

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50663/2016
 (22) Anmeldetag: 20.07.2016
 (43) Veröffentlicht am: 15.11.2017

(51) Int. Cl.: **H01M 8/04992** (2016.01)
H01M 8/04701 (2016.01)
H01M 8/04746 (2016.01)
H01M 8/04828 (2016.01)
H01M 8/1018 (2016.01)

(56) Entgegenhaltungen:
 NA, W.K. et al. Feedback-Linearization-Based Nonlinear Control for PEM Fuel Cells. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. März 2008, Vol. 23, Nr. 1, Seiten 179-189. doi:10.1109/TEC.2007.914160
 US 2016020476 A1
 WO 2006065366 A2

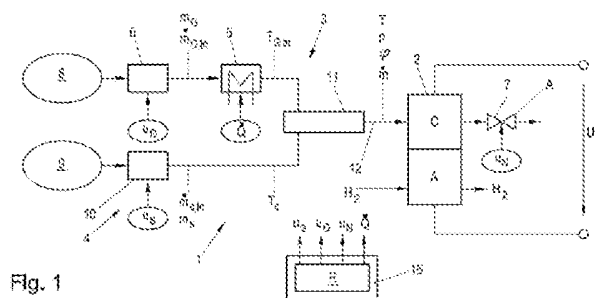
(71) Patentanmelder:
 AVL List GmbH
 8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
 Kügele Christoph Dipl.Ing.
 8020 Graz (AT)
 Jakubek Stefan Dr.
 1230 Wien (AT)
 Kancsár János
 1200 Wien (AT)

(74) Vertreter:
 Patentanwälte Pinter & Weiss OG
 Wien

(54) **Geregelte Gaskonditionierung für ein Reaktionsgas einer Brennstoffzelle**

(57) 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, \dot{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, \dot{Q}) zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung einstellen.



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, \dot{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, \dot{Q}) zu jedem Abtastzeitpunkt der Regelung einstellen.

Fig.1

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.
10 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,
20 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.
30

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 daraus entstehende lineare, nicht gekoppelte Mehrgrößensystem kann dann mit herkömmlicher
30 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 Wasserdampfgenerator 9, einen Massenflussregler 10 für den Wasserdampf und eine Mischkammer 11.
 20 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 über den regelbaren Öffnungsquerschnitt den Druck p des Reaktionsgases einstellt. Das Gegendruckventil 7 ist in der Gaskonditioniereinheit 3 stromabwärts der Brennstoffzelle 2
 30 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 ,
 5 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, Massenflussregel-
 10 einrichtung 6, Temperiereinrichtung 5 und Druckregleinrichtung 7 denkbar.

Um die Einflussgrößen regeln zu können, sind die Befeuchtungseinrichtung 4, Massenfluss-
 regleinrichtung 6, Temperiereinrichtung 5 und Druckregleinrichtung 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
 15 Befeuchtungseinrichtung 4 über den Massenflussregler 10 für den Wasserdampf mit der
 Stellgröße u_S , die Massenflussregleinrichtung 6 mit der Stellgröße u_G , die Temperiereinrich-
 tung 5 mit der Stellgröße \dot{Q} und die Druckregleinrichtung 7 mit der Stellgröße u_N geregelt.
 Mit der Stellgröße wird der jeweilige Aktuator angesteuert, um eine Veränderung der Ein-
 flussgröße hervorzurufen.

20 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 Einflussgrö-
 ßen berücksichtigt werden. Dazu werden zuerst die Systemgleichungen für den Aufbau nach
 Fig.1 aufgestellt.

25 Aus der Massenbilanz in der Mischkammer 11 ergibt sich

$$\frac{d}{dt} m_G = \dot{m}_{G,in} - \dot{m}_{G,out}$$

$$\frac{d}{dt} m_S = \dot{m}_{S,in} - \dot{m}_{S,out}$$

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 Was-
 serdampfes $\dot{m}_{S,in}$ 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) 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 das alles in die Energiebilanz ein und berücksichtigt man die Massenbilanz erhält man die folgende Systemgleichung, die die Temperaturdynamik der Gaskonditioniereinheit 3 beschreibt.

$$\frac{d}{dt} T = \frac{1}{m_G c_{vG} + m_S c_{vS}} \cdot \left(\dot{m}_{G,in} c_{pG} T_{G,in} + \dot{m}_{S,in} (c_{pS} T_{S,in} + r_0) - \frac{1}{m} \dot{m} (m_G c_{pG} T + m_S (c_{pS} T + r_0)) - \frac{d}{dt} m_G c_{vG} T - \frac{d}{dt} m_S (c_{vS} T + r_0) \right)$$

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.

