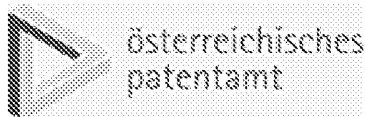


(19)



(10)

AT 513189 B1 2014-11-15

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50736/2013
 (22) Anmeldetag: 06.11.2013
 (45) Veröffentlicht am: 15.11.2014

(51) Int. Cl.: **G01R 31/36** (2006.01)
H01M 10/48 (2006.01)

(30) Priorität:
 23.01.2013 AT A 50046/2013 beansprucht.

(56) Entgegenhaltungen:
 WO 2006057468 A1
 WO 2006098541 A1
 DE 102012210883 A1
 DE 102010040451 A1
 WO 2012076220 A1
 WO 2012171730 A2
 US 2011148424 A1

(73) Patentinhaber:
 AVL LIST GMBH
 8020 GRAZ (AT)

(72) Erfinder:
 Hametner Christoph Dipl.Ing. Dr.techn.
 1020 Wien (AT)
 Jakubek Stefan Dr.
 1230 Wien (AT)
 Suljanovic Amra Mag. Dr.techn.
 8052 Graz (AT)

(74) Vertreter:
 PATENTANWÄLTE PINTER & WEISS OG
 WIEN

(54) Verfahren zur Ermittlung eines regelungstechnischen Beobachters für den SoC

(57) Um für einen beliebigen Batterietyp einen regelungstechnischen Beobachter strukturiert und zumindest teilweise automatisiert erstellen zu können, wird zuerst über ein datenbasiertes Modellierungsverfahren aus den Messdaten eines vorher ermittelten optimierten Versuchsplans ein nichtlineares Modell der Batterie, in Form eines lokalen Modellnetzwerkes bestehend aus einer Anzahl von lokalen, linearen, zeitinvarianten, dynamischen Modellen, die jeweils in bestimmten Bereichen der Eingangsgrößen Gültigkeit haben, ermittelt. Für jedes derart ermittelte lokale Modell (LM_i) des Modellnetzwerkes wird dann ein lokaler Beobachter ermittelt. Der regelungstechnische Beobachter (13) zur Schätzung des SoC ergibt sich dann aus einer Linearkombination der lokalen Beobachter.

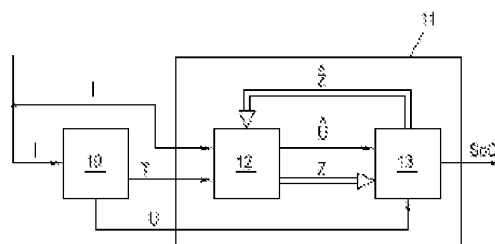


Fig. 5

Beschreibung

VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG EINES REGELUNGSTECHNISCHEN BEOBACHTERS FÜR DEN SOC

[0001] Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung eines regelungstechnischen Beobachters zur Schätzung des SoC einer Batterie.

[0002] In an sich hinlänglich bekannten Batteriemanagementsystemen, z.B. für die Batterie eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs, wird der Ladezustand (State-of-Charge, SoC) der Batterie bzw. einer Batteriezelle in Abhängigkeit von den im Fahrzeug gemessenen Größen, wie z.B. Lade- bzw. Entladestrom, Batteriespannung und Temperatur, ermittelt.

[0003] Aus der WO 2006/057468 A1 geht ein Verfahren zur Bestimmung des Ladezustandes hervor, bei dem der Ladezustand geschätzt wird und dazu auch eine Schätzung der Unsicherheit der Schätzung des Ladezustandes ermittelt wird. Der geschätzte Ladezustand wird dann anhand der geschätzten Unsicherheit korrigiert.

[0004] Der Ladezustand (State-of-Charge, SoC) der Batterie bzw. einer Batteriezelle wird häufig mit einem regelungstechnischen SoC-Beobachter gemacht, der ein, im Normalfall, nichtlineares Batteriemodell verwendet, das das nichtlineare Batterieverhalten der Batteriespannung in Abhängigkeit vom Lade- und Entladestrom modelliert. Der SoC-Beobachter schätzt dann auf Basis dieses Modells und der im Fahrzeug gemessenen Batteriespannung den tatsächlichen Ladezustand der Batterie. Das ist z.B. aus der DE 10 2009 046 579 A1 bekannt, die eine einfache äquivalente elektrische Schaltung als Modell der Zelle verwendet.

[0005] Ein Problem dabei ist, dass für jeden Batterietyp eigene Modelle benötigt werden. Solche Modelle sind aber schwierig zu parametrieren (z.B. elektro-chemische Modelle) und/oder sind nur in einem bestimmten Parameterbereich, z.B. nur innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs, vertrauenswürdig (z.B. elektrische Modelle auf Basis einer äquivalenten Schaltung) und/oder sind aufgrund ihrer Komplexität für Echtzeitanwendungen, und damit für Anwendung in einem Batteriemanagementsystem, ungeeignet.

