



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2023 200 927.7**

(22) Anmeldetag: **06.02.2023**

(43) Offenlegungstag: **08.08.2024**

(51) Int Cl.: **B60L 58/30 (2019.01)**

**H01M 8/04858 (2016.01)**

**H01M 8/04992 (2016.01)**

**G07C 5/08 (2006.01)**

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

(72) Erfinder:  
**Haubensak, Lukas, 71065 Sindelfingen, DE**

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

(54) Bezeichnung: **System und Verfahren zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs**

(57) Zusammenfassung: Die vorgestellte Erfindung betrifft ein System zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs, wobei das System umfasst:

- eine Recheneinheit,

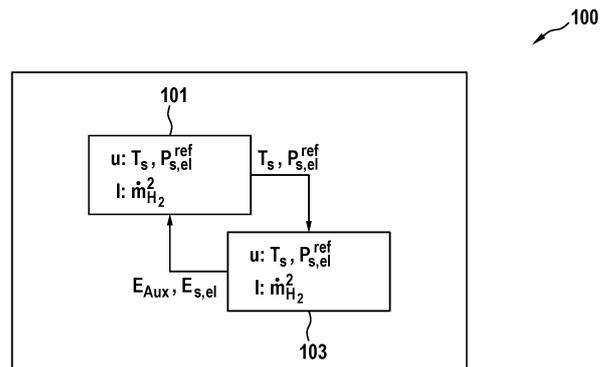
wobei die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, einen Regler (100) auszuführen und mittels des Reglers (100) Einstellungen zum Einstellen des Brennstoffzellensystems zu ermitteln,

wobei der Regler (100) ein Planungsmodul (101, 201) und ein Betriebsführungsmodul (101, 203) umfasst,

wobei das Planungsmodul (101, 201) dazu konfiguriert ist, anhand einer vorgegebenen und durch das Fahrzeug zurückzulegenden Strecke Planungsparameter zu ermitteln, wobei die Planungsparameter zumindest eine durch das Brennstoffzellensystem mit einer ersten Zeitkonstante zu erbringende Leistung umfassen, und

wobei das Betriebsführungsmodul (101, 203) dazu konfiguriert ist, das Brennstoffzellensystem unter Berücksichtigung einer zweiten Zeitkonstante derart einzustellen, dass die durch das Planungsmodul ermittelten Planungsparameter bereitgestellt werden,

wobei die zweite Zeitkonstante kleiner ist als die erste Zeitkonstante.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorgestellte Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs gemäß den beigefügten Ansprüchen.

### Stand der Technik

**[0002]** Eine Betriebsstrategie zum Betreiben eines Brennstoffzellensystems kann mehrere Vorgaben gleichzeitig optimieren, so kann bspw. ein Wasserverbrauch und gleichzeitig eine Systemalterung minimiert werden.

**[0003]** Modellprädiktive Ansätze ermöglichen eine optimale Regelung eines Brennstoffzellensystems auf Grundlage eines Prädiktions-Horizonts, sodass zukünftige Fahrprofile einbezogen werden können, um Entscheidungen über Einstellung des Brennstoffzellensystems zu treffen.

### Offenbarung der Erfindung

**[0004]** Im Rahmen der vorgestellten Erfindung werden ein System und ein Verfahren zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems in einem Fahrzeug vorgestellt. Weitere Merkmale und Details der Erfindung ergeben sich aus den jeweiligen Unteransprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen. Dabei gelten Merkmale und Details, die im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen System beschrieben sind, selbstverständlich auch im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren und jeweils umgekehrt, sodass bezüglich der Offenbarung zu den einzelnen Erfindungsaspekten stets wechselseitig Bezug genommen wird bzw. werden kann.

**[0005]** Die vorgestellte Erfindung dient insbesondere dazu, ein Brennstoffzellensystem effizient und langlebig zu betreiben.

**[0006]** Es wird somit gemäß einem ersten Aspekt der vorgestellten Erfindung ein System zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs vorgestellt.

