

(19)

(10) **AT 520522 B1 2019-05-15**

(12)

## Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 51007/2017  
 (22) Anmeldetag: 05.12.2017  
 (45) Veröffentlicht am: 15.05.2019

(51) Int. Cl.: **H01M 8/04992** (2016.01)  
**H01M 8/04089** (2016.01)  
**H01M 8/04828** (2016.01)  
**H01M 8/04746** (2016.01)  
**H01M 8/04701** (2016.01)  
**H01M 8/1018** (2016.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
 AT 518518 B1  
 DE 102008043869 A1  
 DE 102013001413 A1

(73) Patentinhaber:  
 AVL List GmbH  
 8020 Graz (AT)

(74) Vertreter:  
 Patentanwälte Pinter & Weiss OG  
 1040 Wien (AT)

(54) **Regelung einer Regelgröße einer Konditioniereinheit eines Reaktanden einer Brennstoffzelle mit Ermittlung eines Istwertes der Regelgröße**

(57) Um zumindest einen Istwert einer Regelgröße eines Reaktanden einer Brennstoffzelle für eine Regelung mit möglichst geringem Messfehler zu ermitteln, ist vorgesehen, dass mit einem Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) ein Modellwert der Regelgröße ( $\hat{R}G_n$ ) berechnet wird, mit einem Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) für den Messsensor ( $S_n$ ) ein Modellwert des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}G_{nm}$ ) berechnet wird, aus dem mit dem Messsensor ( $S_n$ ) gemessenen Istwert der Regelgröße ( $RG_{nist}$ ) und dem mit dem Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) berechneten Modellwert des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}G_{nm}$ ) ein Korrekturwert ( $RG_{corr}$ ) für die Regelgröße ( $RG_n$ ) berechnet wird und der Istwert der zumindest einen Regelgröße ( $\hat{R}G_{nist}$ ) als Summe aus dem Korrekturwert ( $RG_{corr}$ ) und dem mit dem Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) berechneten Modellwert der Regelgröße ( $\hat{R}G_n$ ) berechnet wird, wobei dieser Istwert der Regelgröße ( $\hat{R}G_{nist}$ ) auch im Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) zur Berechnung des Modellwerts des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}G_{nm}$ ) verwendet wird.

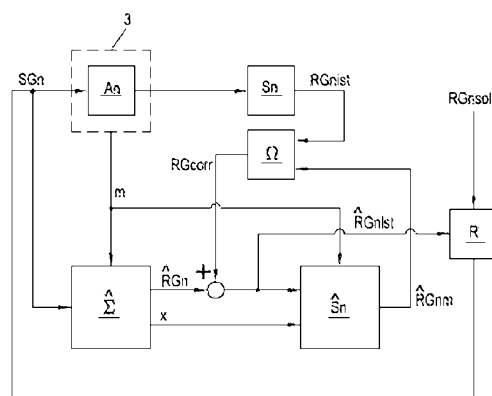


Fig. 3

## Beschreibung

### REGELUNG EINER REGELGRÖÖE EINER KONDITIONIEREINHEIT EINES REAKTANDEN EINER BRENNSTOFFZELLE MIT ERMITTLUNG EINES ISTWERTES DER REGELGRÖÖE

**[0001]** Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln des Istwertes zumindest einer Regelgröße einer Konditioniereinheit für einen Reaktanden einer Brennstoffzelle, wobei ein Messwert des Istwertes der Regelgröße mit einem Messsensor gemessen wird, sowie eine Anordnung zum Regeln einer Regelgröße eines Reaktanden einer Brennstoffzelle in einer Konditioniereinheit für einen Reaktanden, wobei ein Messsensor vorgesehen ist, um einen Messwert des Istwertes der Regelgröße zu messen, und eine Regelungseinheit vorgesehen ist, in der ein Regler implementiert ist, der eine Abweichung zwischen einem Sollwert der Regelgröße und dem Istwert der Regelgröße ausregelt, sowie eine entsprechende Regelung einer Regelgröße einer Konditioniereinheit eines Reaktanden einer Brennstoffzelle.

**[0002]** Für den ordnungsgemäßen und effizienten Betrieb einer Brennstoffzelle ist die Konditionierung der zugeführten Gase (Reaktanden), insbesondere hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit, Druck und Massenfluss, von entscheidender Bedeutung. Eine fehlerhafte Konditionierung der Reaktanden kann zu einem Leistungsverlust, oder im schlimmsten Fall zur Beschädigung und Zerstörung der Brennstoffzelle bzw. des Brennstoffzellen-Stacks führen. Insbesondere die relative Feuchtigkeit des zugeführten Reaktanden, wie beispielsweise des Sauerstoffes, auch in Form der zugeführten Luft, ist hierbei bei vielen Brennstoffzellentypen, wie beispielsweise bei einer Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC), ein wichtiger Parameter, der genau geregelt werden muss.

