

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50106/2021 (51) Int. Cl.: **F28D 20/02** (2006.01)
 (22) Anmeldetag: 17.02.2021 **F28F 27/00** (2006.01)
 (43) Veröffentlicht am: 15.04.2022

(56) Entgegenhaltungen:
 US 2014158340 A1
 DE 202012103718 U1

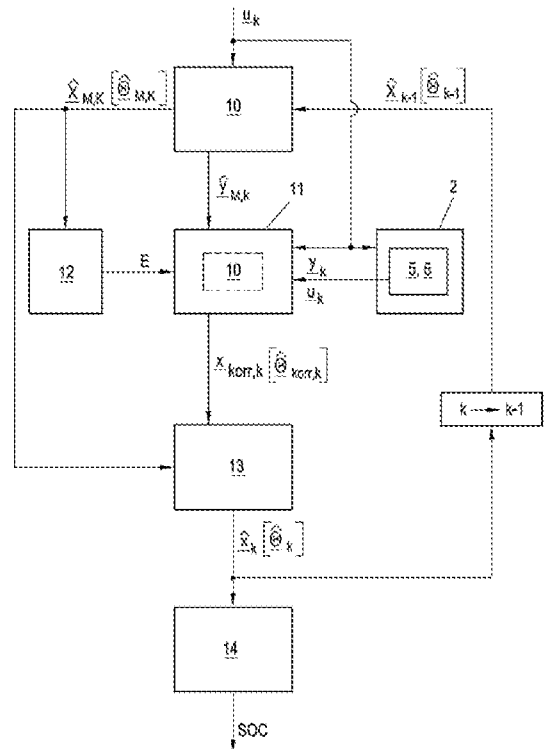
(71) Patentanmelder:
 Technische Universität Wien
 1040 Wien (AT)
 AIT Austrian Institute of Technology GmbH
 1210 Wien (AT)

(72) Erfinder:
 Pernsteiner Dominik Dipl.Ing.
 1120 Wien (AT)
 Schirrer Alexander Dipl.Ing.Dr.techn.
 1220 Wien (AT)
 Hofmann René Dipl.Ing. Dr.
 2340 Mödling (AT)
 Jakubek Stefan Dipl.Ing. Dr.
 1230 Wien (AT)

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

(54) **Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes eines Phasenwechselfpeichers**

(57) Um die Bestimmung des Ladezustandes einer Phasenwechselfpeicherzelle zu verbessern ist vorgesehen, dass an vorgesehenen Messstellen (M) der Phasenwechselfpeicherzelle (2) zumindest zwei verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen erfasst werden, mit einem Systemmodell (10) ein prädizierter Ausgangsgrößenvektor $\hat{y}_{M,k}$ und ein prädizierter Systemzustandsvektor $\hat{x}_{M,k}$ und Empfindlichkeiten E des ermittelten prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{y}_{M,k}$ als Ableitungen $E = \frac{d\hat{y}_{M,k}}{dx}$ des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{y}_{M,k}$ nach dem Systemzustandsvektor x des Systemmodells (10) ermittelt werden, zum Zeitschritt k anhand des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{y}_{M,k}$, der Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ und gemessenen Ausgangsgrößen y_k eine Korrektur $x_{korr,k}$ für den prädizierte Systemzustandsvektor $\hat{x}_{M,k}$ ermittelt wird, um zum Zeitschritt k keinen geschätzten Systemzustandsvektor \hat{x}_k für die zumindest eine Phasenwechselfpeicherzelle (2) zu ermitteln, aus dem der Ladezustand SOC ermittelt wird.



Zusammenfassung

Um die Bestimmung des Ladezustandes einer Phasenwechselspeicherzelle zu verbessern ist vorgesehen, dass an vorgesehenen Messstellen (M) der Phasenwechselspeicherzelle (2) zumindest zwei verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen erfasst werden, mit einem Systemmodell (10) ein prädizierter Ausgangsgrößenvektor $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und ein prädizierter Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ und Empfindlichkeiten E des ermittelten prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ als Ableitungen $E = \frac{d\hat{\underline{y}}_{M,k}}{d\underline{x}}$ des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ nach dem Systemzustandsvektor \underline{x} des Systemmodells (10) ermittelt werden, zum Zeitschritt k anhand des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$, der Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und gemessenen Ausgangsgrößen y_k eine Korrektur $\underline{x}_{korrr,k}$ für den prädizierte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ ermittelt wird, um zum Zeitschritt k einen geschätzten Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_k$ für die zumindest eine Phasenwechselspeicherzelle (2) zu ermitteln, aus dem der Ladezustand SOC ermittelt wird.

Fig. 2

Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes eines Phasenwechselfspeichers

Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes eines Phasenwechselfspeichers mit zumindest einer Phasenwechselfspeicherzelle in vorgegebenen Zeitschritten, wobei der über die zumindest eine Phasenwechselfspeicherzelle örtlich verteilte thermodynamische Zustand der Phasenwechselfspeicherzelle mit einem Systemmodell ermittelt wird und das Systemmodell den Zusammenhang zwischen einem Eingangsgößenvektor mit vorgegebenen Eingangsgößen, einem Systemzustandsvektor mit vorgegebenen Systemzustandsgrößen, einem Ausgangsgößenvektor mit vorgegebenen Ausgangsgößen und anhand vorgegebener Modellparameter anhand zumindest einer Systemmodellgleichung beschreibt.

Ein Phasenwechselfspeicher als thermodynamisches System speichert Energie in Form von latenter Wärme eines Phasenwechselfmaterials. Die zugeführte Wärmemenge wird für einen Phasenwechsel des Phasenwechselfmaterials genutzt, z.B. ein Phasenwechsel von fest zu flüssig, und ist als latente Wärme im Phasenwechselfmaterial gespeichert. Bei Umkehrung des Phasenwechsels wird die latente Wärme wieder frei. Der Phasenwechsel findet in Abhängigkeit vom verwendeten Phasenwechselfmaterial bei einer bestimmten Temperatur (etwa bei Reinstoffen oder Eutektika) oder in einem engen Temperaturbereich (sogenannte Mushy Region) statt. Phasenwechselfspeicher werden beispielsweise zur Speicherung von Wärme in Industrieprozessen, in der Gebäudetechnik, der Fernwärme usw. verwendet. Der aktuelle Ladezustand ist für die Verwendung des Phasenwechselfspeichers ein wichtiger Kennwert, beispielsweise als Basis für eine Regelung des Betriebs des Phasenwechselfspeichers. Der Ladezustand ist allerdings nicht allgemein gültig definiert, sondern es gibt unterschiedlichste mögliche Definitionen für den Ladezustand, wie beispielsweise in *Zsembinszki G., et al., „Evaluation of the State of Charge of a Solid/Liquid Phase Change Material in a Thermal Energy Storage Tank“, Energies 2020, 13, 1425* ausgeführt.

Ein vollständiger Satz unabhängiger Zustandsgrößen beschreibt ein thermodynamisches System eindeutig und somit auch den Ladezustand eines Phasenwechselfspeichers. Es wird angenommen, dass die Kenntnis des thermodynamischen Zustands innerhalb des Systems ausreicht, um eine gewählte Formulierung des Ladezustandes in der Form $SOC = SOC(\underline{x})$ zu ermitteln. Dabei bezeichnet SOC die gewählte Formulierung des Ladezustandes (engl. State of Charge, SOC) als Funktion des Systemzustandsvektors \underline{x} welcher den gesamten thermodynamischen Zustand enthält. Im Wesentlichen sagt der Ladezustand aus, wieviel Wärme (bzw. Energie) im Phasenwechselfspeicher gespeichert ist oder wieviel Wärme (bzw. Energie) dem Phasenwechselfspeicher noch zugeführt oder entnommen werden kann, oftmals als dimensionslose Größe wie einer Prozentangabe.

Für den Betrieb eines Phasenwechselfspeichers ist folglich die Kenntnis des thermodynamischen Zustands des Phasenwechselfmaterials des Phasenwechselfspeichers von großer Bedeutung. Es ist jedoch alles andere als trivial, den thermodynamischen Zustand des Phasenwechselfmaterials mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Das liegt zum einen an den thermodynamischen Eigenschaften des Phasenwechselfmaterials, insbesondere an der Temperaturabhängigkeit bestimmter Materialparameter, und des Phasenwechselfspeichers, zum anderen aber auch an der Art der thermodynamischen Zustandsänderung (die abhängig sein kann davon, wie das Phasenwechselfmaterial im Phasenwechselfspeicher angeordnet ist).

Ein Phasenwechselfspeicher in Verwendung an einem bekannten Ruthsspeicher zur Erhöhung der Wärmespeicherkapazität ist in *Pernsteiner D., et al., „Co-simulation methodology of a hybrid latent-heat thermal energy storage unit, Applied Thermal Engineering 178 (2020) 115495* beschrieben. Der Ruthsspeicher ist dabei vom Phasenwechselfspeicher in Form einer Vielzahl von Phasenwechselfspeicherzellen, in denen ein Phasenwechselfmaterial angeordnet ist, umgeben. Durch Dampf wird dem Ruthsspeicher Wärme zugeführt und darin gespeichert. Die zugeführte Wärme wird auch als latente Wärme im Phasenwechselfspeicher gespeichert. Die gespeicherte Wärme kann durch die Entnahme von Dampf aus dem Ruthsspeicher wieder entnommen werden.

In EP 3 336 473 A1 ist ein Verfahren zur Bestimmung des Ladezustandes eines Phasenwechselfspeichers vorgeschlagen, bei dem Temperaturen an verschiedenen Stellen gemessen werden und daraus in einer Recheneinheit ein Temperaturfeld im Phasenwechselfmaterial berechnet wird, anhand dem eine Verteilung eines lokalen Ladezustandes (Ladezustandsfeld) des Phasenwechselfmaterials bestimmt wird. Die Temperatur kann zwar einfach und sicher gemessen werden, eignet sich aber nur bedingt zur Bestimmung des Ladezustandes eines Phasenwechselfspeichers. Das liegt daran, dass die Temperatur beim Phasenwechsel hinsichtlich der gespeicherten latenten Wärme entweder überhaupt keine Aussagekraft hat, weil die Temperatur beim Phasenwechsel konstant bleibt (Reinstoffe, Eutektika), oder der Phasenwechsel in einem engen Temperaturbereich (Mushy Region) erfolgt, sodass schon geringe Temperaturmessfehler große Auswirkungen auf den daraus abgeleiteten lokalen Ladezustand haben können. Der Informationsgehalt der gemessenen Ausgangsgröße (Temperatur) ändert sich daher über den möglichen Betriebsbereich des Phasenwechselfmaterials. Es hat sich daher gezeigt, dass bei einer Repräsentation des thermodynamischen Zustands mithilfe des Temperaturfeldes über den gesamten möglichen Bereich des Ladezustandes des Phasenwechselfmaterials, wie in EP 3 336 473 A1, nur ungenaue Ergebnisse erzielt werden können und insbesondere eine Abbildung des Schmelzverhaltens von Reinstoffen und

Eutektika nicht möglich ist. Der Grund dafür ist im Phasenwechsel zu sehen, was am folgenden einfachen Beispiel erläutert wird.