**[0007]** Das vorgestellte System umfasst eine Recheneinheit, wobei die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, einen Regler auszuführen und mittels des Reglers Einstellungen zum Einstellen des Brennstoffzellensystems zu ermitteln, wobei der Regler ein Planungsmodul und ein Betriebsführungsmodul umfasst, wobei das Planungsmodul dazu konfiguriert ist, anhand einer vorgegebenen und durch das Fahrzeug zurückzulegenden Strecke Planungsparameter zu ermitteln, wobei die Planungsparameter zumindest eine sich mit einer ersten Zeitkonstante ändernde durch das Brennstoffzellensystem zu

erbringende Leistung umfassen, und wobei das Betriebsführungsmodul dazu konfiguriert ist, das Brennstoffzellensystem derart einzustellen, dass die durch das Planungsmodul ermittelten Planungsparameter unter Berücksichtigung einer zweiten Zeitkonstante geändert werden, wobei die zweite Zeitkonstante kleiner ist als die erste Zeitkonstante.

**[0008]** Unter einer Recheneinheit ist im Kontext der vorgestellten Erfindung ein Computer, ein Prozessor, ein Subprozessor, ein Steuergerät oder jeder weitere programmierbare Schaltkreis zu verstehen.

**[0009]** Die vorgestellte Erfindung basiert auf dem Prinzip, dass in einem Brennstoffzellensystem verschiedene Dynamiken von verschiedenen Betriebsparametern vorliegen, sodass beim Einstellen der Betriebsparameter unterschiedliche Zeitkonstanten unterschiedlicher Vorgänge zu berücksichtigen sind.

**[0010]** Zum Berücksichtigen verschiedener Zeitkonstanten umfasst der erfindungsgemäß vorgesehene Regler mehrere hierarchisch bzw. kaskadiert organisierte Module, nämlich zumindest ein Planungsmodul und ein Betriebsführungsmodul, die miteinander wechselwirken bzw. sich gegenseitig Informationen übermitteln.

**[0011]** Erfindungsgemäß unterscheidet sich eine Zeitkonstante, mit der das Planungsmodul Daten verarbeitet von einer Zeitkonstante, mit der das Betriebsführungsmodul Daten verarbeitet bzw. das Brennstoffzellensystem einstellt.

Entsprechend eignet sich das vorgestellte Verfahren um ganzheitlich Verbrauch und Alterung eines Brennstoffzellensystems zu optimieren und dazu zwei Ebenen zu implementieren, sodass die Rechenzeit für einen Echtzeiteinsatz geeignet ist. Bspw. übermittelt das Planungsmodul dem Betriebsführungsmodul Betriebsparameter, die eine Referenz-Leistungsanforderung umfassen, die aufgrund einer vorgegebenen Streckencharakteristik bestimmt wurde.

**[0012]** Es kann weiterhin vorgesehen sein, dass die Planungsparameter eine Brennstoffzellenstapeltemperatur umfassen.

**[0013]** Da bei Brennstoffzellensystemen die Umsetzung einer Referenz-Leistungsanforderung nicht eindeutig ist, sondern mehrere Freiheitsgrade umfasst, können diese Freiheitsgrade, wie bspw. Kathoden- und Stöchiometrie sowie die Temperatur die Zell-Spannungen beeinflussen und somit zusammen mit einem gezogenen elektrischen Strom in verschiedenen Kombinationen die Referenz-Leistungsanforderung bereitstellen.

**[0014]** Somit kann das vorgestellte System mit zwei oder mehr ökonomischen Optimal Control Problems

(OCP) arbeiten. Auf der obersten Ebene, dem Planungsmodul, wird als erstes OCP in einem langen Zeitraum weit in die Zukunft prädiziert, um möglichst nah an ein globales Optimum des Brennstoffzellensystems bzw. Brennstoffzellenbetriebs zu kommen. Auf einer unteren Ebene, dem Betriebsführungsmodul, wird einem zweiten OCP die Einstellung des Brennstoffzellensystems in einem kurzen bzw. kürzeren Zeitraum optimiert, um das Brennstoffzellensystem kraftstoffoptimiert und/oder temperaturoptimiert zu betreiben. Dazu kann das Planungsmodul bspw. eine Verteilung zwischen Batterieleistung und Brennstoffzellenstapelleistung einstellen und das Betriebsführungsmodul bspw. Strom, Druck, Stöchiometrie einstellen, um eine durch das Planungsmodul vorgegebene Zielvorgabe, insbesondere eine Leistung, optimal umzusetzen.