**[0003]** Um die Möglichkeiten einer Brennstoffzelle voll ausschöpfen zu können, ist folglich eine genaue Regelung der Konditionierung der Reaktanden erforderlich. Das ist insbesondere bei einem transienten und hochdynamischen Betrieb der Brennstoffzelle mit hohem Aufwand verbunden. Unter (hoch)dynamischem oder transientem Betrieb wird dabei insbesondere eine schnelle Änderung der Ausgangsgrößen der Brennstoffzelle (elektrische Spannung, elektrischer Strom) verstanden. Vor allem bei der Entwicklung einer Brennstoffzelle auf einem Prüfstand, wo man die Brennstoffzelle in der Regel dynamischen Prüfläufen (im Sinne der Änderungsrate der Ausgangsgrößen, aber auch der Last der Brennstoffzelle) unterwerfen möchte, um das Verhalten der Brennstoffzelle zu prüfen oder zu verbessern, ist dies ein Problem. Aber auch im Realbetrieb der Brennstoffzelle, beispielsweise in einem Kraftfahrzeug, muss die Konditionierung einen transienten und hochdynamischen Betrieb der Brennstoffzelle der Reaktanden ermöglichen. Als dynamisch werden insbesondere so rasche Änderungen verstanden, dass das dynamische System keinen eingeschwungenen Zustand erreicht, sondern das transiente Verhalten zwischen den Änderungen abgebildet wird.

**[0004]** Für eine genaue Regelung der Konditionierung der Reaktanden ist es erforderlich, Istgrößen der geregelten Größen messtechnisch zu erfassen und der Regelung zur Verfügung zu stellen. Damit muss auch die Messinfrastruktur (Messsensoren, Messwertaufbereitung, Messwertauswertung, usw.) in der Lage sein, die Istgrößen im transienten, hochdynamischen Betrieb, in dem sich die Messgrößen zeitlich sehr schnell und auch sehr stark ändern können, zu erfassen. Die Anforderungen an die Messinfrastruktur sind demnach ebenfalls hoch. Das wird noch dadurch erschwert, dass die Messsensoren, die zur Erfassung der Messwerte dienen, häufig von den sich ändernden physikalischen Bedingungen (z.B. Temperatur, Druck, Massenstrom, Feuchtigkeit) selbst beeinflusst werden. Eine Kalibrierung der Messsensoren ist daher nur eingeschränkt möglich, oder sehr aufwendig. Dazu kommen noch nicht vermeidbare Totzeiten in der Messwerterfassung, d.h. dass ein Messwert nicht unmittelbar, sondern erst nach einer gewissen Zeit verfügbar ist. All das führt zu einer Verfälschung der erzielten Messergebnisse, weshalb die erzielten Messergebnisse, vor allem im transienten, hochdynamischen Betrieb, nicht mit ausreichender Genauigkeit den tatsächlich auftretenden physikalischen Messgrößen entsprechen. Das verschlechtert die Regelbarkeit der Konditionierung der Reaktanden der Brennstoffzelle. Dabei wurde festgestellt, dass insbesondere die Messung der relativen

Feuchtigkeit von dieser Problematik betroffen ist. Auch die ungenaue Messung der Istgrößen kann insbesondere im transienten, hochdynamischen Betrieb der Brennstoffzelle zum Leistungsverlust oder zur Schädigung oder gar Zerstörung der Brennstoffzelle führen.

**[0005]** Es ist folglich eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung anzugeben, um zumindest einen Istwert einer Regelgröße eines Reaktanden einer Brennstoffzelle mit möglichst geringem Messfehler zu ermitteln, um den Istwert in einer Regelung der Regelgröße verwenden zu können.

**[0006]** Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, indem mit einem Modell der Konditioniereinheit ein Modellwert der Regelgröße berechnet wird, mit einem Sensormodell für den Messsensor ein Modellwert des Istwertes der Regelgröße berechnet wird, aus dem mit dem Messsensor gemessenen Istwert der Regelgröße und dem mit dem Sensormodell berechneten Modellwert des Istwertes der Regelgröße ein Korrekturwert für die Regelgröße berechnet wird und der Istwert der zumindest einen Regelgröße als Summe aus dem Korrekturwert und dem mit dem Modell der Konditioniereinheit berechneten Modellwert der Regelgröße berechnet wird, wobei dieser Istwert der Regelgröße auch im Sensormodell zur Berechnung des Modellwerts des Istwertes der Regelgröße verwendet wird.

**[0007]** Durch dieses Vorgehen kann bei der Ermittlung des Istwertes der Regelgröße die Abhängigkeit des Messensors von Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Druck, Feuchtigkeit, Massenstrom, Temperatur, und damit auch der Sensorfehler im transienten Verhalten abgebildet werden. Die Sensorfehler können dadurch korrigiert werden und die Qualität des Istwertes für die Regelung erhöht werden. Der größte Vorteil besteht darin, dass der reale Istwert der Messgröße geschätzt wird und damit der stationäre und dynamische Sensorfehler korrigiert werden kann. Das ist vor allem im dynamischen Betrieb (Konditioniereinheit (inkl. Messsensor) ist nicht im eingeschwungenen Zustand) vorteilhaft, da bis dato nicht möglich.

**[0008]** Im stationären Fall reduziert sich die Korrektur des Sensorfehlers auf einen Nullpunktgleich und eine Kalibrierung.

**[0009]** Der derart ermittelte modellierte Istwert der Regelgröße kann dann in einer Regelung der Regelgröße in einer Konditioniereinheit eines Reaktanden einer Brennstoffzelle verwendet werden.