- Wenn Wasser in einem Behälter Wärme zugeführt wird, steigt die Temperatur bis zum Phasenwechsel, bei dem das Wasser zu verdampfen beginnt. Bei einer isobaren Zustandsänderung (Druck bleibt konstant) bleibt ab diesem Moment die Temperatur konstant. Davor, also bis zum Beginn des Phasenwechsels, bleibt hingegen das Volumen näherungsweise konstant. Damit erhält man nur mit einer Volumenmessung bis zum Beginn des Phasenwechsels keine aussagekräftige Information über die innere Energie oder Enthalpie des Wassers, weil die innere Energie ansteigt, sich das im Volumen aber nicht signifikant widerspiegelt. Mit eintretendem Phasenwechsel verbunden kommt es zu einer signifikanten Dichteänderung (Dichte fällt), d.h. das Volumen steigt stark an. Nur mit Messung der Temperatur hingegen erhält man ab Beginn des Phasenwechsels keine aussagekräftige Information über die innere Energie oder Enthalpie des Wassers, weil die innere Energie ansteigt, sich das in der Temperatur aber nicht widerspiegelt.
- Es ist somit eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, die Bestimmung des Ladezustandes einer Phasenwechselspeicherzelle zu verbessern.

- Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst. Durch die Verwendung von verschiedenen thermodynamischen Zustandsgrößen als Ausgangsgrößen wird eine robuste, optimale Beobachtbarkeit des thermodynamischen Systemverhaltens, insbesondere im Bereich der Phasenumwandlung, sichergestellt. Zusätzlich werden die Empfindlichkeiten (auch Sensitivities genannt) der Modellausgänge aus den physikalischen Zusammenhängen direkt als Teil der Modellformulierung ausgedrückt und so im Beobachter korrekt verwendet. Das ermöglicht auch die Anwendung bei Reinstoffen und Eutektika als Phasenwechselmaterial. Durch die laufende Korrektur des Modells werden zusätzlich Modellfehler und Modellparameterfehler korrigiert, was ebenso zur Erhöhung der Genauigkeit beiträgt. Erst dadurch wird es möglich, das örtlich verteilte Zustandsfeld des Phasenwechselspeichers über den gesamten Arbeitsbereich mit hoher Genauigkeit zu schätzen. Mit dem genau geschätzten Zustandsfeld kann dann auch eine genaue Schätzung des Ladezustandes erfolgen.

- Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung, sowie deren Wirkungen, ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen und der nachfolgenden Beschreibung der Erfindung.

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 einen Phasenwechselspeicher mit einer Phasenwechselspeicherzelle mit einem Phasenwechselmaterial,

Fig.2 einen erfindungsgemäßen Ablauf zur Ermittlung eines örtlich verteilten Zustands der Phasenwechselspeicherzelle,

Fig.3 das Ergebnis der erfindungsgemäßen Ermittlung eines örtlich verteilten Zustands der Phasenwechselspeicherzelle bei der Ermittlung des Ladezustandes und

5 Fig.4 eine Anwendung der erfindungsgemäßen Ermittlung des Ladezustandes bei der Regelung des Betriebs des Phasenwechselspeichers.

Ein Phasenwechselspeicher 1, wie in Fig.1 dargestellt, umfasst ein Phasenwechselmaterial 3, das üblicherweise in einer Anzahl von Phasenwechselspeicherzellen 2 angeordnet ist, die zum Phasenwechselspeicher 1 zusammengesetzt sind, wie beispielsweise im eingangs
10 erwähnten Paper von *Pernsteiner D., et al.* beschrieben ist. Welches Phasenwechselmaterial 3 eingesetzt wird, wie eine Phasenwechselspeicherzelle 2 gestaltet ist (z.B. Geometrie, Material usw.) und wie Phasenwechselspeicherzellen 2 zum Phasenwechselspeicher 1 zusammengesetzt sind, spielt für die Erfindung keine Rolle. Die Phasenwechselspeicherzelle 2 bildet üblicherweise ein Gehäuse, beispielsweise aus Aluminium oder Stahl, in dem das
15 Phasenwechselmaterial 3 angeordnet ist. Die Phasenwechselspeicherzelle 2 kann geschlossen sein, sodass keine Volumenänderung des Phasenwechselmaterials 3 möglich ist, kann aber auch offen sein, sodass eine Volumenänderung möglich ist (isobare Zustandsänderung). Das Phasenwechselmaterial 3 liegt üblicherweise in Abhängigkeit vom Ladezustand in unterschiedlichen Phasen P1, P2 vor, beispielsweise fest und flüssig.
20 Zwischen den Phasen P1, P2 bildet sich eine Phasenwechselfront 4 aus. Dem Phasenwechselspeicher 1, oder einer Phasenwechselspeicherzelle 2 des Phasenwechselspeichers 1, kann an zumindest einer bestimmten Stelle Wärme \dot{Q} zugeführt oder entnommen werden (wie in Fig.1 angedeutet). Die zugeführte oder entnommene Wärme \dot{Q} ist beispielsweise die aus oder in einem Ruthsspeicher fließende Wärme. Es kann
25 auch eine entnommene Wärme \dot{Q}_v durch Verluste berücksichtigt werden, beispielsweise durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Konvektion.

Am Phasenwechselmaterial 3 sind zumindest zwei Messsensoren 5, 6 vorgesehen, mit denen an vorgesehenen Messstellen M zwei unterschiedliche thermodynamische Zustandsgrößen erfasst werden, wie nachfolgend noch im Detail beschrieben wird. Die
30 Messstellen M sind vorzugsweise örtlich über die Phasenwechselspeicherzelle 2 verteilt angeordnet, wobei zumindest eine Messstelle M auch im Phasenwechselmaterial 3 angeordnet sein kann.

Die Erfindung geht von einem Systemmodell 10 des Phasenwechselspeichers 1 aus, das den thermodynamischen Zustand des Phasenwechselspeichers 1 anhand von zumindest
35 einer Systemmodellgleichung, üblicherweise ein Gleichungssystem von Systemmodellgleichungen, beschreibt. Für die Modellierung des Phasenwechselspeichers 1

mit mehreren Phasenwechselspeicherzellen 2 reicht es üblicherweise aus, eine Phasenwechselspeicherzelle 2 zu modellieren. Das Systemmodell 10 des Phasenwechselspeichers 1 besteht dann aus einer Vielzahl einzelner Modelle der beteiligten Phasenwechselspeicherzellen 2, wobei auch Wärmeströme zwischen den Phasenwechselspeicherzellen 2 berücksichtigt werden können. Das Systemmodell 10 besteht damit aus zumindest einer Systemmodellgleichung, üblicherweise ein Gleichungssystem von Systemmodellgleichungen, einer Phasenwechselspeicherzelle 2. Das Systemmodell 10 umfasst insbesondere in einem Systemzustandsvektor \underline{x} zusammengefasste Systemzustandsgrößen x , einen Eingangsgrößenvektor \underline{u} mit zumindest einer Eingangsgröße u und einen Ausgangsgrößenvektor \underline{y} mit zumindest einer Ausgangsgröße y . Das Systemmodell 10 beschreibt damit zu jedem Zeitpunkt den Systemzustand in Form des Systemzustandsvektors \underline{x} und den Ausgangsgrößenvektor \underline{y} in Abhängigkeit vom Eingangsgrößenvektor \underline{u} . Für die Verwendung des Modells kann von einem bekannten Anfangszustand der Phasenwechselspeicherzelle 2 ausgegangen werden. Die zumindest eine Ausgangsgröße y des Ausgangsgrößenvektors \underline{y} ist eine an der Phasenwechselspeicherzelle 2 (bzw. am Phasenwechselmaterial 3) messbare thermodynamische Zustandsgrößen, wie der Druck, die Temperatur, das Volumen, oder ein Energiemaß (wie die innere Energie oder Enthalpie). Als messbare thermodynamische Zustandsgröße wird auch eine messbare physikalische Größe verstanden, aus denen eine thermodynamische Zustandsgröße ermittelt werden kann, wie beispielsweise die Dichte, die elektrische Leitfähigkeit, oder ein anderer messbarer Stoffparameter usw. Eine thermodynamische Zustandsgröße kann damit direkt gemessen werden, oder kann indirekt aus anderen gemessenen physikalischen Größen abgeleitet oder ermittelt werden.

In Fig.1 sind beispielhaft Temperatursensoren 5 im Phasenwechselmaterial 3 oder an der Phasenwechselspeicherzelle 2 vorgesehen, um die Temperaturen T an vorbestimmten Messstellen M als Ausgangsgrößen y zu messen. Bei der Verwendung von Temperatursensoren 5 ist zumindest ein Temperatursensor 5 vorgesehen, vorzugsweise mehrere über das Phasenwechselmaterial 3 verteilt angeordnete Temperatursensoren 5. Außerdem ist im gezeigten Ausführungsbeispiel ein Volumensensor 6 vorgesehen, um eine Volumenänderung als weitere Ausgangsgröße y an einer Messstelle M zu messen. Es sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass auch andere thermodynamische Zustandsgrößen als Ausgangsgrößen y mittels Messsensoren gemessen werden können und auch an anderen und/oder mehreren Messstellen M des Phasenwechselmaterials 3 oder der Phasenwechselspeicherzelle 2.

Ein solches Systemmodell 10 beschreibt insbesondere die örtliche Verteilung der Systemzustandsgrößen x im System (hier beispielsweise im Phasenwechselmaterial 3 einer Phasenwechselspeicherzelle 2), etwa als Feld der spezifischen Enthalpie, der spezifischen inneren Energie, der Gibbs-Energie, oder der Temperaturen.