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

$$5 \quad \psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}, \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

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.

- 15 Zusätzlich wird noch die Dynamik der Aktuatoren in Abhängigkeit von den Stellgrößen u_S , u_G , \dot{Q} und u_N in Form von Verzögerungsglieder 1.Ordnung mit den Zeitkonstanten τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , modelliert:

$$\frac{d}{dt} \dot{m}_{G,in} = \frac{1}{\tau_1} (u_G - \dot{m}_{G,in})$$

$$\frac{d}{dt} T_{G,in} = \frac{1}{\tau_2} \frac{1}{c_{pG} \dot{m}_{G,in}} \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{G,in}} - c_{pG} (T_{G,in} - T_{G,0}) \right)$$

$$\frac{d}{dt} \dot{m}_{S,in} = \frac{1}{\tau_3} (u_S - \dot{m}_{S,in})$$

$$\frac{d}{dt} \dot{A} = \frac{1}{\tau_4} (u_N - (A - A_0))$$

Darin sind $T_{G,0}$ und 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

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

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

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

$$\begin{aligned} \dot{y}_j &= \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i = \\ &= L_f h_j(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m L_{g_i} h_j(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i \end{aligned}$$

- 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 $\mathbf{g}_i(\mathbf{x})$ 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.

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

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

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

mit der Entkoppelungsmatrix $J(\mathbf{x})$. 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

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

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

$$\dot{\mathbf{z}} = A_c \mathbf{z} + B_c \mathbf{v}$$

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

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

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.

- 15 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.

- 20 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:

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

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

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

- 25 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

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 unempfindlich 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 , ρ , 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 Massenflussregleinrichtung 6 $u_G=[4 - 40 \text{ kgh}^{-1}]$, Stellbereich der Druckregleinrichtung 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 $\varphi=[0 - 100\%]$ 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.

20 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 Massenflussregelung (6) zum Regeln des Massenflusses (\dot{m}) des Reaktionsgases und einer Druckregelung (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 jeden 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 $\dot{\mathbf{z}} = A_c \mathbf{z} + B_c \mathbf{v}$ abgeleitet werden kann, mit definiten Matrizen A_c und B_c und einem neuen Zustandsvektor $\mathbf{z}^T = (h_1(x) \quad L_f h_1(x) \quad \dots \quad L_f^{\delta_1-1} h_1(x) \quad h_2(x) \quad L_f h_2(x) \quad \dots \quad L_f^{\delta_2-1} h_2(x) \quad \dots \quad L_f^{\delta_m-1} h_m(x))^T$.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Regler (R) für das lineare, nicht gekoppelte Zustandsraummodell der Form $\dot{\mathbf{z}} = A_c \mathbf{z} + B_c \mathbf{v}$ 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 (\mathbf{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 (\mathbf{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}) gemäß $e_{j,0} = \int_0^t e_j(\tau) d\tau$, $e_{j,1} = e_j$, $e_{j,2} = \dot{e}_j$, ..., $e_{j,\delta_j} = e_j^{(\delta_j-1)}$ definiert werden, woraus sich $\dot{\mathbf{e}}(t) = (A_c - B_c K) \mathbf{e}(t)$ 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 ($y_{i,\text{dmd}}$) vorab berechnet werden.