**[0010]** Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 3 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

**[0011]** Fig.1 eine Konditioniereinheit für einen Reaktanden einer Brennstoffzelle,

**[0012]** Fig.2 eine Regelung einer Regelgröße des Reaktanden und

**[0013]** Fig.3 die Ermittlung eines modellierten Istwertes der Regelgröße des Reaktanden für dessen Regelung.

**[0014]** Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig.1 ohne Beschränkung der Allgemeinheit am Beispiel eines Prüfstands 1 für eine Protonenaustauschmembran Brennstoffzelle (PEMFC) 2 erläutert. Selbstverständlich könnte die Brennstoffzelle 2 auch als elektrische Versorgung in einer Maschine oder Anlage eingesetzt werden oder auch von einem anderen Typ sein. Die Konditionierung 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. Am Prüfstand 1 wird häufig auch nur ein Brennstoffzellenstack angeordnet, was im Sinne der Erfindung ebenfalls als Brennstoffzelle 2 verstanden wird.

**[0015]** Die PEMFC 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 als ersten Reaktanden ein erstes Reaktionsgas, beispielsweise Sauerstoff, auch in Form von Luft, zugeführt wird und eine Anode A, der als zweiter Reaktand 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 die Funktion einer Brennstoffzelle 2 sind hinlänglich bekannt, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden muss.

**[0016]** Zumindest ein Reaktand, in der Regel der Sauerstoff führende Reaktand, insbesondere Luft, wird in einer Konditioniereinheit 3 konditioniert. In der Konditioniereinheit 3 wird eine Anzahl  $n \geq 1$  von Regelgrößen  $R_{Gn}$  der Konditionierung, beispielsweise der Druck  $p$ , die relative Feuchtigkeit  $\varphi$ , die Temperatur  $T$  und der Massenfluss  $\dot{m}$  des konditionierten Reaktionsgases, eingestellt - in Fig.1 sind diese vier beispielhaften Regelgrößen  $R_{Gn}$  am Eingang der Kathode C angedeutet. In gleicher Weise könnte natürlich auch der Reaktand auf der Anodenseite konditioniert werden. „Konditionieren“ bedeutet dabei, dass der Wert der zumindest einen Regelgröße  $R_{Gn}$  auf einen vorgegebenen Sollwert der Regelgröße  $R_{Gnsoll}$  geregelt wird, indem ein Regler  $R$  in jedem Zeitschritt der Regelung für zumindest einen Aktuator  $A_n$  für die damit zu regelnde Regelgröße  $R_{Gn}$  eine Stellgröße  $S_{Gn}$  berechnet, die am Aktuator  $A_n$  eingestellt wird.

**[0017]** Zur Regelung einer Regelgröße  $R_{Gn}$  ist in der Konditioniereinheit 3 folglich ein entsprechender Aktuator  $A_n$  vorgesehen. Beispielsweise sind als Aktuatoren  $A_n$  eine Befeuchtungseinrichtung 4 zum Befeuchten des Reaktanden zur Einstellung einer relativen Feuchtigkeit  $\varphi$  des Reaktanden, eine Temperiereinrichtung 5 zum Temperieren des Reaktanden zur Einstellung einer Temperatur  $T$  des Reaktanden, eine Massenflussregeleinrichtung 6 zum Regeln des Massenflusses  $\dot{m}$  des Reaktanden und eine Druckregeleinrichtung 7 zum Regeln des Druckes  $p$  des Reaktanden vorgesehen.

**[0018]** Selbstverständlich ist auch eine Quelle 8 für den zumindest einen Reaktanden vorgesehen, die mit der Konditioniereinheit 3 verbunden ist oder ebenfalls in der Konditioniereinheit 3 angeordnet ist. Die Quelle 8 ist beispielsweise ein Druckspeicher mit komprimierten, trockenen Reaktanden, beispielsweise Luft. Alternativ kann als Gasquelle 8 bei Verwendung von Luft auch Umgebungsluft aufbereitet, beispielsweise gefiltert, komprimiert, getrocknet, usw. werden.

**[0019]** 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.

**[0020]** Die Befeuchtungseinrichtung 4 umfasst in diesem Ausführungsbeispiel einen Wasserdampfgenerator 9, einen Massenflussregler 10 für den Wasserdampf und eine Mischkammer 11. Als Massenflussregler 10 für den Wasserdampf, und auch als Massenflussregeleinrichtung 6 für den Reaktanden, können herkömmliche, geeignete, kommerziell erhältliche, regelbare Massenflussregler eingesetzt werden. In der Mischkammer 11 wird der Wasserdampf mit dem von der Quelle 8 stammenden Gas zum konditionierten Reaktanden für die Brennstoffzelle 2 gemischt.

**[0021]** Selbstverständlich sind auch andere Ausführungen einer Befeuchtungseinrichtung 4 denkbar. Beispielsweise könnte Wasser dem Gas aus der Quelle 8 zugeführt, z.B. eingespritzt, werden.

**[0022]** Als Druckregeleinrichtung 7 wird in diesem Beispiel ein Gegendruckventil auf der Abgasseite, also nach der Brennstoffzelle 2, verwendet, das über den regelbaren Öffnungsquerschnitt den Druck  $p$  des Reaktanden 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.