- 5 Als zumindest eine Eingangsgröße u des Eingangsgrößenvektors \underline{u} kann die dem Phasenwechselmaterial 3 zugeführte oder die aus diesem entnommene Prozesswärme \dot{Q} verwendet werden. Auch die aufgrund üblicher Verluste entnommene Wärme \dot{Q}_V , beispielsweise durch Wärmestrahlung, Konvektion bzw. Wärmeleitung in die Umgebung oder Wärmeabfluss an benachbarte Phasenwechselspeicherzellen 2, kann als (weitere)
- 10 Eingangsgröße u des Modells betrachtet werden. Die Eingangsgrößen u sind beispielsweise aufgrund der Betriebsführung des Phasenwechselspeichers 1 (zugeführte, entnommene Wärme) bekannt, oder können sich auch aufgrund des bekannten konstruktiven Aufbaus des Phasenwechselspeichers 1 oder einer Phasenwechselspeicherzelle 2 ergeben (z.B. Wärmestrom aufgrund von Verlusten).
- 15 Das Systemmodell 10 umfasst auch Modellparameter θ , wie die Dichte des Phasenwechselmaterials 3, die Wärmekapazität des Phasenwechselmaterials 3, die Wärmeleitfähigkeit des Phasenwechselmaterials 3 oder die dynamische Viskosität des Phasenwechselmaterials 3, wobei ein Modellparameter θ auch abhängig von zumindest einer thermodynamischen Zustandsgröße, beispielsweise der Temperatur T , sein kann. Ein
- 20 oder mehrere Modellparameter θ können auch in einem Modellparametervektor $\underline{\theta}$ zusammengefasst werden.

Es sei angemerkt, dass zwischen dem Systemzustandsvektor \underline{x} , welcher die abhängige Größe im Systemmodell 10 darstellt, und den thermodynamischen Zustandsgrößen, z.B. spezifische Enthalpie h , Temperatur T , Druck p , spezifisches Volumen v , die den

25 thermodynamischen Zustand des Phasenwechselmaterials 3 beschreiben, zu unterscheiden ist. Der Systemzustandsvektor \underline{x} kann thermodynamische Zustandsgrößen beinhalten, aber auch andere das Phasenwechselmaterial 3 oder die Phasenwechselspeicherzelle 2 beschreibende physikalischen Größen.

Das thermodynamische Systemmodell 10 des Phasenwechselspeichers 1 kann in Form

30 eines Gleichungssystems von Differentialgleichungen (zumindest eine Systemgleichung) beschrieben sein und kann allgemein in üblicher Schreibweise als

$$\frac{dx}{dt} = f_E(x, \underline{\theta}, \underline{u})$$

$$\underline{y} = f_A(x)$$

angeschrieben werden, mit der Zeit t , dem Ausgangsgrößenvektor \underline{y} mit den Ausgangsgrößen y , dem Eingangsgrößenvektor \underline{u} mit den Eingangsgrößen u , dem Systemzustandsvektor \underline{x} mit den Systemzustandsgrößen x und den Modellparametern θ , die im Modellparametervektor $\underline{\theta}$ zusammengefasst sind. Die Eingangsfunktion f_E und die

5 Ausgangsfunktion f_A ergeben sich aus der Modellierung. Ebenso werden durch die Modellierung festgelegt, welcher Systemzustandsvektor \underline{x} , sowie welcher

Eingangsgrößenvektor \underline{u} und welcher Modellparametervektor $\underline{\theta}$ verwendet werden. Die Systemzustandsgrößen x sind darin örtlich verteilt beschrieben, in Fig.1 beispielsweise mit einer vorgegebenen Auflösung örtlich verteilt in x- und y-Richtung.

10 Das Systemmodell 10 kann vorzugsweise über den gesamten Arbeitsbereich des Phasenwechselfspeichers 1 die Parameterabhängigkeit bzw. die erforderlichen, weiter unten erläuterten Empfindlichkeiten ausdrücken, um so den nachfolgend beschriebenen

Optimalbeobachter passend informieren zu können. Es wird ferner vorausgesetzt, dass die Empfindlichkeiten der Ausgangsgrößen y bezüglich des Systemzustandsvektors \underline{x} , und

15 gegebenenfalls auch bezüglich der Modellparameter θ , gebildet werden können.

Die Ausgangsfunktion f_A wird so formuliert, dass damit die Ausgangsgrößen y zumindest an den Messstellen M unterschiedlicher thermodynamischer Zustandsgrößen, also an den Stellen, an denen die zumindest zwei Messensoren 5, 6 angeordnet sind, ausgedrückt werden. Die Ausgangsgrößen y sind eine Funktion der Systemzustandsgrößen x , die

20 wiederum durch die Eingangsfunktion f_E ausgedrückt werden. Die Systemzustandsgrößen x sind damit über das ganze Phasenwechselmaterial 3 bekannt. Damit kann eine Ausgangsgröße y beispielsweise eine Systemzustandsgröße x an der Messstelle M des

Messensors 5, 6 sein. Wird beispielsweise mit einem Temperatursensor 5 an einer bestimmten Messstelle M die Temperatur am Phasenwechselmaterial 3 gemessen, dann

25 entspricht die mit dem Systemmodell 10 ermittelte Temperatur (in diesem Fall als Systemzustandsgröße x) an dieser Messstelle M der Ausgangsgröße y . Wenn die

Ausgangsgröße y keine Systemzustandsgröße x des Systemmodells 10 ist, beispielsweise das Volumen des Phasenwechselmaterials 3, dann kann eine solche Ausgangsgröße y aus den vorhandenen Systemzustandsgrößen x des Systemmodells 10 ermittelt werden.

30 Die thermodynamische Modellierung des Phasenwechselmaterials 3 kann auf Basis der Erhaltungsgesetze formuliert werden, also der Massenerhaltung, der Energieerhaltung und der Impulserhaltung, beispielsweise wie im eingangs erwähnten Dokument *Pernsteiner D. et al.* für den isobaren Fall beschrieben. Das Systemmodell 10 umfasst in einer solchen

Formulierung zumindest die Energieerhaltung. Das Phasenwechselmaterial 3 kann damit beispielsweise allgemein mit den partiellen Differentialgleichungen

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla \cdot (\nabla T) - \rho c (\underline{v} \cdot \nabla) T$$

$$\left[\begin{array}{l} \nabla \cdot \underline{v} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + (\underline{v} \cdot \nabla) \underline{v} \right) - \mu \nabla \cdot (\nabla \underline{v}) + \nabla p = \underline{f} + \underline{S}_v \end{array} \right]$$

in einer Temperaturformulierung beschrieben werden, die die instationäre

- 5 Energiebilanzgleichung (Energieerhaltung), die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes Gleichung (von oben nach unten) darstellen. Die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes Gleichung sind optional, was durch die eckige Klammer ausgedrückt ist. Das Phasenwechselmaterial 3 kann gleichwertig auch in einer Enthalpieformulierung beschrieben werden, in der die Enthalpie h die abhängige Größe ist und nicht die Temperatur T (wie im
- 10 Beispiel oben). Auch eine Formulierung in einer anderen thermodynamischen Zustandsgröße ist denkbar. Bei anderen als isobaren Zustandsänderungen ergeben sich andere Formulierungen.

Darin bezeichnet „ \cdot “ das Skalarprodukt, T bezeichnet das Temperaturfeld $T(x, y, z, t)$ für ein kartesisches Koordinatensystem $[x, y, z]$ zum Zeitpunkt t (wobei auch ein beliebiges

- 15 anderes Koordinatensystem verwendet werden kann) für das Phasenwechselmaterial 3 (im zweidimensionalen Fall entsprechend $T(x, y, t)$) und $\underline{v} = [v_x, v_y, v_z]$ bezeichnet das Geschwindigkeitsfeld des Phasenwechselmaterials 3 mit den räumlichen Geschwindigkeitskomponenten $v_x(x, y, z, t)$, $v_y(x, y, z, t)$, $v_z(x, y, z, t)$ (bzw. $\underline{v} = [v_x, v_y]$ mit $v_x(x, y, t)$, $v_y(x, y, t)$ im zweidimensionalen Fall). $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y, \partial / \partial z)$ bezeichnet
- 20 den Nabla-Operator für ein kartesisches Koordinatensystem $[x, y, z]$ (im zweidimensionalen Fall entsprechend $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$). ρ bezeichnet die Dichte des

Phasenwechselmaterials 3, c die Wärmekapazität des Phasenwechselmaterials 3,

k die Wärmeleitfähigkeit des Phasenwechselmaterials 3 und μ die dynamische Viskosität des Phasenwechselmaterials 3, die für ein bestimmtes Phasenwechselmaterial 3 bekannt

- 25 sind. Die Wärmekapazität c kann von der Temperatur T abhängig sein, beispielsweise gemäß

$$c = \begin{cases} c_S & \text{für } T_m - \varepsilon > T \\ \frac{\Delta h_m + c_S (T_m + \varepsilon - T) + c_L (T - \varepsilon - T_m)}{2\varepsilon} & \text{für } T_m - \varepsilon \leq T \leq T_m + \varepsilon \\ c_L & \text{für } T > T_m + \varepsilon \end{cases}$$

Darin bezeichnet ΔI_m die spezifische latente Wärme (bezogen auf Masse), T_m die Schmelztemperatur des Phasenwechsellmaterials, ε den Temperaturbereich des Phasenwechsels (Mushy Region) und c_S und c_L die Wärmekapazitäten des Phasenwechsellmaterials 3 in den beiden möglichen Phasen (z.B. fest, flüssig) des Phasenwechsellmaterials 3, die für ein bestimmtes Phasenwechsellmaterial 3 bekannt sind.

5 f bezeichnet die auf das Phasenwechsellmaterial 3 wirkende Kraftdichte in Form der Auftriebskraft des Phasenwechsellmaterials 3, die in Form $f = \rho G$ ausgedrückt werden kann, mit der Dichte ρ (die üblicherweise temperaturabhängig formuliert wird, beispielsweise mit einer bekannten Boussinesque Approximation) und dem

10 Beschleunigungsvektor $G = -g \begin{bmatrix} \cos \Phi \\ \sin \Phi \end{bmatrix}$ (im zweidimensionalen Fall) der Erdbeschleunigung g in Abhängigkeit von der Lage des Phasenwechsellmaterials 3 im Raum. Wenn die Phasenwechselspeicherzelle 2 mit dem Phasenwechsellmaterial 3 gegenüber der Vertikalen um den Winkel Φ geneigt ist und das kartesische Koordinatensystem mit der Phasenwechselspeicherzelle 2 mitgeneigt wird, dann ergibt sich eine Komponente der

15 Erdbeschleunigung g in den beiden Koordinatenrichtungen x, y .

Der Impulsquellterm S_v kann so gewählt werden, dass dieser Term für eine Phasenwechselspeicherzelle 2 in einer ersten Phase P1 (z.B. in flüssigen Zustand) Null wird und in einer zweiten Phase P2 (z.B. im festen Zustand) einen sehr großen Wert annimmt. Dazwischen kann der Wert des Impulsquellterms S_v in Abhängigkeit vom Anteil der Phasen

20 P1, P2 ermittelt werden. Für andere mögliche Phasenzustände kann der Impulsquellterm S_v auch anders gewählt werden. Der Impulsquellterm S_v kann auch ganz wegfallen.