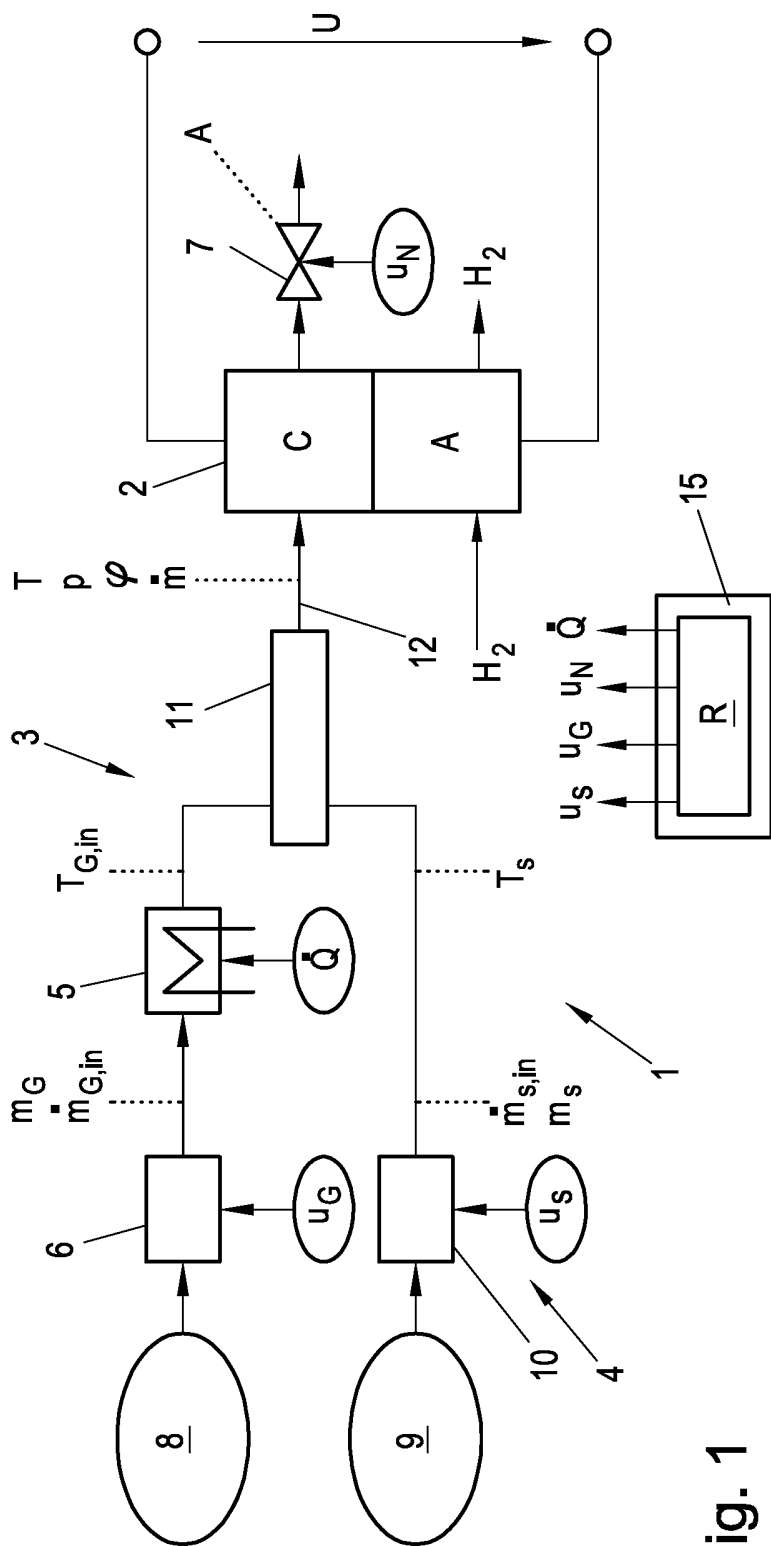


Fig. 1