**[0023]** Nach der Mischkammer 11 liegt der Reaktand in einer Reaktandenleitung 12, die mit der Brennstoffzelle 2, bzw. mit der Kathode C oder Anode A der Brennstoffzelle 2, verbunden ist daher mit den gewünschten Regelgrößen  $R_{Gn}$ , beispielsweise einer bestimmten Temperatur  $T$ , einer bestimmten relativen Feuchtigkeit  $\varphi$ , einem bestimmten Druck  $p$  und/oder einem bestimmten Massenfluss  $\dot{m}$ , vor.

**[0024]** Dieser anhand der Fig.1 beschriebene Aufbau einer Konditioniereinheit 3 ist allerdings nur beispielhaft und es sind natürlich andere Aufbauten der Konditioniereinheit 3, und auch andere konkrete Ausführungen der Aktuatoren An, hier der Befeuchtungseinrichtung 4, Massenflussregeleinrichtung 6, Temperiereinrichtung 5 und Druckregeleinrichtung 7, möglich und denkbar. Insbesondere können auch weniger oder mehr oder andere Regelgrößen RGn des Reaktanden in der Konditioniereinheit 3 geregelt werden, womit auch weniger oder mehr oder andere Aktuatoren An vorgesehen sein können.

**[0025]** Um die zumindest eine Regelgröße RGn regeln zu können, ist der zugehörige Aktuator An, beispielsweise die Befeuchtungseinrichtung 4, Massenflussregeleinrichtung 6, Temperiereinrichtung 5 und Druckregeleinrichtung 7 wie in Fig.1 dargestellt, über eine jeweilige Stellgröße SGn regelbar. Die Stellgrößen SGn werden dabei von einer Regelungseinheit 15, in der ein Regler R implementiert ist, berechnet, sodass der Istwert der Regelgröße RGn dem vorgegebenen Sollwert RGnsoll folgt. Im in Fig.1 gezeigten Ausführungsbeispiel wird die Befeuchtungseinrichtung 4 über den Massenflussregler 10 für den Wasserdampf mit der Stellgröße  $u_S$ , die Massenflussregeleinrichtung 6 mit der Stellgröße  $u_G$ , die Temperiereinrichtung 5 mit der Stellgröße  $\dot{Q}$  und die Druckregeleinrichtung 7 mit der Stellgröße  $u_N$  geregelt. Mit der Stellgröße SGn wird der jeweilige Aktuator An angesteuert und am Aktuator An eingestellt, um die gewünschte Veränderung der Regelgröße RGn hervorzurufen.

**[0026]** Für die Regelung der Regelgröße RGn wird auch ein Istwert der Regelgröße RGn benötigt, um die Abweichung zwischen dem Istwert der Regelgröße RGn und dem Sollwert der Regelgröße RGnsoll durch den Regler R auszuregulieren. Beispielsweise wird die Differenz zwischen dem Sollwert der Regelgröße RGnsoll und dem Istwert der Regelgröße RGn dem Regler R zugeführt, der daraus nach dem implementierten Regelgesetz eine Stellgröße SGn berechnet, die mit dem zugehörigen Aktuator An in der Konditioniereinheit 3 eingestellt wird, wie in Fig.2 dargestellt. Der Istwert der Regelgröße RGn wird dabei mit einem Messsensor Sn, der natürlich an einer geeigneten Stelle der Konditioniereinheit 3, beispielsweise in der Reaktionsgasleitung 12, angeordnet ist, gemessen. Der Messsensor Sn muss dabei die Regelgröße RGn nicht direkt messen, sondern kann auch einen für die Regelgröße RGn repräsentativen Messwert messen. Diese Messung unterliegt oftmals den eingangs angeführten Beschränkungen. Um die Qualität der Messung des Istwertes der Regelgröße RGn zu verbessern, wird daher erfindungsgemäß nicht direkt der mit dem Messsensor Sn erfasste Messwert für die Regelung herangezogen, sondern ein korrigierter Messwert, wie nachfolgend mit Bezugnahme auf die Fig.3 erläutert wird.

**[0027]** Aus einem geeigneten Modell  $\hat{\Sigma}$  der Konditioniereinheit 3, dem die Stellgröße SGn zugeführt wird, wird die neue Regelgröße  $\hat{R}Gn$  als Reaktion auf die Stellgröße SGn berechnet. Dem Modell  $\hat{\Sigma}$  können dabei auch noch andere Stellgrößen der Konditioniereinheit 3 zugeführt werden, wenn in der Konditioniereinheit 3 weitere Aktuatoren An enthalten sind und das Modell  $\hat{\Sigma}$  das erfordert. Ebenso können dem Modell  $\hat{\Sigma}$  auch erforderliche Messwerte m der Konditioniereinheit 3 zugeführt werden. Ein geeignetes Sensormodell  $\hat{S}n$  berechnet aus einer Regelgröße RGn einen Modellwert  $\hat{R}Gnm$  für den Messwert der Regelgröße RGn. Dazu können dem Sensormodell  $\hat{S}n$  erforderlichenfalls auch Zustandsgrößen x der Konditioniereinheit 3, die ebenfalls im Modell  $\hat{\Sigma}$  berechnet werden können, zur Verfügung gestellt werden. Der mit dem Messsensor Sn erfasste Istwert der Regelgröße RGn und der mit dem Sensormodell  $\hat{S}n$  berechnete Modellwert  $\hat{R}Gnm$  werden einer Korrekturereinheit  $\Omega$  zugeführt, in der ein Korrekturwert RGcorr der Regelgröße RG berechnet wird. Die Summe des vorzeichenrichtigen Korrekturwertes RGcorr und der im Modell  $\hat{\Sigma}$  der Konditioniereinheit 3 berechneten Regelgröße  $\hat{R}Gn$  wird als modellierter Istwert der Regelgröße  $\hat{R}Gnist$  für die Regelung herangezogen. Der modellierte Istwert der Regelgröße  $\hat{R}Gnist$  wird auch dem Sensormodell  $\hat{S}n$  zugeführt, um daraus den Modellwert  $\hat{R}Gnm$  der Regelgröße RGn zu berechnen.