[0006] In der WO 2006/098541 A1 wird eine Support Vector Machine (SVM) zur Ermittlung des Ladezustandes anhand von Trainingsdaten trainiert. Mit der trainierten Support Vector Machine kann dann der Ladezustand geschätzt werden.

[0007] Ein weiteres Problem ist die Erstellung des regelungstechnischen Beobachters selbst, der für unterschiedliche Modelle (Batterietypen) unter Umständen andere Anforderungen erfüllen muss. Häufig kommt hier zur nichtlinearen Zustandsschätzung ein Extended Kalman Filter zum Einsatz. Dabei findet in jedem Zeitschritt eine Linearisierung des nichtlinearen Modells statt. Je nach verwendeter Modellstruktur führt diese Vorgangsweise jedoch zu einem hohen bis sehr hohen Rechenaufwand, was die Umsetzung in einem Batteriemanagementsystem schwierig bzw. aufwendig macht.

[0008] Die DE 10 2012 210 883 A1 beschreibt ein Verfahren zur Berechnung des Ladezustandes, bei dem der Ladezustand aus der Open Circuit Voltage (OCV) bestimmt wird, wobei die OCV durch einen Parameterschätzer zum Schätzen der Batterieparameter und einen nichtlinearen adaptiven Beobachter zum Schätzen der OCV. Auch dieses Verfahren nutzt einen Kalman Filter für den Parameterschätzer.

[0009] Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, ein Verfahren anzugeben, mit dem es ermöglicht wird, für einen beliebigen Batterietyp einen regelungstechnischen Beobachter strukturiert und zumindest teilweise automatisiert zu erstellen und der möglichst wenig Rechenaufwand benötigt.

[0010] Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Dabei wird zuerst über ein datenbasiertes Modellierungsverfahren aus den Messdaten eines vorher ermittelten optimierten Versuchsplans ein nichtlineares Modell der Batterie, in Form eines lokalen Modellnetz-

werks bestehend aus einer Anzahl von lokalen, linearen, zeitinvarianten, dynamischen Modellen, die jeweils in bestimmten Bereichen der Eingangsgrößen Gültigkeit haben, ermittelt. Für jedes derart ermittelte lokale Modell des Modellnetzwerkes wird dann ein lokaler Beobachter ermittelt. Der regelungstechnische Beobachter zur Schätzung des SoC ergibt sich dann aus einer Linearkombination der lokalen Beobachter. Solche datenbasierte Modellierungsmethoden bieten in diesem Zusammenhang den Vorteil, dass sie für verschiedene Batterietypen und auch für Echtzeitanwendungen geeignet sind. Darüber hinaus kann das Verfahren weitestgehend automatisiert ablaufen, sodass der Aufwand für die Erstellung des SoC-Beobachters reduziert werden kann.

[0011] Nachdem das Verfahren zur Erstellung des SoC-Beobachters auf einem Versuchsplan basiert, der mit einer echten Batterie durch reale Messungen durchgeführt wird, sind die damit erhaltenen Messwerte und Modelle abhängig vom Alterungszustand der Batterie zum Zeitpunkt der Messungen. Somit liefert der daraus erstellte Beobachter für den SoC für andere Alterungszustände ungenaue Schätzungen für den SoC. Um nun auch den Alterungszustand der Batterie in der Schätzung des SoC zu berücksichtigen ist es vorteilhaft, wenn zumindest eine Eingangsgröße oder zumindest ein Modellparameter oder zumindest eine Gültigkeitsfunktion des lokalen Modellnetzwerkes, also des nichtlinearen Batteriemodells, durch zumindest eine Kenngröße für den Alterungszustand der Batterie skaliert wird. Auf diese Weise kann der SoC-Beobachter unabhängig vom aktuellen Alterungszustand der Batterie gute Schätzwerte für den SoC liefern bzw. den Alterungszustand der Batterie selbst als zusätzliche Schätzgröße bestimmen. Ein Vorteil dieser Methodik ist also, dass über einen einzelnen Parameter die Änderung des Alterungszustandes berücksichtigt werden kann.

[0012] Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 8 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

- [0013]** Fig. 1 die Änderung des SoC in Abhängigkeit vom Laststrom,
- [0014]** Fig. 2 einen initialen Versuchsplan zur Bestimmung eines optimierten Versuchsplans,
- [0015]** Fig. 3 einen optimierten Versuchsplan,
- [0016]** Fig. 4 eine Darstellung der Verbesserung des Informationsgehalts und der Versuchszeit durch den optimierten Versuchsplan,
- [0017]** Fig. 5 die Einbindung des SoC-Beobachters in ein Batteriemanagementsystem,
- [0018]** Fig. 6 ein Blockschaltbild eines linearen Modellnetzwerkes und
- [0019]** Fig. 7 und 8 jeweils einen Vergleich des geschätzten SoC mit einem gemessenen SoC.