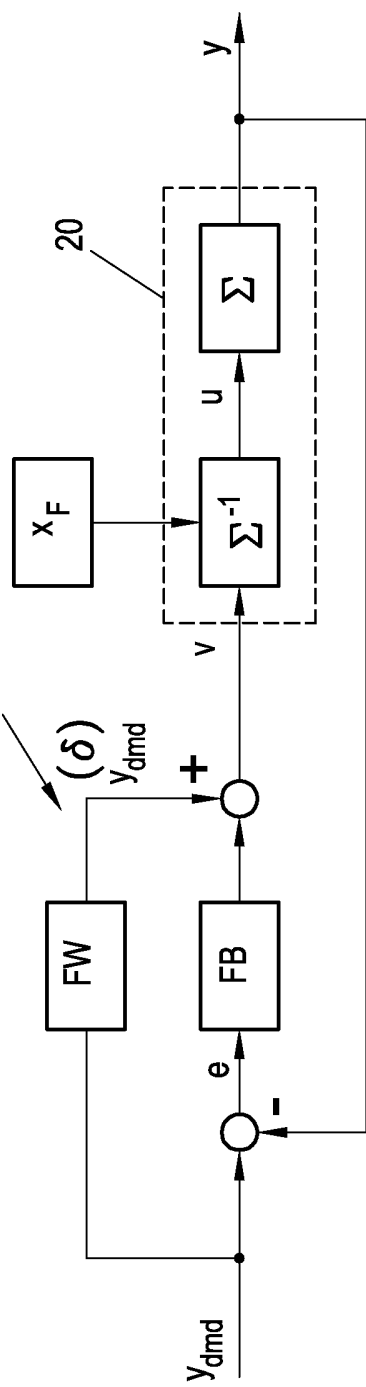


Fig. 3

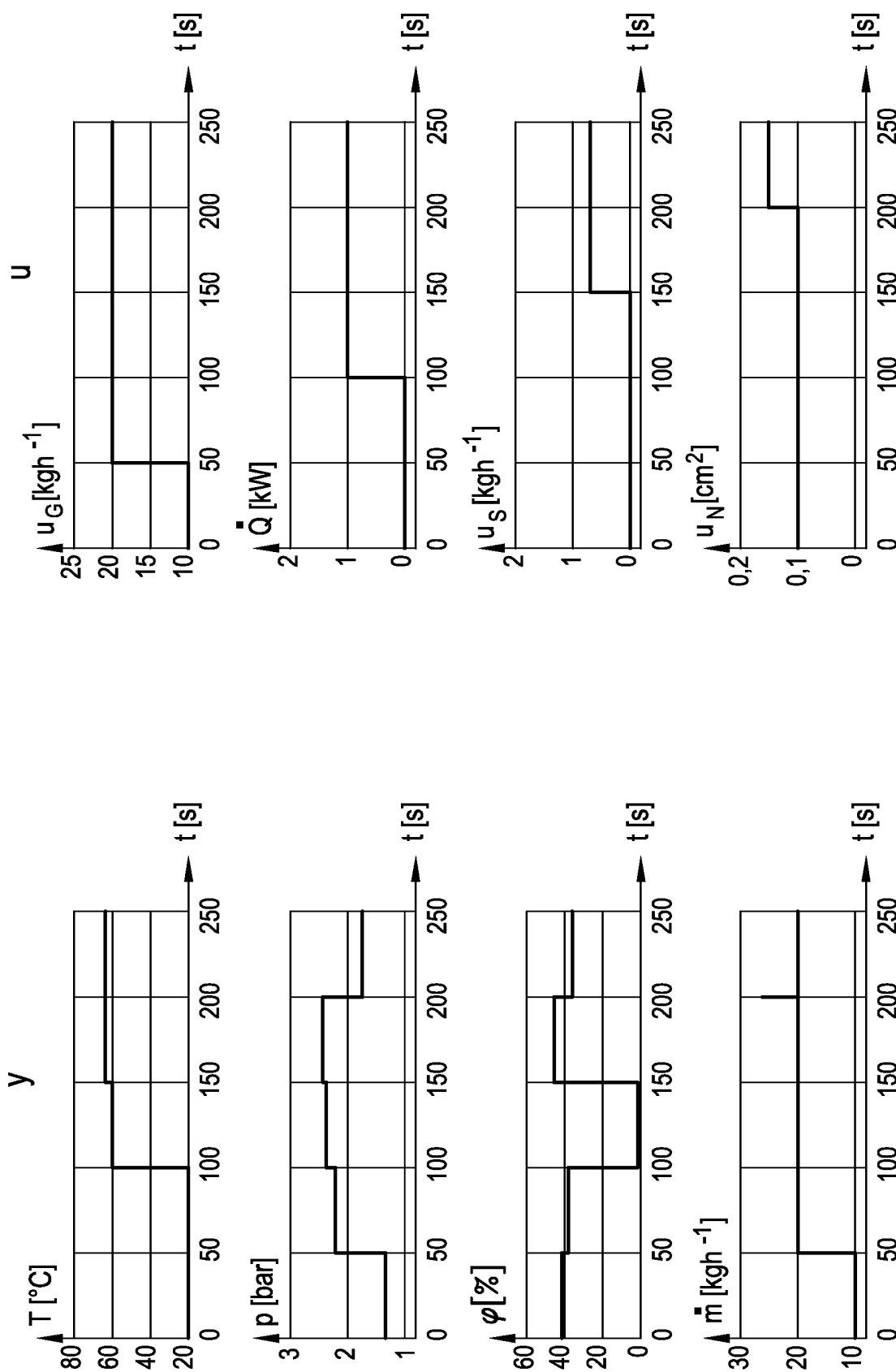