Das Systemmodell 10 wird durch zumindest eine Randbedingung komplettiert, die sich aus der konkreten Konfiguration einer Phasenwechselspeicherzelle 2 ableiten lässt. Randbedingungen werden beispielsweise an den Rändern R1, R2, R3, R4 der

25 Phasenwechselspeicherzelle 2 definiert. Beispielsweise kann der oberen und unteren Rand R2, R4 adiabat (also ohne Wärmeaustausch) definiert werden in der Form $\dot{q}|_{R2,R4} = 0$, mit dem spezifischen Wärmefluss \dot{q} . An den seitlichen Rändern R1, R3 wird im dargestellten Ausführungsbeispiel Wärme zugeführt oder entnommen. Demnach können an diesen Rändern R1, R3 die Randbedingungen mit den spezifischen Wärmestrom über die Ränder

30 R1, R3 wie folgt definiert werden, $\dot{q}|_{R1} = \alpha_{out} (T(x, y, t) - T_{out})$ und $\dot{q}|_{R3} = \alpha_{in} (T(x, y, t) - T_{in})$. Darin bezeichnen α_{out} , α_{in} die bekannten Wärmeübergangskoeffizienten an den Rändern R1, R3 und T_{out} , T_{in} , die bekannten Randtemperaturen an den Wänden der Ränder R1, R3.

Damit werden die Randbedingungen des Systemmodells 10 unter Verwendung der Eingangsgrößen u formuliert. Mit den bekannten Wärmeflüssen \dot{Q} , \dot{Q}_V an den Rändern (beispielsweise durch Messung) können die Temperaturen entlang der Ränder ermittelt werden.

- 5 Für das Geschwindigkeitsfeld $\underline{v}=[v_x, v_y]$ kann als Randbedingung angesetzt werden $\underline{v}|_{R1,R2,R3,R4}=\underline{0}$. Ferner kann für jedes feste Phasenwechselmaterial 3 in der Phasenwechselspeicherzelle 2 als Randbedingung $\underline{v}=0$ angesetzt werden. Gleiches kann für ein nicht vollständig flüssiges Phasenwechselmaterial 3 angenommen werden.

- Die obigen partiellen Differentialgleichungen mit den Randbedingungen beschreiben in einer
 10 zweidimensionalen Modellierung über das örtliche Temperaturfeld $T(x, y, t)$ und das örtliche Geschwindigkeitsfeld $\underline{v}=[v_x, v_y]$ den thermodynamischen Zustand des gesamten Phasenwechselmaterials 3 in der betrachteten Phasenwechselspeicherzelle 2. Das Temperaturfeld $T(x, y, t)$ und das Geschwindigkeitsfeld $\underline{v}=[v_x, v_y]$ sind demzufolge die Systemzustandsgrößen x des Modells. Die Eingangsgrößen u (zu- und abgeführte Wärme)
 15 werden über die Randbedingungen abgebildet. Die Ausgangsgrößen y entsprechen zumindest den an den Messtellen M der Messsensoren 5, 6 ermittelten Größen.

- Das oben beschriebene Systemmodell 10 ist insbesondere auch in der Lage den Wärmeübergang im Phasenwechselmaterial 3 aufgrund von Konvektion und Konduktion mit hoher Genauigkeit zu simulieren, was es letztendlich auch ermöglicht, den
 20 thermodynamischen Zustand des Phasenwechselmaterials 3 mit höherer Genauigkeit zu beschreiben.

- Dieses System aus Differentialgleichungen ist in der vorliegenden Form aber in der Regel nicht direkt lösbar. Daher werden die Differentialgleichungen, zumindest die Energiegleichung und die Navier-Stokes Gleichung (falls vorhanden), vorzugsweise räumlich
 25 diskretisiert und numerisch gelöst, wie beispielsweise ebenfalls in *Pernsteiner D. et al.* beschrieben. Hierfür können unter anderem Finite-Element-Methoden (FEM), Finite-Volumen-Methoden (FVM) oder Finite-Differenzen-Methoden (FDM) zur Anwendung kommen. Das sind bekannte numerische Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen.

- 30 Die grundlegende Idee der FDM ist es, die Ortsableitungen in der Differentialgleichung an endlich vielen (=„finiten“), äquidistanten Gitterpunkten durch Differenzenquotienten zu approximieren. Die approximierten Lösungen der Differenzialgleichung an den Gitterpunkten lassen sich dann durch das entsprechende Gleichungssystem berechnen. Vorzugsweise

werden die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes Gleichung des Modells mit FDM gelöst.

Bei einem FEM oder FVM Ansatz wird das Berechnungsgebiet der Phasenwechselspeicherzelle 2 (mit dem Phasenwechselmaterial 3) in eine große Anzahl von endlich kleinen (finiten) Elementen unterteilt. Für diese Elemente werden Ansatzfunktionen herangezogen (z. B. lokale Ritz-Ansätze, Galerkin Ansatz je Element), die beschreiben, wie ein Element auf äußere Einflüsse und Randbedingungen reagiert. Diese Ansatzfunktionen werden für alle Elemente in die zu lösenden Differentialgleichungen eingesetzt, woraus sich unter Berücksichtigung von Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen ein Gleichungssystem ergibt. Dieses Gleichungssystem wird schrittweise (in einem vorgegebenen Zeitschritt) fortschreitend in der Zeit gelöst. Diese Lösungen des Gleichungssystems stellen die Näherungslösung der zugrundeliegenden Differentialgleichung über den simulierten Zeitraum dar. Vorzugsweise wird die Energiegleichung des Modells mit FEM gelöst.

Für einen FEM Ansatz können beispielsweise bilineare rechteckige Elemente mit vier Knoten verwendet werden, um die Finite-Elemente Darstellung des Temperaturfeldes $T = N \{T\}$ (analog auch im Falle einer anderen thermodynamischen Zustandsgröße wie der Enthalpie h) zu erhalten. Darin bezeichnet $N = [N_1, N_2, \dots, N_{non}]$ den Vektor der Ansatzfunktionen für die Anzahl non der Knoten der Elemente und $\{ \}$ steht für einen Vektor ($non \times 1$) mit den Werten an den Knotenpunkten der Elemente. Die Verwendung dieser Finite-Elemente Darstellung und die Anwendung von Galerkins Methode führt zu einem System gewöhnlicher Differentialgleichungen $C \{\dot{T}\} + K \{T\} = R$ (die Matrizen C , K und der Vektor R ergeben sich), das gelöst werden kann, um die Werte der Temperatur an den Knotenpunkten der Elemente zu erhalten. In analoger Weise können die Geschwindigkeitsfeldkomponenten ausgedrückt und berechnet werden.

Da sich bei FEM und FDM Methoden in der Regel sehr große Gleichungssysteme ergeben, können auch bekannte Methoden der Modellreduktion verwendet werden, um die Komplexität zu reduzieren, indem die Anzahl der systembeschreibenden FEM / FVM oder FDM Gleichungen reduziert wird, ohne das charakteristische Verhalten wesentlich zu ändern. Damit kann die Rechenzeit deutlich reduziert werden, insbesondere so weit, dass mit aktuell einfach verfügbaren Computern die Simulation in oder schneller als Echtzeit (im Sinne eines vorgegeben einzuhaltenden Zeitschritts, in dem die Berechnung abgeschlossen sein muss) durchgeführt werden kann.

Zur Berechnung des örtlich verteilten thermodynamischen Zustands des Phasenwechselmaterials 3 mit dem Systemmodell 10 könnte zuerst mit der

Energiegleichung das Temperaturfeld $T(x, y, t)$ numerisch ermittelt werden (z.B. mit FEM), oder in einer Enthalpieformulierung das Enthalpiefeld. Mit dem Temperaturfeld $T(x, y, t)$, oder dem Enthalpiefeld, kann dann optional aus der Kontinuitätsgleichung und der Navier-Stokes Gleichung numerisch das Geschwindigkeitsfeld $\underline{v}=[v_x, v_y]$ mit den

5 Geschwindigkeitsfeldskomponenten v_x, v_y ermittelt werden (z.B. mit FDM). Das Temperaturfeld $T(x, y, t)$ wird beispielsweise über die Kraftdichte f berücksichtigt. Damit können die benötigten Ausgangsgrößen y an den vorgesehenen Messtellen M ermittelt werden.

Mit einem solchen Systemmodell 10 des Phasenwechselmaterials 3, beispielsweise in einer
10 Phasenwechselspeicherzelle 2 oder einem Phasenwechselspeicher 1, kann folglich zu jedem Zeitpunkt t , üblicherweise in vorgegebenen diskreten Zeitschritten k , der örtlich verteilte thermodynamische Zustand des Phasenwechselmaterials 3 aus einer am Phasenwechselmaterial 3 gemessenen Größe, beispielsweise Temperaturen T , und ausgehend vom thermodynamischen Zustand zu einem vorhergehenden Zeitpunkt
15 (üblicherweise im vorhergehenden Zeitschritt $k-1$) ermittelt werden, beispielsweise in Form eines Temperaturfeldes $T(x, y, z, t)$ und Geschwindigkeitsfeldes $\underline{v}=[v_x(x, y, z, t), v_y(x, y, z, t)]$ über das Phasenwechselmaterial 3.

Das oben beschriebene thermodynamische Systemmodell 10 der Phasenwechselspeicherzelle 2 kann in einem Beobachter verwendet werden, um den
20 Systemzustandsvektor \underline{x} des Systemmodells 10 aus dem bekannten Eingangsgrößenvektor \underline{u} (beispielsweise aufgrund der Prozessführung des Phasenwechselspeichers 1) und bekannten (beispielsweise gemessenen) Ausgangsgrößen y zu rekonstruieren. Mit dem Systemzustandsvektor \underline{x} kann dann beispielsweise ein Ladezustand SOC des Phasenwechselmaterials 3 ermittelt werden. Dieses Vorgehen ist beispielsweise in EP 3 336
25 473 A1 beschrieben.

Dieses Vorgehen ist allerdings in der vorliegenden Anwendung aufgrund der zu erwartenden allgemein fehlerbehafteten Messgrößen der Ausgangsgrößen y und aufgrund der Modellfehler nicht zweckmäßig. Beispielsweise sind die Temperaturmessungen selbst im Allgemeinen mit Störungen behaftet (Kalibrationsfehler, Rauschen des Messsignals usw.),
30 und auch das thermodynamische Systemmodell 10 enthält natürlich Modell- und Modellparameterfehler. Um diese Fehler wohldefiniert auszubalancieren wird erfindungsgemäß anders vorgegangen, um eine genauere und zuverlässigere Schätzung des Ladezustandes SOC zu erhalten, wie anhand der Fig.2 erläutert wird.