**[0028]** Das Modell  $\hat{\Sigma}$  der Konditioniereinheit 3, das Sensormodell  $\hat{S}n$  und die Korrekturereinheit  $\Omega$  können beispielsweise als geeignete Software in der Regelungseinheit 15 implementiert sein, können aber natürlich jeweils auch einzeln oder gemeinsam als geeignete Hardware und/oder

Software implementiert sein.

**[0029]** Diese Vorgehensweise der Erfassung des Istwertes der Regelgröße  $R_{Gn}$  ist für die Regelung insbesondere für die relative Feuchtigkeit  $\phi$  des konditionierten Reaktanden geeignet, kann aber auch für andere Regelgrößen  $R_{Gn}$  wie den Druck  $p$ , die Temperatur  $T$  oder den Massenfluss  $\dot{m}$  herangezogen werden.

**[0030]** Die Konditioniereinheit 3 nach Fig.1 könnte beispielsweise durch das nachfolgend beschriebene mathematisch, physikalische Modell  $\hat{\Sigma}$  modelliert werden, wobei selbstverständlich auch andere Modelle, auch trainierte Modelle, verwendet werden können.

**[0031]** Ein beispielhaftes Modell  $\hat{\Sigma}$  für die Konditioniereinheit 3 wird im Folgenden gegeben:

**[0032]** 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 Konditioniereinheit 3 und den Massen  $m_G$  des Gases und  $m_S$  des Wasserdampfes und dem Massenfluss des Reaktanden  $\dot{m}$ . Dabei muss natürlich gelten  $m = m_G + m_S$ .

**[0033]** Aus der Energiebilanz der Konditioniereinheit 3 folgt

$$\begin{aligned}\frac{dU}{dt} &= \dot{m}_{G,in} \cdot h_{G,in} + \dot{m}_{S,in} \cdot h_{S,in} - \dot{m} \cdot h \\ \frac{dU}{dt} &= \frac{d}{dt}(m_G u_{iG} + m_S u_{iS})\end{aligned}$$

**[0034]** 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 Reaktanden (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 Konditioniereinheit 3 beschreibt.

$$\begin{aligned}\text{[0035] } \frac{d}{dt}T &= \frac{1}{m_G c_{vG} + m_S c_{vS}} \\ &\cdot (\dot{m}_{G,in} c_{pG} T_{G,in} + \dot{m}_{S,in} (c_{pS} T_{S,in} + r_0) - \\ &- \frac{1}{m} \dot{m} (m_G c_{pG} T + m_S (c_{pS} T + r_0)) - \\ &- \frac{d}{dt} m_G c_{vG} T - \frac{d}{dt} m_S (c_{vS} T + r_0))\end{aligned}$$

**[0036]** 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 den Reaktanden (ohne Index). Das Volumen  $V$  bezeichnet dabei vorzugsweise nicht nur das Volu-

men der Mischkammer 11, sondern auch die Volumina der Verrohrung in der Konditioniereinheit 3. Der Druck  $p$  und der Massenfluss  $\dot{m}$  des Reaktanden werden auch maßgeblich vom Gegendruckventil 7 beeinflusst, das wie folgt modelliert werden kann.

$$[0037] \dot{m} = A \cdot p \sqrt{\frac{2}{RT}} \cdot \psi$$

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

[0038] Darin bezeichnet  $A$  den Öffnungsquerschnitt des Gegendruckventils 7 und  $p_0$  den Umgebungsdruck.

[0039] Die relative Feuchtigkeit  $\varphi$  wird durch

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

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.

[0040] Zusätzlich kann noch die Dynamik der Aktuatoren  $A_n$  in Abhängigkeit von den Stellgrößen  $u_S$ ,  $u_G$ ,  $\dot{Q}$  und  $u_N$  in Form von Verzögerungsgliedern 1. Ordnung mit den Zeitkonstanten  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  modelliert werden:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \dot{m}_{G,in} &= \frac{1}{\tau_1} (u_G - \dot{m}_{G,in}) \\ \frac{d}{dt} T_{G,in} &= \frac{1}{\tau_2} \frac{1}{c_{pG} \dot{m}_{G,in}} \left( \dot{Q} - c_{pG} (T_{G,in} - T_{G,0}) \right) \\ \frac{d}{dt} \dot{m}_{S,in} &= \frac{1}{\tau_3} (u_S - \dot{m}_{S,in}) \\ \frac{d}{dt} A &= \frac{1}{\tau_4} (u_N - (A - A_0)) \end{aligned}$$

[0041] Darin sind  $T_{G,0}$  und  $A_0$  vorgegebene Offsetgrößen.