[0020] In einem ersten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein einfaches Ausgangsmodell der Batterie bzw. Batteriezelle ermittelt. Im nachfolgenden werden die Begriffe Batterie und Batteriezelle im Sinne der Erfindung als gleichwertig angesehen. Dabei wird von einem beliebigen, bekannten Modell einer beliebigen Batteriezelle ausgegangen. Das bekannte Batteriemodell ist z.B. ein von einer anderen Batterie bekanntes Modell, ein lineares Batteriemodell, oder ein nicht lineares Batteriemodell. Ein einfaches lineares Batteriemodell kann z.B. ermittelt werden, indem ein Stromimpuls an die Batterie bzw. Batteriezelle angelegt wird und dabei die sich ergebende Spannung gemessen wird. Auch die Anwendung der bekannten Impedanzspektroskopie könnte zur Erstellung eines einfachen Batteriemodells genutzt werden. Aus diesen Daten kann dann mittels Methoden der Identifikation ein lineares Batteriemodell, z.B. ein einfacher Strom-Spannungszusammenhang, ermittelt werden. Obwohl ein solcher Sprungversuch nur für einen bestimmten Arbeitspunkt der Batterie bzw. Batteriezelle und nur für den konkreten Stromimpuls gilt, reicht ein derart einfaches Ausgangsmodell als Ausgangspunkt für die erfindungsgemäße Methodik aus, wie nachfolgend noch beschrieben.

[0021] Basierend auf dem einfachen linearen Ausgangsmodell der Batterie wird nun mittels

einer modellbasierten Design of Experiments (DoE) Methode die optimale Anregung für die Batterie bzw. Batteriezelle ermittelt. Dabei sollen ein möglichst großer, vorzugsweise der gesamte, Betriebsbereich der Batteriezelle abgedeckt werden, eine hohe Genauigkeit auch für hochdynamische Anregungen erzielt werden und auch Effekte der Batteriezelle wie Lade-Entlade Hysterese und Relaxation (Schwingverhalten) berücksichtigt werden. Gängige Verfahren zur Versuchsplanung für nichtlineare Systeme verwenden z.B. amplitudenmodulierte, pseudozufällige binäre Signale (APRB-Signale) zur Anregung der Systemdynamik. Diese Verfahren können in der vorliegenden Anwendung bei Batterien jedoch nicht eingesetzt werden, da der SoC direkt vom Anregungssignal (dem Laststrom der Batteriezelle) abhängig ist, z.B. gemäß der Beziehung

$$SoC(t) = SoC_0 + \int_{\tau=0}^t \frac{\eta_I(I)I(\tau)}{C_n} d\tau,$$

mit $I(t)$ dem momentanen Laststrom, C_n der nominellen Zellkapazität und $\eta_I(I)$ dem Coulomb'schen Wirkungsgrad. Es muss daher bei der Anwendung bei Batterien ein anderer Ansatz gesucht werden. Das DoE muss dabei auch sicherstellen, dass das Anregungssignal eine geeignete und ausreichende Anregung der Batteriezelle darstellt und gleichzeitig, dass auch der gesamte Betriebsbereich des SoC abgedeckt ist. Außerdem wird vorzugsweise auch die Zeit für die Durchführung der Batterietests mit berücksichtigt.

[0022] Ein optimales modellbasiertes DoE wird häufig mittels der sogenannten Fisher Informationsmatrix I_{FIM} und einem Beurteilungskriterium, wie z.B. einem D-optimalen Beurteilungskriterium, bestimmt. Nach diesem Beurteilungskriterium ist die Determinante J_{FIM} der Fisher Informationsmatrix I_{FIM} zu maximieren. Neben dem D-optimalen Beurteilungskriterium gibt es natürlich noch weitere bekannte Beurteilungskriterien, die ebenfalls angewendet werden könnten. Das ist hinlänglich bekannt und wird hier nicht näher erläutert.