Wie eingangs ausgeführt, kann sich der Informationsgehalt einer messbaren Ausgangsgröße y mit sich ändernden Systemzustandsgrößen x im Systemzustandsvektor \underline{x} ändern. Um dieses Problem zu umgehen, werden im Systemmodell 10 erfindungsgemäß zumindest zwei verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen als Ausgangsgrößen y verwendet und es werden die Empfindlichkeiten E dieser Ausgangsgrößen y berücksichtigt. Die entsprechenden Empfindlichkeiten E der messbaren Ausgangsgrößen y bezüglich Änderungen im Systemzustandsvektor \underline{x} quantifizieren den Informationsgehalt der Messgrößen. Die Empfindlichkeiten E werden als Ableitung der Ausgangsgrößen y nach den $i \geq 1$ Systemzuständen x_i im Systemzustandsvektor \underline{x} ausgedrückt, also

$$E = \frac{dy}{dx} = \left[\frac{dy}{dx_1}, \dots, \frac{dy}{dx_i} \right]. \text{ Diese Ableitungen können numerisch oder analytisch bestimmt werden.}$$

Falls das Systemmodell 10 unbekannte oder unsichere Modellparameter θ enthält, dann kann der Systemzustandsvektor \underline{x} um diese erweitert werden, um die unbekannt Modellparameter θ mit dem Systemzustandsvektor \underline{x} mitzuschätzen. In diesem erweiterten Systemzustandsvektor \underline{x} können folglich auch zu schätzende Modellparameter θ enthalten sein. Die Empfindlichkeiten E werden damit hinsichtlich dieses erweiterten Systemzustandsvektor \underline{x} ausgedrückt. Die Empfindlichkeit E umfasst somit die Ableitungen der Ausgangsgrößen y nach dem Systemzustandsvektor \underline{x} , was gegebenenfalls die zu schätzenden Modellparametern θ umfasst. Diese Ableitungen können numerisch oder analytisch bestimmt werden.

Die Erfindung geht daher von einem thermodynamischen Systemmodell 10 wie oben beschrieben aus, das zumindest zwei verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen an bestimmten vorgesehenen Messstellen M als Ausgangsgrößen y aufweist, also beispielsweise Temperatur, Volumen, Druck, elektrische Leitfähigkeit usw., von welchen vorzugsweise zumindest eine Ausgangsgröße y über den Arbeitsbereich der Phasenwechselspeicherzelle 2 stets eine nicht verschwindende Empfindlichkeit $E \neq 0$ hat. Als solche thermodynamischen Zustandsgrößen eignen sich beispielsweise die Temperatur oder die Enthalpie und das Volumen oder der Druck. Dies sichert gute Beobachtbarkeit des Systemmodells 10 im gesamten Arbeitsbereich des Phasenwechselmaterials 3.

Anhand des Systemmodells 10 der Phasenwechselspeicherzelle 2 und dem bekannten Eingangsgrößenvektor \underline{u}_k wird zum aktuellen Zeitschritt k der mit dem Systemmodell 10 prädizierte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ (was die prädizierten Modellparameter $\hat{\underline{\theta}}_{M,k}$

umfassen kann, wie in Fig.2 angedeutet) sowie der prädizierte Ausgangsgrößenvektor $\hat{\underline{y}}_{M,k}$, der die Ausgangsgrößen y_k an den Messstellen M enthält, ermittelt (beispielsweise wie oben beschrieben). Aus $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ können in einer Empfindlichkeitsberechnungseinheit 12 die Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ hinsichtlich der

5 Systemzustandsgrößen x im Systemzustandsvektor \underline{x} ermittelt werden, z.B. $E = \frac{d\hat{y}_{M,k}}{dx}$. Im

aktuellen Zeitschritt k werden die Ausgangsgrößen y_k an den Messtellen M der

Messensoren 5, 6 auch gemessen. Auch die Eingangsgrößen im Eingangsgrößenvektor \underline{u}_k können mittels geeigneter Messensoren gemessen werden, oder auch aus anderen Quellen erhalten werden. Die prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$, die gemessenen Ausgangsgrößen

10 y_k und die Empfindlichkeiten E werden einem Beobachter 11 übermittelt. Im Beobachter 11 wird in Abhängigkeit vom Unterschied zwischen den prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ und den gemessenen Ausgangsgrößen y_k , sowie den Empfindlichkeiten E eine Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$

der Systemzustandsgrößen x im Systemzustandsvektor \underline{x} ermittelt. Der Beobachter 11

kann auch eine Korrektur $\underline{\theta}_{korr,k}$ der Modellparameter θ im Modellparametervektor $\underline{\theta}$ des

15 Modells 10, die im Systemzustandsvektor \underline{x} enthalten sein können, ermitteln, wie in Fig.2

angedeutet. Zur Ermittlung der Korrektur(en) kann der Beobachter 11 auch das

Systemmodell 10 der Phasenwechselspeicherzelle 2 nutzen, wie in Fig.2 angedeutet. In

einer Korrekturereinheit 13 wird der im aktuellen Zeitschritt k mit dem Systemmodell 10

ermittelte prädizierte Systemzustand $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ mit der Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ korrigiert, um den

20 geschätzten Systemzustand $\hat{\underline{x}}_k$ im Zeitschritt k zu ermitteln. Aus dem geschätzten

Systemzustand $\hat{\underline{x}}_k$ kann dann in einer Ladezustandsberechnungseinheit 14 der Ladezustand

SOC ermittelt werden.

Es sei angemerkt, dass die Empfindlichkeiten E nicht zwingend in jedem Zeitschritt k ermittelt werden müssen, weil angenommen werden kann, dass sich die Empfindlichkeiten

25 $E = \frac{d\hat{y}_{M,k}}{dx}$ in der Phasenwechselspeicherzelle 2 nicht rasch ändern. Es reicht damit aus,

wenn die Empfindlichkeiten E in größeren, vorgegebenen Zeitschritten (beispielsweise ein ganzes Vielfaches des Zeitschrittes k) ermittelt werden. Das kann helfen, den

Rechenaufwand für die Ermittlung des geschätzten Systemzustands $\hat{\underline{x}}_k$ zu verringern.

Das Systemmodell 10, die Empfindlichkeitsberechnungseinheit 12, die Korrekturereinheit 13 und die Ladezustandsberechnungseinheit 14 sind üblicherweise Softwarekomponenten, die auf einer Computerhardware, oder auch auf einer verteilten Computerhardware, implementiert sind und dort ablaufen. Natürlich sind auch andere Implementierungen denkbar, wie beispielsweise als integrierter Schaltkreis (IC), beispielsweise als anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) oder Field Programmable Gate Array (FPGA).

Das Systemmodell 10 wird somit erfindungsgemäß anhand von Messungen der Ausgangsgrößen y_k laufend angepasst, um damit den örtlich verteilten thermodynamischen Zustand der Phasenwechselspeicherezelle 2 präziser schätzen zu können.

Die Empfindlichkeiten E werden im Beobachter 11 berücksichtigt, um die Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ des Systemzustandsvektors \underline{x} , und gegebenenfalls die Korrektur $\underline{\theta}_{korr,k}$ des Modellparametervektors $\underline{\theta}$ des Systemmodells 10, zu ermitteln. Die Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ des Systemzustandsvektors \underline{x} , und gegebenenfalls die Korrektur $\underline{\theta}_{korr,k}$ des

Modellparametervektors $\underline{\theta}_k$, ist damit abhängig von den Empfindlichkeiten E , den prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ und den gemessenen Ausgangsgrößen y_k . Nachdem die Empfindlichkeiten E der Ausgangsgrößen y bezogen auf den Systemzustandsvektor \underline{x} (was auch die zu schätzenden Modellparameter θ umfassen kann), definiert sind, werden diejenigen Komponenten des Systemzustandsvektors \underline{x} , die den größten Einfluss auf die Ausgangsgrößen y haben, am stärksten korrigiert. Gleichzeitig werden aufgrund dieser Empfindlichkeiten E nur solche Ausgangsgrößen y für die Korrektur des Systemmodells 10 berücksichtigt, die vom aktuellen Zustand des Phasenwechselmaterials 3 beeinflusst werden.

Der Beobachter 11 könnte beispielsweise als bekannter Extended Kalman Filter oder bekannter Moving Horizon Estimator ausgeführt sein.

Ein Moving Horizon Estimator verwendet in jedem Zeitschritt k eine Kostenfunktion J_k als Funktion f_J des tatsächlich an den vorgesehenen Messstellen M gemessenen Ausgangsgrößenvektors \underline{y}_k , der mit dem Systemmodell 10 an diesen Messstellen M

geschätzten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$, den Empfindlichkeiten E und der Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ des

Systemzustandsvektors \underline{x}_k , und gegebenenfalls (ausgedrückt durch die eckige Klammer) die

Korrektur $\underline{\theta}_{korr,k}$ des Modellparametervektors $\underline{\theta}_k$, also $J_k = f_J \left(\hat{y}_{M,k}, \underline{y}_k, E, \underline{x}_{korr,k} \left[\underline{\theta}_{korr,k} \right] \right)$,

um daraus die Korrekturen $\underline{x}_{korr,k}$, $\underline{\theta}_{korr,k}$ durch Optimierung der Kostenfunktion J_k zu ermitteln. In der Kostenfunktion J_k können auch m vorhergehende Zeitschritte berücksichtigt werden (daher Moving Horizon), beispielsweise in der Form

$$J_k = \sum_{j=k-m+1}^k f_J(\hat{y}_{M,j}, y_j, E, \underline{x}_{korr,j}, [\underline{\theta}_{korr,j}]).$$

- 5 optimiert (üblicherweise minimiert, aber auch Maximierung ist denkbar), um diejenigen Korrekturen $\underline{x}_{korr,k}$ des Systemzustandsvektors \underline{x} , und gegebenenfalls die Korrekturen $\underline{\theta}_{korr,k}$ des Modellparametervektors $\underline{\theta}$, zu finden, die die Abweichung zwischen den geschätzten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ und den tatsächlich gemessenen Ausgangsgrößen y_k minimiert. Mathematisch kann das beispielsweise in der Form $\min_{\underline{x}_{korr,k}, \underline{\theta}_{korr,k}} (J_k) \rightarrow \underline{x}_{korr,k}, \underline{\theta}_{korr,k}$ ausgedrückt werden.

Die Kostenfunktion J_k könnte unter Beachtung von m Messungen vergangener Zeitschritte

$$\text{in der Form } J_k = \left(\sum_{j=k-m+1}^k \left(\|y_j - \hat{y}_{M,j}\|^2 + \|\underline{x}_{korr,j}\|^2 \right) \right),$$

mit der euklidischen Vektornorm $\|\cdot\|^2$, ausgedrückt werden (hier ohne Berücksichtigung von zu korrigierenden Modellparametern). Natürlich könnte auch eine andere Vektornorm verwendet werden.