[0042] Aus den obigen Systemgleichungen erkennt man, dass ein nichtlineares Mehrgrößen-system (MIMO, multiple input multiple output) System der Form

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^n g_i(x) SG_i$$

$$RG = h(x)$$

vorliegt, mit den sich aus der obigen Modellierung ergebenden Systemfunktionen  $f(x)$ ,  $g(x)$ ,  $h(x)$ , dem Zustandsvektor  $x$ , einem Stellgrößenvektor  $SG$  mit den Stellgrößen  $SG_n$  und einem Regelgrößenvektor  $RG$  mit den Regelgrößen  $RG_n$  wie folgt:

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

[0043] In Fig.1 ist zum besseren Verständnis angedeutet, wo diese Größen in der Konditioniereinheit 3 jeweils auftreten.

**[0044]** Die Korrekturereinheit  $\Omega$  berechnet den Korrekturwert  $R_{Gcorr}$  aus der Abweichung zwischen dem mit dem Messsensor  $S_n$  gemessenen Istwert der Regelgröße  $R_{Gn}$  und dem mit dem Sensormodell  $\hat{S}_n$  berechneten Modellwert  $\hat{R}_{Gnm}$  für den Messwert der Regelgröße  $R_{Gn}$ . Im einfachsten Fall kann als Korrekturwert  $R_{Gcorr}$  einfach die Differenz dieser beiden Werte herangezogen werden. In der Korrekturereinheit  $\Omega$  kann aber auch ein Regler, beispielsweise ein PI-Regler, implementiert sein, der diese Differenz ausregelt, also gegen Null regelt. Jedoch können in der Korrekturereinheit  $\Omega$  auch komplexere (beispielsweise modellbasierte) Regelungsmethoden zur Anwendung kommen.

**[0045]** Ein einfaches dynamisches Sensormodell  $\hat{S}_n$  wäre beispielsweise ein bekanntes simples Verzögerungsglied 1. Ordnung (PT1 Glied), das z.B. die Sensorträgheit (bekannt aus Daten des Messsensors  $S_n$  oder durch Messungen mit dem Messsensor  $S_n$ ) bei Änderung einer Regelgröße  $R_{Gn}$  des Reaktanden, beispielsweise die Feuchtigkeit  $\varphi$ , berücksichtigt. Des Weiteren können noch Kopplungen (beispielsweise mit dem Systemdruck  $p$ ) im Sensormodell  $\hat{S}_n$  berücksichtigt werden. Dies kann wiederum sowohl über dynamische Modelle geschehen oder in einer simpleren Ausführung als stationäre Korrekturfaktoren oder in Form von Kennfeldern realisiert werden.

**[0046]** Durch die Modellierung des Messsensors  $S_n$  durch ein dynamisches Sensormodell  $\hat{S}_n$  kann die Abhängigkeit des Messsensors  $S_n$  von Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Druck, Feuchtigkeit, Massenstrom, Temperatur, und damit auch der Sensorfehler im transienten Verhalten abgebildet werden. Dazu kann es vorteilhaft sein, Zustandsgrößen  $x$  der Konditioniereinheit 3 im Sensormodell  $\hat{S}_n$  zu berücksichtigen. Diese Sensorfehler werden durch die Korrekturereinheit  $\Omega$  korrigiert. Damit ist es insbesondere auch nicht erforderlich, den Messsensor  $S_n$  in der Konditioniereinheit 3 für alle Umgebungsbedingungen zu kalibrieren, da der Sensorfehler in dem berechneten Istwert der Regelgröße  $\hat{R}_{Gn}$ , der für die Regelung der Regelgröße  $R_{Gn}$  verwendet wird, kompensiert wird.

**[0047]** Des Weiteren ist es möglich eine explizit zeitabhängige Modellierung des dynamischen Sensormodells  $\hat{S}_n$  vorzunehmen. Damit könnte die Änderung des Sensorverhaltens (z.B. die Dynamik) über die Zeit mitberücksichtigt werden, also beispielsweise Effekte der Alterung.



## Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln des Istwertes zumindest einer Regelgröße ( $R_{Gn}$ ) einer Konditioniereinheit (3) für einen Reaktanden einer Brennstoffzelle (2), wobei ein Messwert des Istwertes der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) mit einem Messsensor ( $S_n$ ) gemessen wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit einem Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) ein Modellwert der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gn}$ ) berechnet wird, **dass** mit einem Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) für den Messsensor ( $S_n$ ) ein Modellwert des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnm}$ ) berechnet wird, **dass** aus dem mit dem Messsensor ( $S_n$ ) gemessenen Istwert der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) und dem mit dem Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) berechneten Modellwert des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnm}$ ) ein Korrekturwert ( $R_{Gcorr}$ ) für die Regelgröße ( $R_{Gn}$ ) berechnet wird **und dass** der Istwert der zumindest einen Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnist}$ ) als Summe aus dem Korrekturwert ( $R_{Gcorr}$ ) und dem mit dem Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) berechneten Modellwert der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gn}$ ) berechnet wird, wobei dieser Istwert der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnist}$ ) auch im Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) zur Berechnung des Modellwerts des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnm}$ ) verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) in der Konditioniereinheit (3) gemessene Messgrößen ( $m$ ) verarbeitet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit dem Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) Zustandsgrößen ( $x$ ) der Konditioniereinheit (3) berechnet werden, die im Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) verarbeitet werden.
4. Regelung einer Regelgröße ( $R_{Gn}$ ) einer Konditioniereinheit (3) eines Reaktanden einer Brennstoffzelle (2), wobei mit der Regelung eine Abweichung zwischen einem Sollwert der Regelgröße ( $R_{Gnsoll}$ ) und einem Istwert der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) ausgeregelt wird und für die Regelung der Istwert der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) nach einem der Ansprüche 1 bis 3 ermittelt wird.
5. Anordnung zum Regeln einer Regelgröße ( $R_{Gn}$ ) eines Reaktanden einer Brennstoffzelle (2) in einer Konditioniereinheit (3) für den Reaktanden, wobei ein Messsensor ( $S_n$ ) vorgesehen ist, um einen Messwert des Istwertes der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) zu messen, und eine Regelungseinheit (15) vorgesehen ist, in der ein Regler (R) implementiert ist, der eine Abweichung zwischen einem Sollwert der Regelgröße ( $R_{Gnsoll}$ ) und dem Istwert der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) ausregelt, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) vorgesehen ist, das einen Modellwert der Regelgröße ( $\hat{\Sigma}$ ) berechnet, **dass** ein Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) für den Messsensor ( $S_n$ ) vorgesehen ist, das einen Modellwert des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnm}$ ) berechnet, **dass** eine Korrekturereinheit ( $\Omega$ ) vorgesehen ist, die aus dem mit dem Messsensor ( $S_n$ ) gemessenen Istwert der Regelgröße ( $R_{Gnist}$ ) und dem mit dem Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) berechneten Modellwert des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnm}$ ) einen Korrekturwert ( $R_{Gcorr}$ ) für die Regelgröße ( $R_{Gn}$ ) berechnet **und dass** der Regler (R) als Istwert der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnist}$ ) die Summe aus dem Korrekturwert ( $R_{Gcorr}$ ) und dem mit dem Modell ( $\hat{\Sigma}$ ) der Konditioniereinheit (3) berechneten Modellwert der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gn}$ ) verwendet, wobei auch das Sensormodell ( $\hat{S}_n$ ) diesen modellierten Istwert der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnist}$ ) zur Berechnung des Modellwerts des Istwertes der Regelgröße ( $\hat{R}_{Gnm}$ ) verwendet.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