**[0015]** Es kann weiterhin vorgesehen sein, dass das Betriebsführungsmodul dazu konfiguriert ist, Betriebsführungsparameter an das Planungsmodul zu übermitteln, wobei die Betriebsführungsparameter eine von einem Kompressor des Brennstoffzellensystems benötigte Anschlussleistung und eine durch einen Brennstoffzellenstapel des Brennstoffzellensystems bereitgestellte Elektrizität umfassen, und das Planungsmodul dazu konfiguriert ist, anhand von durch das Betriebsführungsmodul bereitgestellten Betriebsführungsparametern eine durch das Brennstoffzellensystem gemäß der ersten Zeitkonstante zu erbringende Leistung zu bestimmen.

**[0016]** Es kann weiterhin vorgesehen sein, dass das Planungsmodul dazu konfiguriert ist, mittels der Multi-Horizont Methode in einem ersten Zeithorizont eine optimale Trajektorie zum Einstellen der Planungsparameter zu bestimmen und an das Betriebsführungsmodul zu übermitteln, und das Betriebsführungsmodul dazu konfiguriert ist, in einer Vielzahl Regelungsschleifen die Planungsparameter unter Berücksichtigung der Trajektorie, bspw. einer Leistungsanforderungs- und Temperatur-Trajektorie als Nebenbedingung einzustellen. Dabei kann sich der erste Zeithorizont der Planungsebene in einen Receding Horizon und einen sich anschließenden Shrinking Horizon aufteilen. Teilt man die Zeitspanne von einem aktuellen Zeitpunkt bis zum Fahrtende in einen Horizont konstanter Länge (Receding Horizon) und einen sich anschließenden Horizont (Shrinking Horizon), verkürzt sich dieser zweite Horizont naturgemäß mit jeder Neuberechnung, da die gesamte Zeitspanne bis zum Fahrtende sich kontinuierlich verkürzt.

**[0017]** Durch Verwendung eines sogenannten „Multi-Horizon“ Ansatzes in Kombination mit einem MPC-Ansatz ergibt sich eine Reglerstruktur, die eine langfristige Planung eines Batterieladezustands und der Temperatur eines Brennstoffzellenstapels ermöglicht und gleichzeitig die Betriebsführung des

Brennstoffzellensystems durch Manipulation des Zustands eines Luftsystems des Brennstoffzellensystems optimal gewährleistet. Dabei wird die Manipulation des Zustands eines Luftsystems des Brennstoffzellensystems durch das Betriebsführungsmodul auf einer verglichen mit einer Schrittweite des Planungsmoduls sehr viel schnelleren bzw. kürzeren Schrittweite gerechnet, da die Dynamik eines Brennstoffzellensystems bzgl. der Betriebsparameter zum Einstellen des Luftsystems viel schneller ist als eine Dynamik zum Planen der Leistungsanforderung.

**[0018]** Es kann weiterhin vorgesehen sein, dass das Planungsmodul dazu konfiguriert ist, nach einer vorgegebenen Anzahl durch das Betriebsführungsmodul durchgeführter Regelungsschleifen in einem zweiten Zeithorizont weitere Planungsparameter und eine weitere optimale Trajektorie zu bestimmen, wobei der zweite Zeithorizont sich gegenüber dem ersten Zeithorizont kontinuierlich verkleinert.

**[0019]** Das vorgestellte System kann bspw. eine Regelung ausführen, bei der ein kurzer „receding horizon“ innerhalb dessen die Prädiktion eines Fahrzustands als hinreichend genau angenommen wird in Verbindung mit von einem „shrinking horizon“ mit wesentlich weniger Stützstellen, der bis zum angenommenen Ende der Fahrt reicht, ausgeführt wird. Dadurch kann eine Kostenformulierung bezüglich des Batterieladezustands (SOC) des Brennstoffzellensystems recheneffizient formuliert werden. Gegenüber einem klassischen Ansatz über einen Bestrafungs-Term, der zu jedem Zeitschritt die Abweichung von einer Referenz bestraft, führt dies zu besseren Ergebnissen des Kraftstoffverbrauchs, da die Batterie stärker benutzt werden darf. Dabei sind die betrachteten Freiheitsgrade bzw. Betriebsparameter die Leistungsverteilung zwischen Batterie und Brennstoffzellenstapel sowie die Temperatur des Brennstoffzellenstapels und dessen Kathoden-Druck und Stöchiometrie.