- 15 Die Optimierung der Zielfunktion J_k kann beispielsweise in jedem Zeitschritt k iterativ erfolgen, wobei in jedem Iterationsschritt die Korrekturen $\underline{x}_{korr,k}$, und gegebenenfalls $\underline{\theta}_{korr,k}$, nach vorgegebenen Regeln des angewendeten Optimierungsalgorithmus, verändert werden. Der verwendete Optimierungsalgorithmus sorgt dafür, dass der Wert der Zielfunktion J_k dabei gegen ein Optimum (Maximum, Minimum) konvergiert. Durch ein definiertes
- 20 Abbruchkriterium der Optimierung, beispielsweise eine bestimmte Anzahl von Iterationsschritten oder eine erreichte Abweichung der Werte der Zielfunktion aufeinanderfolgender Iterationsschritte, wird die Iteration beendet und die im letzten Iterationsschritt ermittelten Korrekturen $\underline{x}_{korr,k}$, und gegebenenfalls $\underline{\theta}_{korr,k}$, werden in der Korrekturereinheit 13 für die Korrektur des Systemmodells 10 verwendet.

- 25 Häufig wird für die Optimierung ein bekanntes Gradientenverfahren verwendet, bei dem in jedem Iterationsschritt neue Korrekturen $\underline{x}_{korr,k}$, und gegebenenfalls $\underline{\theta}_{korr,k}$, entlang des

Gradienten $\frac{dy}{dx}$ der Ausgangsgröße y gesucht wird. Es ist ersichtlich, dass der Gradient

den Empfindlichkeiten E entspricht, womit die Empfindlichkeiten E bei der Optimierung berücksichtigt werden.

Ein Extended Kalman Filter basiert bekanntermaßen auf einer Berechnungsvorschrift, um ausgehend von einem bekannten, vergangenen Systemzustandsvektor \underline{x} , und gegebenenfalls Modellparametern $\underline{\theta}$, den aktuellen Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_k$, und gegebenenfalls den zu schätzenden Modellparametervektor $\hat{\underline{\theta}}_k$, zu schätzen. Dazu wird in der Berechnungsvorschrift des Extended Kalman Filters auch eine Jacobi-Matrix der Ausgangsgleichung f_A des Systemmodells 10 verwendet. Die Jacobi-Matrix enthält die Ableitungen der Ausgangsgrößen y nach dem Systemzustandsvektor \underline{x} , und gegebenenfalls nach dem Modellparametervektor $\underline{\theta}$, und somit die Empfindlichkeiten E , welche von der oben beschriebenen Modellformulierung bereitgestellt werden. Damit werden die Empfindlichkeiten E beim Extended Kalman Filter berücksichtigt.

Die Korrekturen $\underline{x}_{\text{kor},k}$, und gegebenenfalls $\underline{\theta}_{\text{kor},k}$, könnten direkt der geschätzte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_k$ oder der geschätzte Modellparametervektor $\hat{\underline{\theta}}_k$ sein. In diesem Fall besteht die Korrektur des mit dem Systemmodell 10 ermittelten (prädizierten) Systemzustandsvektors $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ in der Korrektereinheit 13 darin, dass der ermittelte (prädizierte) Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ durch die Korrektur $\underline{x}_{\text{kor},k}$ ersetzt wird, also ergibt sich der geschätzte Systemzustandsvektor zu $\hat{\underline{x}}_k = \underline{x}_{\text{kor},k} + \hat{\underline{x}}_{M,k}$. Es ist aber auch möglich die Korrekturen $\underline{x}_{\text{kor},k}$, und gegebenenfalls $\underline{\theta}_{\text{kor},k}$, als Änderungen $\Delta\underline{x}_k$ des mit dem Systemmodell 10 prädizierten Systemzustandsvektors $\hat{\underline{x}}_{M,k}$, und gegebenenfalls Änderungen $\Delta\underline{\theta}_k$ des prädizierten Modellparametervektors $\hat{\underline{\theta}}_{M,k}$, zu definieren. Der geschätzte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_k$ ergibt sich dann beispielsweise zu $\hat{\underline{x}}_k = \hat{\underline{x}}_{M,k} + \Delta\underline{x}_k$, und der geschätzte Modellparametervektor $\hat{\underline{\theta}}_k$ ergibt sich zu $\hat{\underline{\theta}}_k = \hat{\underline{\theta}}_{M,k} + \Delta\underline{\theta}_k$.

Der Modellparametervektor $\underline{\theta}$ wird vorzugsweise für den nächsten Zeitschritt $k+1$ korrigiert, d.h. dass erst im nächsten Zeitschritt $k+1$ die Modellparameter $\underline{\theta}$ im Modellparametervektor $\underline{\theta}$ des Systemmodells 10 mit den im vorhergehenden Zeitschritt k ermittelten Korrekturen $\underline{\theta}_{\text{kor},k}$ aktualisiert werden.

Der korrigierte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_k$ stellt eine optimale Schätzung des örtlich verteilten thermodynamischen Zustands des Phasenwechselmaterials 3 dar und kann für die optimale Schätzung des Ladezustandes *SOC* herangezogen werden. Als Ladezustand kann beispielsweise ein Energiemaß herangezogen werden, z.B. eine aktuelle Enthalpie bezogen auf eine Gesamtenthalpie des Phasenwechselmaterials 3 in einer bestimmten Phase P1, P2

(z.B. fest oder flüssig). Der Ladezustand SOC kann aber auch beliebig anders berechnet werden, wie eingangs ausgeführt. Der Ladezustand ist in der Regel ein absoluter Wert für das Phasenwechselmaterial 3 und keine über das Phasenwechselmaterial 3 örtlich verteilte Größe (ein Feld). Allgemein beschreibt der Ladezustand SOC die noch verfügbare Wärme-Speicherkapazität einer Phasenwechselspeicherzelle 2 im Verhältnis zu einem definierten Nominalwert. Der Nominalwert kann beispielsweise die bekannte gesamte mögliche latente Wärme der Phasenwechselspeicherzelle 2 sein.

Durch die Gesamtenthalpie einer Speicherzelle H kann der SOC beispielsweise

ausgedrückt werden in der Form $SOC = \frac{H_g}{H_{nom}}$, mit der ermittelten aktuellen Gesamtenthalpie

10 H_g des Phasenwechselmaterials 3 in der Phasenwechselspeicherzelle 2 und der bekannten möglichen Enthalpie H_{nom} (Nominalwert) des Phasenwechselmaterials 3 in der Phasenwechselspeicherzelle 2.

Der Ladezustand SOC kann damit natürlich auch einfach auf den gesamten

Phasenwechselspeicher 1, bestehend aus einer Mehrzahl von Phasenwechselspeicherzellen 2, hochgerechnet werden.

Die thermodynamischen Zustandsgrößen im Systemzustandsvektor x sind örtlich über das Phasenwechselmaterial 3 verteilte Größen, beispielsweise in Form eines Enthalpiefeldes oder Temperaturfeldes über das Phasenwechselmaterial 3. Damit kann beispielsweise der gesamte Energieinhalt (z.B. Enthalpieinhalt) der Phasenwechselspeicherzelle 2 ermittelt werden, beispielsweise durch Integration des Enthalpiefeldes. Daraus kann wiederum direkt der Ladezustand SOC der Phasenwechselspeicherzelle 2 ermittelt werden. Ferner können aus Zustandsgrößenfeldern von Systemzustandsgrößen x auch andere wichtige Kenngrößen, wie ein örtlich verteilter Aufschmelzgrad, die Struktur der Phasenverteilung (flüssig/fest/gasförmig) im Phasenwechselmaterial 3, oder die Lage und der Verlauf der Schmelzfront 4 ermittelt werden.

Das Ergebnis der Korrektur des Systemmodells 10 wie erfindungsgemäß vorgeschlagen ist in Fig.3 veranschaulicht worden. Die Kurve SOC_R zeigt den realen Verlauf des Ladezustands einer Phasenwechselspeicherzelle 2 über die Zeit t in Folge eines vorgegebenen zeitlichen Verlaufs der Eingangsgrößen T_{in} , T_{out} der

30 Phasenwechselspeicherzelle 2, der beispielsweise anhand einer thermodynamischen Simulation ermittelt worden ist. Die Kurve SOC_U zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladezustands für dieselbe Phasenwechselspeicherzelle 2 bei demselben Verlauf der Eingangsgrößen, der mit einem unkorrigierten Systemmodell 10 ausgehend von

abweichenden Anfangsbedingungen ermittelt wurde. Man erkennt, dass die im Systemmodell 10 innewohnenden Modellfehler und Abweichungen erhalten bleiben und sich im Ladezustand niederschlagen. Die Kurve SOC_c zeigt den Verlauf des Ladezustands für dieselbe Phasenwechselspeicherzelle 2 und denselben Verlauf der Eingangsgrößen, der mit einem erfindungsgemäß korrigierten Systemmodell 10 ermittelt wurde. Man erkennt, dass allfällige Modellfehler rasch korrigiert werden und der Ladezustand dann sehr gut dem realen Verlauf folgt. Der Ladezustand ist in den verschiedenen Kurven natürlich auf die gleiche Weise ermittelt worden.