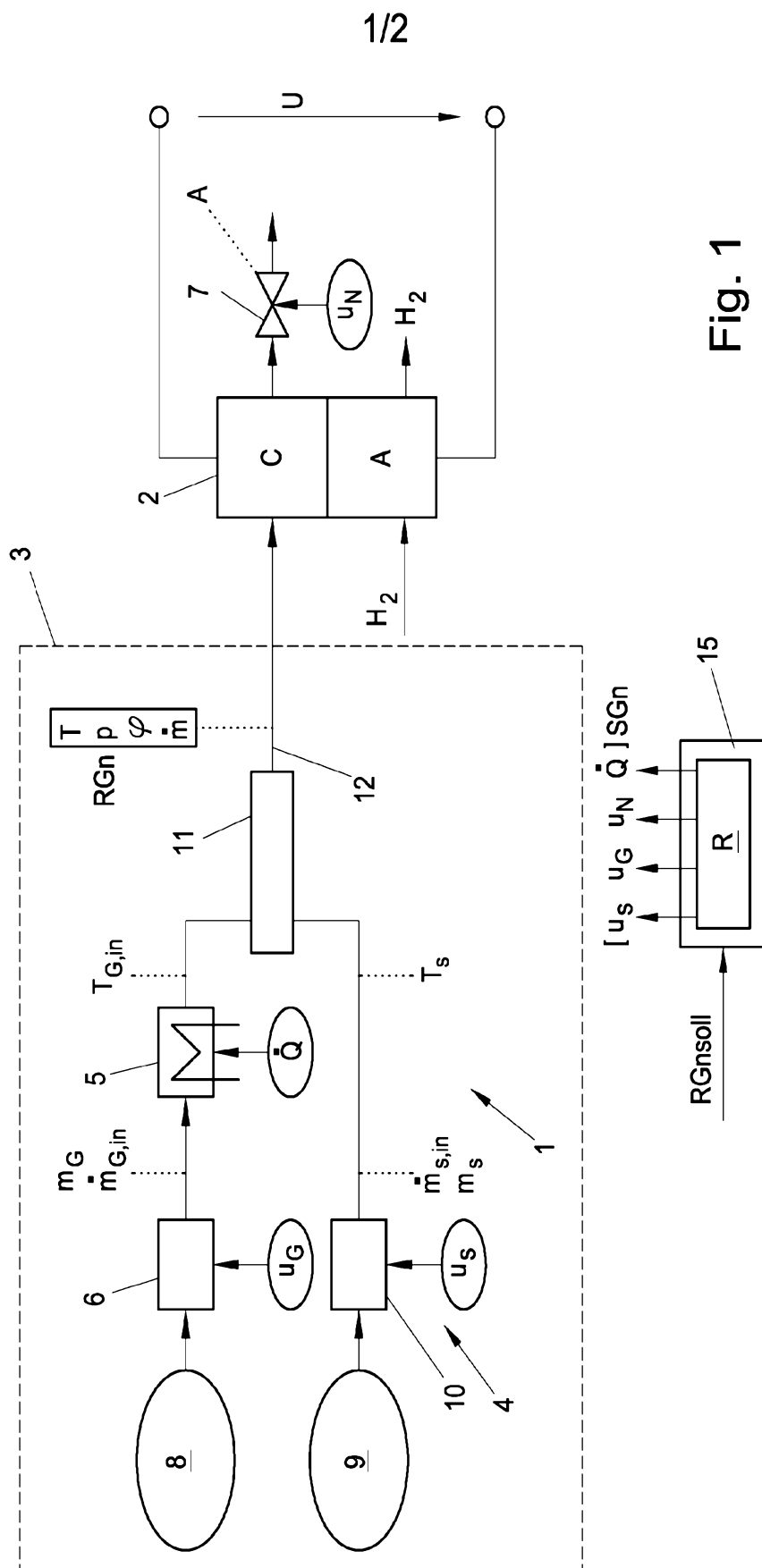
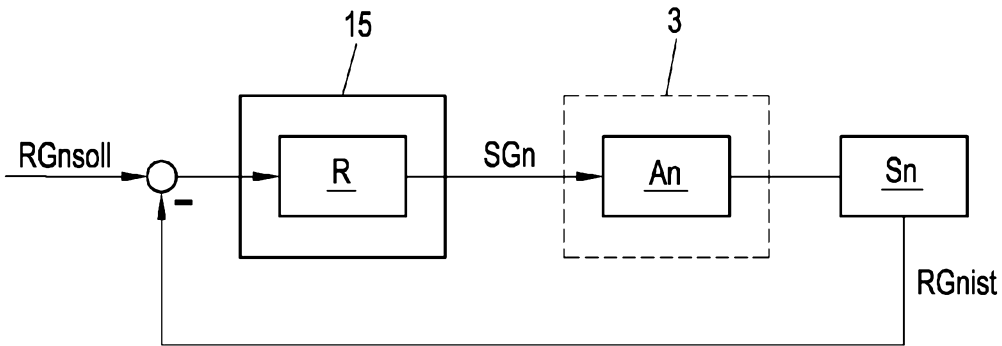
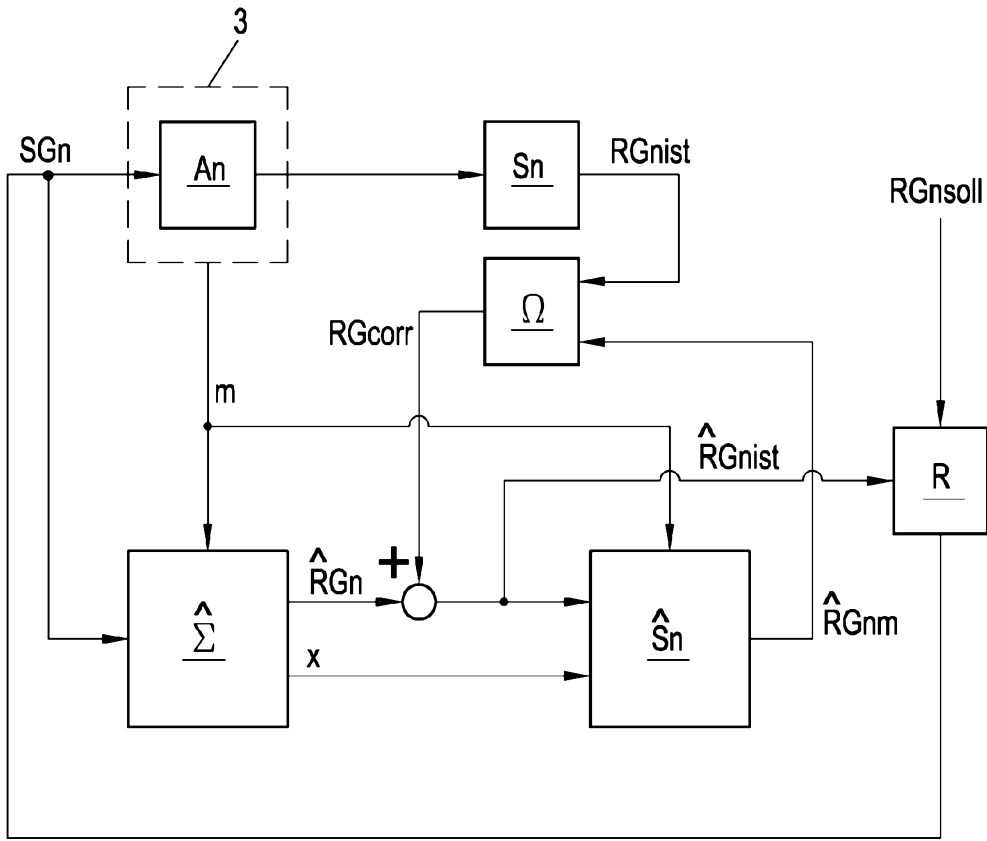


Fig. 1

2/2



**Fig. 2**



**Fig. 3**