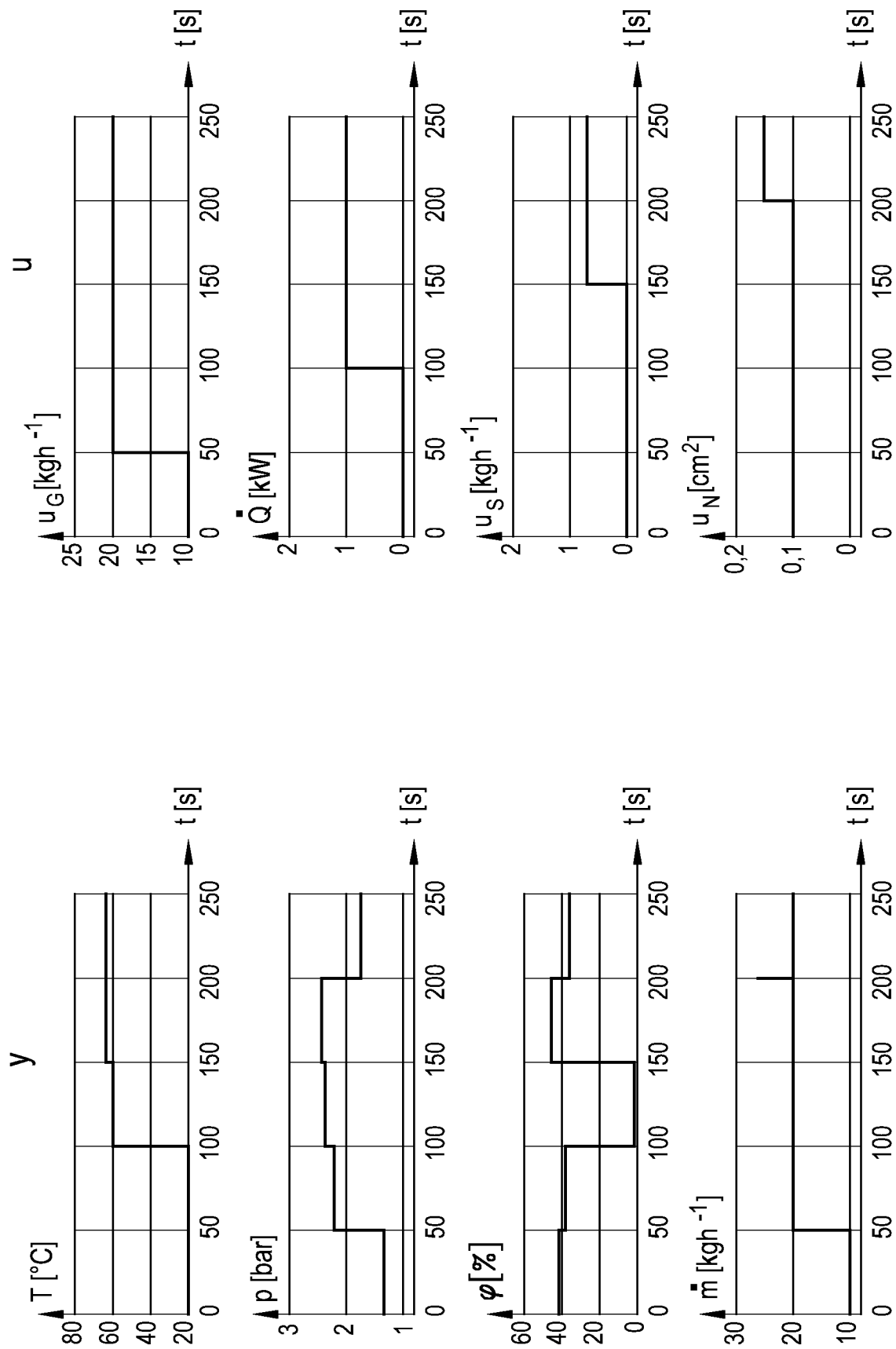


Fig. 2

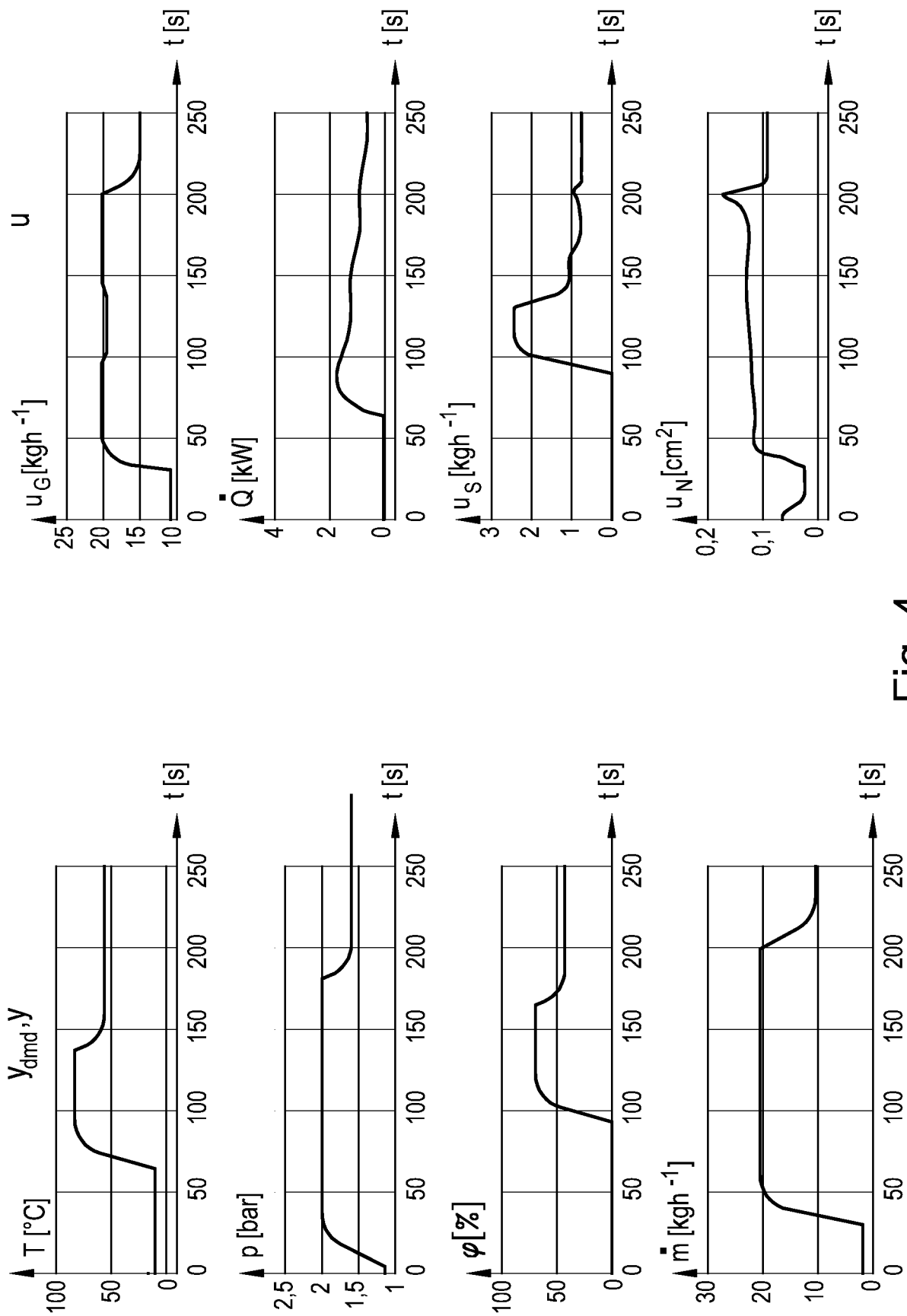


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2017/067999

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. H01M8/04089 H01M8/04992 H01M8/04701 H01M8/04746 H01M8/04828
F02D41/00

ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01M F02D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| A | DE 10 2004 002142 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 11 August 2005 (2005-08-11) paragraphs [0001], [0004] - [0006], [0017] - [0034] ----- | 1-7 |
| A | CÉDRIC DAMOUR ET AL: "A novel non-linear model-based control strategy to improve PEMFC water management - The flatness-based approach", INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY., vol. 40, no. 5, 1 February 2015 (2015-02-01), pages 2371-2376, XP055411260, GB ISSN: 0360-3199, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.052 the whole document ----- -/-- | 1-7 |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 September 2017