Fig. 2

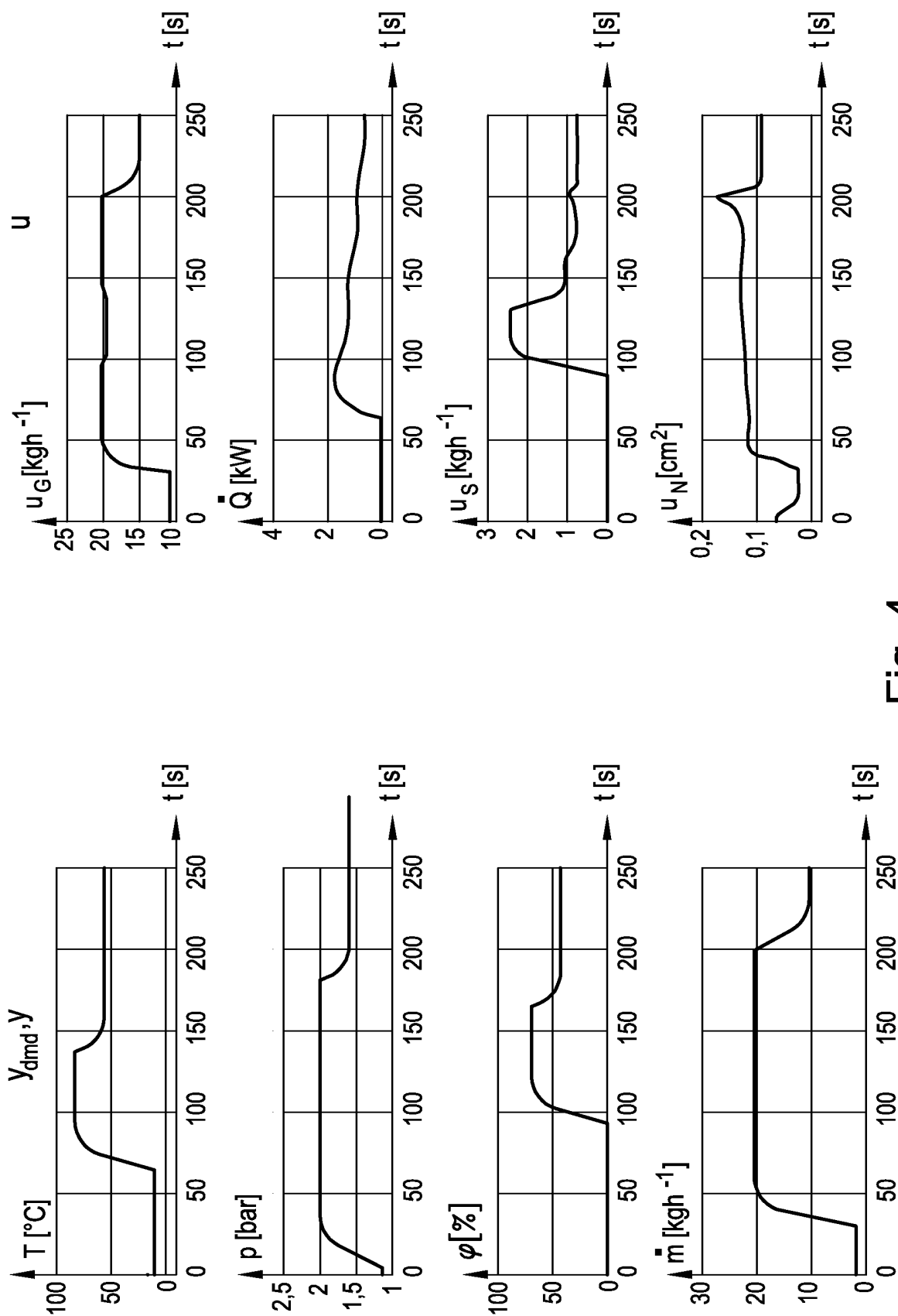


Fig. 4