Der ermittelte Ladezustand SOC der Phasenwechselspeicherzelle 2 oder des Phasenwechselspeichers 1 kann zur Regelung des Betriebs des Phasenwechselspeichers 1 (bestehend aus zumindest einer Phasenwechselspeicherzelle 2) verwendet werden, wie in Fig.4 vereinfacht dargestellt. Ein Phasenwechselspeicher 1 mit zumindest einer Phasenwechselspeicherzelle 2 speichert Wärme \dot{Q} aus einem Industrieprozess 20, beispielsweise ein Prozess der Stahlerzeugung und Verarbeitung, oder liefert Wärme \dot{Q} in einen Industrieprozess 20, beispielsweise ein Fernwärmenetzwerk, wobei die Quelle der Wärme \dot{Q} für den Phasenwechselspeicher 1 und die Senke für Wärme \dot{Q} aus dem Phasenwechselspeicher 1 nicht zwingendermaßen gleich sein müssen. Der Wärmefluss zwischen Phasenwechselspeicher 1 und dem Industrieprozess 20 wird mit einem Regler 21 geregelt. Der Regler 21 verarbeitet den aktuellen Ladezustand SOC des Phasenwechselspeichers 1, um damit den Wärmefluss zu regeln, beispielsweise mit Hilfe zumindest einen Aktuators 23 (z.B. eine Pumpe, ein Wärmetauscher usw.) zur Beeinflussung des Wärmeflusses. Der Ladezustand SOC wird in einer Zustandsermittlungseinheit 22 ermittelt, die beispielsweise nach Fig.2 ausgeführt sein kann. Der Regler 21 und die Zustandsermittlungseinheit 22 können natürlich auch in einer gemeinsamen Einheit integriert sein, beispielsweise könnte eine Computerhardware vorgesehen sein, auf der der Regler und die Zustandsermittlung als Software implementiert sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes eines Phasenwechselfpeichers (1) mit
 zumindest einer Phasenwechselfpeicherzelle (2) in vorgegebenen Zeitschritten k , wobei der
 5 über die zumindest eine Phasenwechselfpeicherzelle (2) örtlich verteilte thermodynamische
 Zustand der Phasenwechselfpeicherzelle (2) mit einem Systemmodell (10) ermittelt wird und
 das Systemmodell (10) den Zusammenhang zwischen einem Eingangsgrößenvektor \underline{u} mit
 vorgegebenen Eingangsgrößen u , einem über die Phasenwechselfpeicherzelle (2) örtlich
 verteilten Systemzustandsvektor \underline{x} mit vorgegebenen Systemzustandsgrößen x , einem
 10 Ausgangsgrößenvektor \underline{y} mit vorgegebenen Ausgangsgrößen y und anhand von
 Modellparametern θ anhand zumindest einer Systemmodellgleichung beschreibt, **dadurch
 gekennzeichnet, dass** an vorgesehenen Messstellen (M) der Phasenwechselfpeicherzelle
 (2) zumindest zwei verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen erfasst werden und
 der Ausgangsgrößenvektor \underline{y} diese zumindest zwei verschiedenen thermodynamischen
 15 Zustandsgrößen an den Messstellen (M) als Ausgangsgrößen y enthält, **dass** mit dem
 Systemmodell (10) anhand von bekannten Eingangsgrößen u zum Zeitschritt k ein
 prädizierter Ausgangsgrößenvektor $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und ein prädizierter Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$
 ermittelt werden, **dass** mit dem ermittelten prädizierten Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$
 Empfindlichkeiten E des ermittelten prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ als
 20 Ableitungen $E = \frac{d\hat{\underline{y}}_{M,k}}{d\underline{x}}$ des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ nach dem
 Systemzustandsvektor \underline{x} des Systemmodells (10) ermittelt werden, **dass** zum Zeitschritt k
 die zumindest zwei verschiedenen Ausgangsgrößen y_k an den Messstellen M gemessen
 werden, **dass** zum Zeitschritt k anhand des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$, der
 Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und den gemessenen
 25 Ausgangsgrößen y_k eine Korrektur $\underline{x}_{korrr,k}$ des Systemzustandsvektors \underline{x} ermittelt wird und
 der mit dem Systemmodell (10) ermittelte prädizierte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ mit der
 Korrektur $\underline{x}_{korrr,k}$ des Systemzustandsvektors \underline{x} korrigiert wird, um zum Zeitschritt k einen
 geschätzten Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_k$ für die zumindest eine Phasenwechselfpeicherzelle
 (2) zu ermitteln **und dass** anhand des geschätzten Systemzustandsvektors $\hat{\underline{x}}_k$ der

Ladezustand SOC der zumindest einen Phasenwechselspeicherzelle (2) zum aktuellen Zeitschritt k nach einer vorgegebenen Berechnungsvorschrift $SOC = SOC(\hat{x}_k)$ ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Systemmodellgleichung eine mit zumindest einer thermodynamischen Zustandsgröße
5 formulierte instationäre Energiebilanzgleichung des Phasenwechselmaterials (3) der zumindest einen Phasenwechselspeicherzelle (2) enthält.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Systemmodellgleichung eine Navier-Stokes-Gleichung und eine Kontinuitätsgleichung des Phasenwechselmaterials (3) der zumindest einen Phasenwechselspeicherzelle (2) enthält.
- 10 4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Systemmodellgleichung zumindest eine von der zumindest einen Phasenwechselspeicherzelle (2) oder dem Phasenwechselmaterial (3) der Phasenwechselspeicherzelle (2) abhängige Randbedingung enthält.
5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der
15 Systemzustandsvektor \underline{x} des Systemmodells (10) zu schätzende Modellparameter θ des Systemmodells (10) enthält.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Empfindlichkeiten $E = \frac{d\hat{y}_{M,k}}{d\underline{x}}$ in vorgegebenen größeren Zeitschritten als die Zeitschritte k ermittelt werden.
- 20 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ des Systemzustandsvektor \underline{x} als geschätzter Systemzustandsvektor \hat{x}_k verwendet wird, indem der prädizierte Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ durch die Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ ersetzt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** als
25 Korrektur $\underline{x}_{korr,k}$ des Systemzustandsvektors \underline{x} eine Änderung $\Delta\underline{x}_k$ des prädizierten Systemzustandsvektors $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ ermittelt wird und der geschätzte Systemzustandsvektor \hat{x}_k als Summe des prädizierten Systemzustandsvektors $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ und der Änderung $\Delta\underline{x}_k$ ermittelt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** anhand des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$, der Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen
30 $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und den gemessenen Ausgangsgrößen y_k zum Zeitschritt k eine Korrektur $\underline{\theta}_{korr,k}$ des

Modellparametervektors $\underline{\theta}$ ermittelt wird und als geschätzter Modellparametervektor $\hat{\underline{\theta}}_k$ des Systemmodells (10) die Korrektur $\underline{\theta}_{\text{korrr},k}$ der Modellparameter θ verwendet wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** anhand des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{\underline{y}}_{M,k}$, der Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen

5 $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und den gemessenen Ausgangsgrößen y_k zum Zeitschritt k eine Änderung $\Delta\underline{\theta}_k$ des Modellparametervektors $\underline{\theta}$ ermittelt wird und als geschätzter Modellparametervektor $\hat{\underline{\theta}}_k$ eine Summe des prädizierten Modellparametervektors $\hat{\underline{\theta}}_{M,k}$ und der Änderung $\Delta\underline{\theta}_k$ des Modellparametervektors $\underline{\theta}$ verwendet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** der geschätzte
10 Modellparametervektor $\hat{\underline{\theta}}_k$ des Systemmodells (10) für den nächsten Zeitschritt $k+1$ verwendet werden.

12. Phasenwechselfpeicher (1) mit zumindest einer Phasenwechselfpeicherzelle (2) und einer Ladezustandsberechnungseinheit (14), die in vorgegebenen Zeitschritten einen Ladezustand SOC des Phasenwechselfpeichers (1) anhand eines örtlich verteilten
15 thermodynamischen Zustands der Phasenwechselfpeicherzelle (2) ermittelt, wobei ein Systemmodell (10) vorgesehen ist, das den über die zumindest eine Phasenwechselfpeicherzelle (2) örtlich verteilten thermodynamischen Zustand der Phasenwechselfpeicherzelle (2) aus einem Zusammenhang zwischen einem Eingangsgrößenvektor \underline{u} mit vorgegebenen Eingangsgrößen u , einem über die
20 Phasenwechselfpeicherzelle (2) örtlich verteilten Systemzustandsvektor \underline{x} mit vorgegebenen Systemzustandsgrößen x , einem Ausgangsgrößenvektor \underline{y} mit vorgegebenen Ausgangsgrößen y und anhand von Modellparametern θ anhand zumindest einer Systemmodellgleichung ermittelt, **dadurch gekennzeichnet, dass** an der Phasenwechselfpeicherzelle (2) an vorgesehenen Messstellen (M) zumindest zwei
25 Messensoren (5, 6) angeordnet sind, die verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen erfassen, wobei der Ausgangsgrößenvektor \underline{y} diese zumindest zwei verschiedenen thermodynamischen Zustandsgrößen an den Messstellen (M) als Ausgangsgrößen y enthält, **dass** das Systemmodell (10) anhand von bekannten Eingangsgrößen u zum Zeitschritt k einen prädizierten Ausgangsgrößenvektor $\hat{\underline{y}}_{M,k}$ und einen prädizierten
30 Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$ ermittelt, **dass** eine Empfindlichkeitsberechnungseinheit (12) vorgesehen ist, die aus dem ermittelten prädizierten Systemzustandsvektor $\hat{\underline{x}}_{M,k}$

- Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ als Ableitungen $E = \frac{d\hat{y}_{M,k}}{dx}$ des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{y}_{M,k}$ nach dem Systemzustandsvektor x des Systemmodells (10) ermittelt, **dass** die Messsensoren (5, 6) zum Zeitschritt k die zumindest zwei verschiedenen Ausgangsgrößen y_k an den Messstellen M messen, **dass** ein
- 5 Beobachter (11) vorgesehen ist, der zum Zeitschritt k anhand des prädizierten Ausgangsgrößenvektors $\hat{y}_{M,k}$, der Empfindlichkeiten E der prädizierten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{M,k}$ und den gemessenen Ausgangsgrößen y_k eine Korrektur $x_{korrr,k}$ des Systemzustandsvektors x ermittelt, **dass** eine Korrekturereinheit (13) vorgesehen ist, die den mit dem Systemmodell (10) ermittelten prädizierten Systemzustandsvektor $\hat{x}_{M,k}$ mit der
- 10 Korrektur $x_{korrr,k}$ des Systemzustandsvektors x korrigiert und zum Zeitschritt k einen geschätzten Systemzustandsvektor \hat{x}_k für die zumindest eine Phasenwechselspeicherzelle (2) ermittelt **und dass** die Ladezustandsberechnungseinheit (14) anhand des geschätzten Systemzustandsvektors \hat{x}_k den Ladezustand SOC der zumindest einen Phasenwechselspeicherzelle (2) zum aktuellen Zeitschritt k nach einer vorgegebenen
- 15 Berechnungsvorschrift $SOC = SOC(\hat{x}_k)$ ermittelt.
13. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 zur Regelung des Betriebs eines Phasenwechselspeichers (1) bestehend aus zumindest einer Phasenwechselspeicherzelle (2), wobei in einem Regler (21) eines Aktuators (23) zum Zuführen oder Abführen von Wärme (\dot{Q}) in den Phasenwechselspeicher (1) der ermittelte
- 20 Ladezustand SOC der zumindest einen Phasenwechselspeicherzelle (2) verwendet wird.