**[0020]** Es kann weiterhin vorgesehen sein, dass die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, die Brennstoffzellenstapeltemperatur in einem Zusatzmodul zu ermitteln und dem Planungsmodul zu übergeben.

**[0021]** Durch Verwendung eines Zusatzmoduls, d.h. insgesamt drei Modulen, nämlich dem Planungsmodul, dem Betriebsführungsmodul und dem Zusatzmodul wird eine individuellere Auslegung des Reglers auf die Zeitkonstanten der Temperatur und der Batterie ermöglicht.

**[0022]** Es kann weiterhin vorgesehen sein, dass das Planungsmodul dazu konfiguriert ist, eine Verteilung der zu erbringenden Last auf eine Vielzahl Brennstoffzellenstapel zu ermitteln, und ein jeweiliges Betriebsführungsmodul für jeden Brennstoffzellen-

stapel der Vielzahl Brennstoffzellenstapel auszuführen.

**[0023]** Bei einem Brennstoffzellensystem mit mehreren Brennstoffzellenstapeln kann durch das Planungsmodul die Leistungsverteilung zwischen den Stacks, sowie die Temperaturführung individuell optimiert werden. Die Betriebsführungs-Ebene hingegen kann für jeden Brennstoffzellenstapel individuell implementiert werden.

**[0024]** Dabei kann vorgesehen sein, dass die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, eine einzustellende Temperatur als Planungsparameter für jeden Brennstoffzellenstapel der Vielzahl Brennstoffzellenstapel zu ermitteln.

**[0025]** Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die vorgestellte Erfindung ein Verfahren zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs.

**[0026]** Das vorgestellte Verfahren umfasst das Ausführen eines Reglers zum Ermitteln von Einstellungen zum Einstellen des Brennstoffzellensystems, wobei der Regler ein Planungsmodul und ein Betriebsführungsmodul umfasst, und mittels des Planungsmoduls Planungsparameter anhand einer vorgegebenen und durch das Fahrzeug zurückzulegenden Strecke ermittelt, wobei die Planungsparameter zumindest eine durch das Brennstoffzellensystem mit einer ersten Zeitkonstante zu erbringende Leistung umfassen, und wobei der Regler mittels des Betriebsführungsmoduls das Brennstoffzellensystem gemäß einer zweiten Zeitkonstante derart einstellt, dass die durch das Planungsmodul ermittelten Planungsparameter bereitgestellt werden, wobei die zweite Zeitkonstante kleiner ist als die erste Zeitkonstante.

**[0027]** Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der unter Bezugnahme auf die Zeichnungen Ausführungsbeispiele der Erfindung im Einzelnen beschrieben sind. Dabei können die in den Ansprüchen und in der Beschreibung erwähnten Merkmale jeweils einzeln für sich oder in beliebiger Kombination erfindungswesentlich sein.

**[0028]** Es zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Darstellung eines Reglers gemäß einer möglichen Ausgestaltung des vorgestellten Systems,

**Fig. 2** eine mögliche Ausgestaltung des vorgestellten Verfahrens.

**[0029]** In **Fig. 1** ist ein Regler 100 dargestellt. Der Regler 100 umfasst ein übergeordnetes Planungsmodul 101, das Temperatur und die Leistungsanforderung an einen Brennstoffzellenstapel optimiert,

wobei beispielsweise der Wasserstoffverbrauch minimiert wird.

**[0030]** Bei dem Planungsmodul 101 handelt es sich um einen ökonomischen modellprädiktiven (MPC)-Regler, der um den Multi-Horizont Ansatz erweitert ist.