Date of mailing of the international search report

11/10/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Jacquinot, Patrick

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2017/067999

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| A | WOON KI NA ET AL: "Feedback-Linearization-Based Nonlinear Control for PEM Fuel Cells", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 23, no. 1, 1 March 2008 (2008-03-01), pages 179-190, XP011204387, ISSN: 0885-8969 the whole document ----- | 1-7 |
| A | US 2015/295258 A1 (KNIES DAVID [DE] ET AL) 15 October 2015 (2015-10-15) paragraphs [0017] - [0020] ----- | 1-7 |
| A | US 2010/230370 A1 (SCHNEIDER KLAUS [DE] ET AL) 16 September 2010 (2010-09-16) paragraphs [0132], [0179] ----- | 1-7 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/067999

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|---|---------------------|----------------------------|---------------------|
| DE 102004002142 A1 | 11-08-2005 | DE 102004002142 A1 | 11-08-2005 |
| | | EP 1709496 A1 | 11-10-2006 |
| | | WO 2005069090 A1 | 28-07-2005 |
| ----- | | | |
| US 2015295258 A1 | 15-10-2015 | DE 102012218636 A1 | 17-04-2014 |
| | | KR 20150068388 A | 19-06-2015 |
| | | US 2015295258 A1 | 15-10-2015 |
| | | WO 2014056811 A1 | 17-04-2014 |
| ----- | | | |
| US 2010230370 A1 | 16-09-2010 | CN 101585486 A | 25-11-2009 |
| | | DE 102008024513 A1 | 26-11-2009 |
| | | EP 2123588 A1 | 25-11-2009 |
| | | US 2010230370 A1 | 16-09-2010 |
| ----- | | | |

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. H01M8/04089 H01M8/04992 H01M8/04701 H01M8/04746 H01M8/04828
F02D41/00

ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

H01M F02D

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|------------|--|--------------------|
| A | DE 10 2004 002142 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 11. August 2005 (2005-08-11) Absätze [0001], [0004] - [0006], [0017] - [0034] | 1-7 |
| A | ----- CÉDRIC DAMOUR ET AL: "A novel non-linear model-based control strategy to improve PEMFC water management - The flatness-based approach", INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY., Bd. 40, Nr. 5, 1. Februar 2015 (2015-02-01), Seiten 2371-2376, XP055411260, GB ISSN: 0360-3199, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.052 das ganze Dokument ----- -/- | 1-7 |



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

29. September 2017

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

11/10/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Jacquinot, Patrick

| C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN | | |
|---|--|--------------------|
| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
| A | <p>WOON KI NA ET AL: "Feedback-Linearization-Based Nonlinear Control for PEM Fuel Cells", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 23, Nr. 1, 1. März 2008 (2008-03-01), Seiten 179-190, XP011204387, ISSN: 0885-8969 das ganze Dokument</p> <p>-----</p> | 1-7 |
| A | <p>US 2015/295258 A1 (KNIES DAVID [DE] ET AL) 15. Oktober 2015 (2015-10-15) Absätze [0017] - [0020]</p> <p>-----</p> | 1-7 |
| A | <p>US 2010/230370 A1 (SCHNEIDER KLAUS [DE] ET AL) 16. September 2010 (2010-09-16) Absätze [0132], [0179]</p> <p>-----</p> | 1-7 |

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/067999

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | Datum der Veröffentlichung |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| DE 102004002142 A1 | 11-08-2005 | DE 102004002142 A1 | 11-08-2005 |
| | | EP 1709496 A1 | 11-10-2006 |
| | | WO 2005069090 A1 | 28-07-2005 |
| ----- | | | |
| US 2015295258 A1 | 15-10-2015 | DE 102012218636 A1 | 17-04-2014 |
| | | KR 20150068388 A | 19-06-2015 |
| | | US 2015295258 A1 | 15-10-2015 |
| | | WO 2014056811 A1 | 17-04-2014 |
| ----- | | | |
| US 2010230370 A1 | 16-09-2010 | CN 101585486 A | 25-11-2009 |
| | | DE 102008024513 A1 | 26-11-2009 |
| | | EP 2123588 A1 | 25-11-2009 |
| | | US 2010230370 A1 | 16-09-2010 |
| ----- | | | |