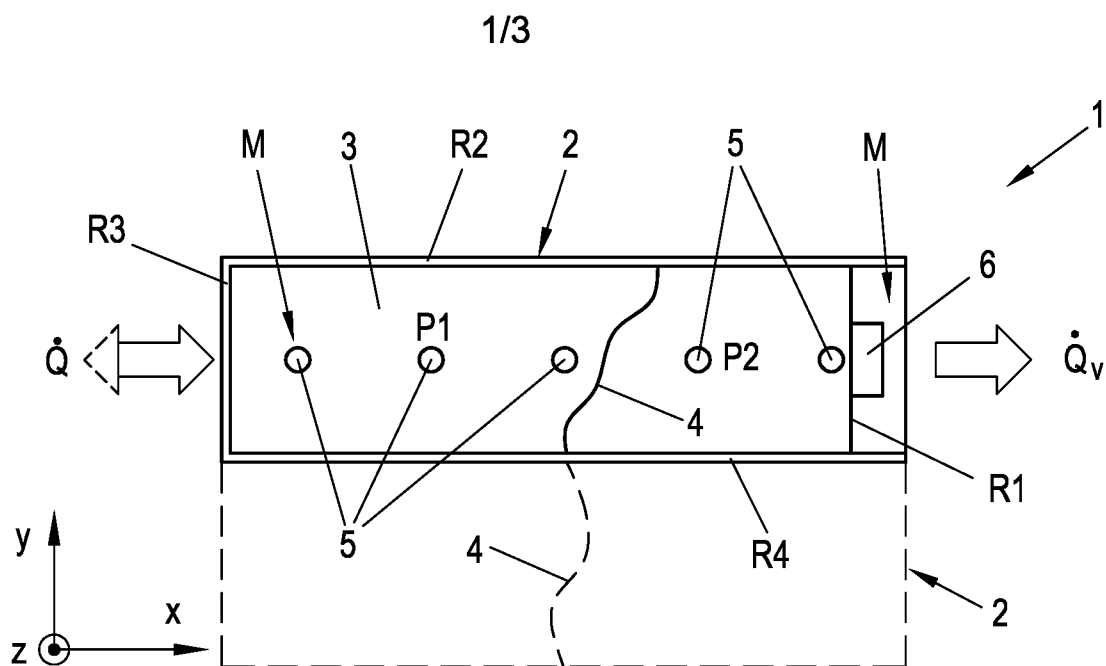


Fig. 1

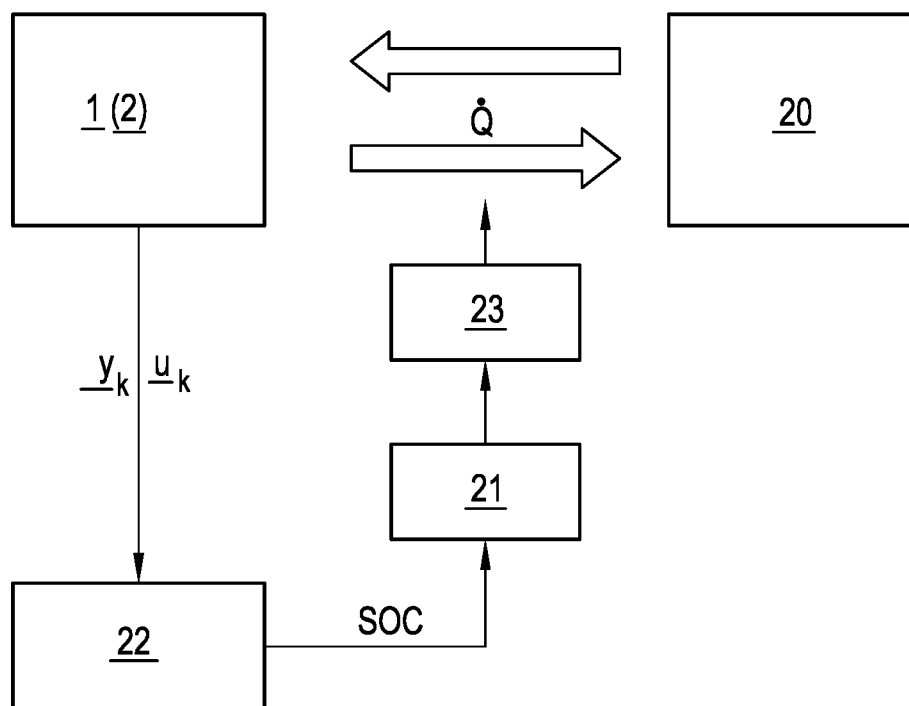


Fig. 4

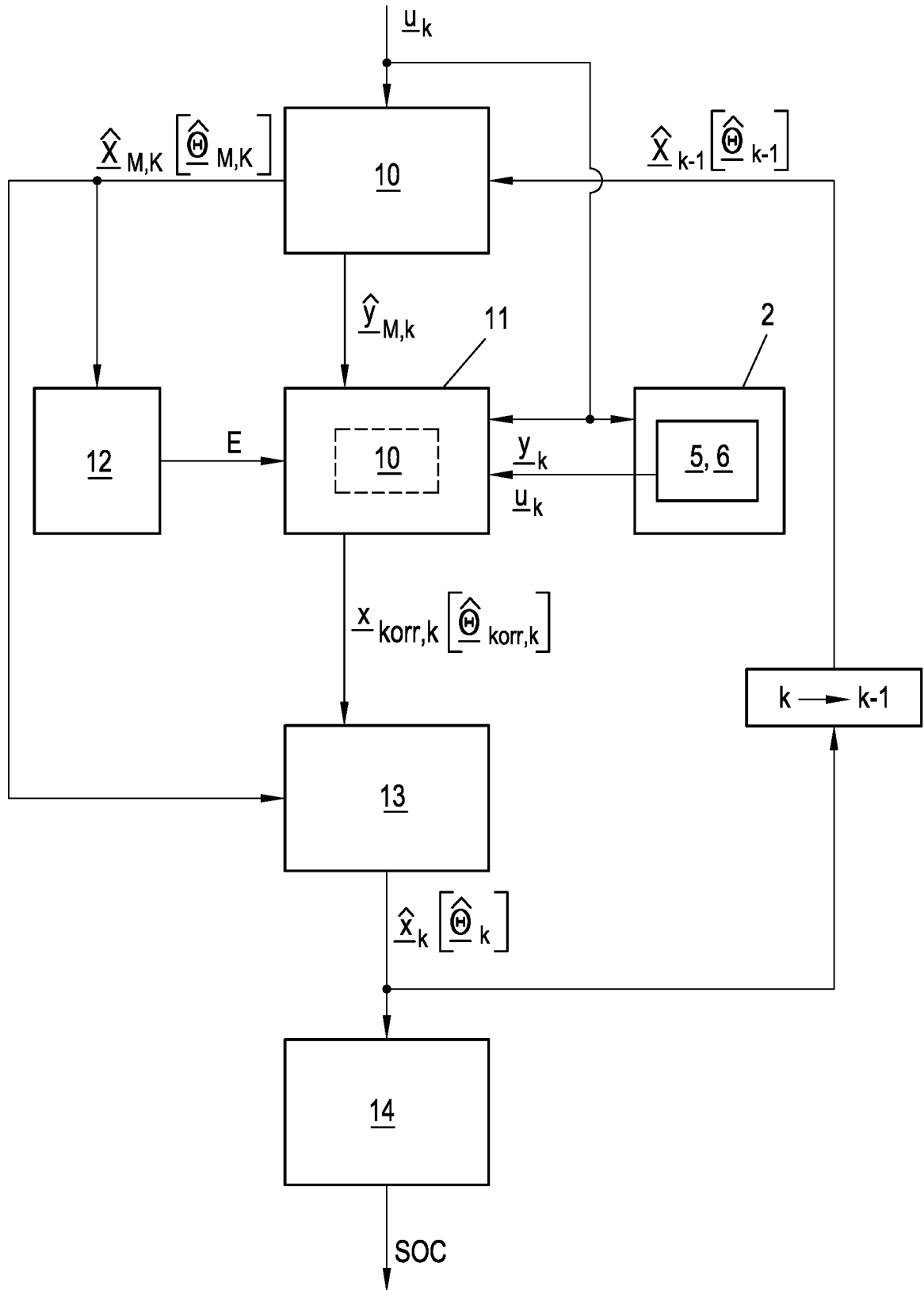


Fig. 2

3/3

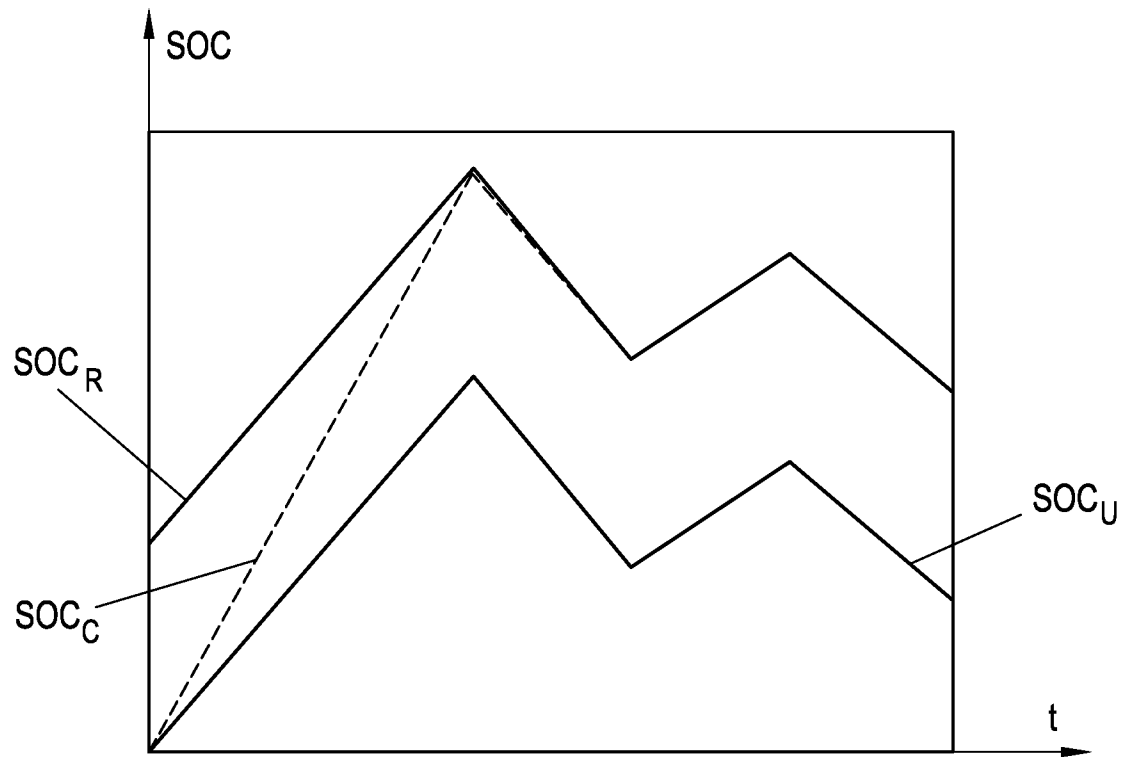


Fig. 3