**[0031]** Ein untergeordnetes Betriebsführungsmodul 103 ist ein ökonomischer modellprädiktiver (MPC)-Regler, der mit den Freiheitsgraden Stack-Strom, Kathoden-Druck und -Stöchiometrie die Betriebsführung des Brennstoffzellenstapels optimiert.

**[0032]** In **Fig. 2** ist ein Verfahren 200 dargestellt. In einem Diagramm 205, das sich auf seiner Ordinate über jeweilige Betriebsparameter und seiner Abszisse über die Zeit aufspannt, ist eine Trajektorienplanung als Abfolge auf einem Zeitstrahl dargestellt. Zu sehen sind verschiedene Horizonte des MPC-Reglers, sowie beispielhafte schrittweise konstante Trajektorien der Optimierungsgrößen. Zunächst löst das Planungsmodul 201 über einen sogenannten „Receding Horizon“ und „Shrinking Horizon“ ein erstes vorgegebenes ökonomisches Problem (OCP). Die konvergierte Lösung wird dem schnelleren Betriebsführungsmodul 203 übergeben.

**[0033]** Das Betriebsführungsmodul 203 löst eine Reihe von MPC Schritten unter der Randbedingung der berechneten Lösung des Planungsmoduls.

**[0034]** Schlussendlich wird eine durch das Betriebsführungsmodul 203 ermittelte Lösungs-Trajektorie wieder an das Planungsmodul 201 übermittelt, das einen neuen Optimierungsschritt berechnet und die Schleife von neuem startet.

## Patentansprüche

1. System zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs, wobei das System umfasst:

- eine Recheneinheit,

wobei die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, einen Regler (100) auszuführen und mittels des Reglers (100) Einstellungen zum Einstellen des Brennstoffzellensystems zu ermitteln,

wobei der Regler (100) ein Planungsmodul (101, 201) und ein Betriebsführungsmodul (101, 203) umfasst,

wobei das Planungsmodul (101, 201) dazu konfiguriert ist, anhand einer vorgegebenen und durch das Fahrzeug zurückzulegenden Strecke Planungsparameter zu ermitteln, wobei die Planungsparameter zumindest eine durch das Brennstoffzellensystem mit einer ersten Zeitkonstante zu erbringende Leistung umfassen, und

wobei das Betriebsführungsmodul (101, 203) dazu konfiguriert ist, das Brennstoffzellensystem unter

Berücksichtigung einer zweiten Zeitkonstante derart einzustellen, dass die durch das Planungsmodul ermittelten Planungsparameter bereitgestellt werden, wobei die zweite Zeitkonstante kleiner ist als die erste Zeitkonstante.

2. System nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Zeitbereich einer Schrittweite des Planungsmoduls (101, 201) entspricht und der zweite Zeitbereich einer Schrittweite des Betriebsführungsmoduls (101, 203) entspricht.

3. System nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Betriebsführungsmodul (101, 203) dazu konfiguriert ist, Betriebsführungsparameter an das Planungsmodul (101, 201) zu übermitteln, wobei die Betriebsführungsparameter eine von einem Kompressor des Brennstoffzellensystems benötigte Anschlussleistung und eine durch einen Brennstoffzellenstapel des Brennstoffzellensystems bereitgestellte Elektrizität umfassen, und das Planungsmodul (101, 201) dazu konfiguriert ist, anhand von durch das Betriebsführungsmodul (101, 203) bereitgestellten Betriebsführungsparametern eine durch das Brennstoffzellensystem in dem ersten Zeitbereich zu erbringender Leistung zu bestimmen.

4. System nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Planungsmodul (101, 201) dazu konfiguriert ist, mittels der Multi-Horizont Methode in einem ersten Zeithorizont eine optimale Trajektorie zum Einstellen der Planungsparameter zu bestimmen und an das Betriebsführungsmodul (103) zu übermitteln, und das Betriebsführungsmodul (101, 203) dazu konfiguriert ist, in einer Vielzahl Regelungsschleifen die Planungsparameter unter Berücksichtigung der Trajektorie als Nebenbedingung einzustellen.

5. System nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Planungsmodul (101, 201) dazu konfiguriert ist, nach einer vorgegebenen Anzahl durch das Betriebsführungsmodul (101, 203) durchgeführter Regelungsschleifen weitere Planungsparameter und eine weitere optimale Trajektorie zu bestimmen.

6. System nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Planungsparameter eine Brennstoffzellenstapeltemperatur umfassen.

7. System nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, die Brennstoffzellenstapeltemperatur in einem

Zusatzmodul zu ermitteln und dem Planungsmodul (101, 201) zu übergeben.

8. System nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Planungsmodul (101, 201) dazu konfiguriert ist, eine Verteilung einer der zu erbringenden Last auf eine Vielzahl Brennstoffzellenstapel zu ermitteln, und ein jeweiliges Betriebsführungsmodul (101, 203) für jeden Brennstoffzellenstapel der Vielzahl Brennstoffzellenstapel auszuführen.

9. System nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Recheneinheit dazu konfiguriert ist, eine einzustellende Temperatur als Planungsparameter für jeden Brennstoffzellenstapel der Vielzahl Brennstoffzellenstapel zu ermitteln.

10. Verfahren (200) zum Einstellen eines Brennstoffzellensystems eines Fahrzeugs, wobei das Verfahren umfasst:

- Ausführen eines Reglers (100) zum Ermitteln von Einstellungen zum Einstellen des Brennstoffzellensystems, wobei der Regler ein Planungsmodul (101, 201) und ein Betriebsführungsmodul (101, 203) umfasst,

- Ermitteln von Planungsparametern anhand einer vorgegebenen und durch das Fahrzeug zurückzulegenden Strecke mittels des Planungsmoduls (101, 201), wobei die Planungsparameter zumindest eine durch das Brennstoffzellensystem mit einer ersten Zeitkonstante zu erbringende Leistung umfassen, und

- Einstellen des Brennstoffzellensystems mittels des Betriebsführungsmoduls (101, 203) unter Berücksichtigung einer zweiten Zeitkonstante derart, dass die durch das Planungsmodul (101, 201) ermittelten Planungsparameter mit minimalem Kraftstoffverbrauch bereitgestellt werden, wobei die zweite Zeitkonstante kleiner ist als die erste Zeitkonstante.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

100

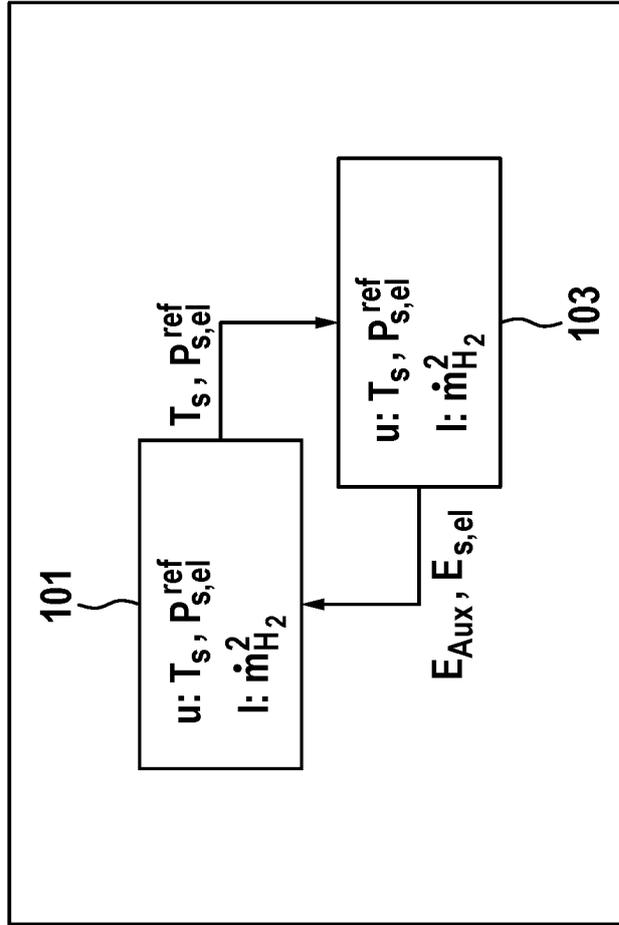


Fig. 2