[0023] Dabei kann das zuvor ermittelte (z.B. aus einzelnen Sprungversuchen) einfache Ausgangsmodell $y=f(\Psi)$ zur Bestimmung der Fisher Informationsmatrix verwendet werden. Die Fisher Informationsmatrix I_{FIM} basiert bekannterweise auf der partiellen Ableitung des Modellausgangs y nach den Modellparametern ψ in der Form

$$I_{FIM} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^N \frac{\partial y(k, \psi)}{\partial \psi} \frac{\partial y(k, \psi)^T}{\partial \psi}.$$

[0024] Für die gegenständliche Anwendung wird das Anregungssignal ausgehend von einer bestimmten Anzahl von Designpunkten, die jeweils durch den Laststrom und dem SoC-Wert gegeben sind, zu Beginn vorgegeben. Das Ziel der folgenden Optimierung ist eine optimale zeitlich sequentielle Anordnung solcher Designpunkte, um die oben erwähnten Anforderungen an die Anregung zu erfüllen. Für jeden Designpunkt hängt das Vorzeichen des Laststromes I (als Laden oder Entladen) und die Dauer des Laststromes I vom zu erreichenden SoC und dem vorherigen SoC ab, wie in Fig. 1 dargestellt. Innerhalb des zulässigen Parameterbereichs 1 (der Eingangsraum), kann ausgehend von einem bestimmten aktuellen SoC 2, 3, ein neuer SoC 4, 5 nur erreicht werden, wenn der Laststrom I entweder für eine bestimmte Zeitdauer erhöht (laden) oder für eine bestimmte Zeitdauer erniedrigt (entladen) wird. Folglich hängt hierbei auch die Dauer dieser Lade- bzw. Entladepulse und damit auch die Testzeit T direkt von dieser zeitlich sequentiellen Abfolge und der jeweiligen Zuordnung von Laststrom und SoC-Wert der Designpunkte ab. Damit kann die Testzeit T auch Gegenstand der Optimierung und daher des optimalen DoE sein. Das kann z.B. erreicht werden, indem eine Ergebnisfunktion

$$J_{opt} = \alpha \frac{J_{FIM,init}}{J_{FIM,opt}} + (1 - \alpha) \frac{T_{opt}}{T_{init}}$$

minimiert wird. Dabei bezeichnen Größen mit dem Index „init“ die entsprechenden Größen für den initialen Versuchsplan (Ausgangspunkt der Optimierung) und „opt“ die optimierten Größen,

als Ergebnis der Optimierung. Der Gewichtungsparemeter $0 \leq \alpha \leq 1$ gewichtet zwischen Genauigkeit und Testzeit. Je größer α wird, umso größer ist der Informationsgehalt des Anregungssignals, während die Reduktion der Testzeit stärker gewichtet wird, je kleiner α gewählt wird. Solche Optimierungsprobleme können z.B. mittels eines heuristischen Optimierungsverfahren (z.B. ein simulated annealing Verfahren), oder anderen bekannten Verfahren, gelöst werden, wie hinlänglich bekannt ist.

[0025] In Fig. 2 ist beispielhaft ein Ausgangs-DoE (initialer Versuchsplan) bestehend aus einer Anzahl von zeitlich sequentiellen Designpunkten dargestellt. Der Versuchsplan ergibt sich aus einer entsprechend gewählten Abfolge der gewünschten Designpunkte (definiert über Laststrom und SoC). Um die Spannungshysterese und das Relaxationsverhalten der Batteriezelle erfassen zu können, können einzelnen Lade- oder Entladepulsen Phasen mit Laststrom $I=0$ folgen. Dieses Ausgangsdesign war Ausgangspunkt für einen simulated annealing Algorithmus zur Ermittlung eines optimierten DoE (optimierter Versuchsplan), wie in Fig. 3 dargestellt. Die Testzeit ergibt sich aus der sequentiellen Abfolge und der Zuordnung von Laststrom und SoC der Designpunkte. Fig. 4 zeigt die Verbesserung der Determinante J_{FIM} der Fisher Informationsmatrix I_{FIM} um einen Faktor von ungefähr fünf bei gleichzeitiger Verkürzung der Testzeit T um ungefähr 7% bei Durchführung der Optimierung.

[0026] Der optimierte Versuchsplan deckt durch diese Vorgehensweise im Wesentlichen den gesamten Betriebsbereich der Batteriezelle ab und erfasst im Wesentlichen das gesamte nicht-lineare dynamische Verhalten der Batteriezelle. Der Versuchsplan wird danach auf dem Prüfstand für die Batteriezelle abgefahren, d.h. die Batteriezelle wird mit den einzelnen Designpunkten in der ermittelten zeitlichen Sequenz gemäß dem Versuchsplan beaufschlagt, und es werden dabei Messungen an der Batteriezelle vorgenommen, um Zustandsgrößen der Batterie zu erfassen. Das kann auch automatisiert oder teilautomatisiert erfolgen. Aus diesen Messwerten kann dann automatisiert ein Modell der Batteriezelle bzw. Batterie ermittelt werden. Dabei werden z.B. Strom, Spannung und Temperatur der Batterie gemessen, wobei auch der initiale Versuchsplan zu Beginn der Messung als bekannt angenommen wird.

[0027] Zur Erstellung eines nichtlinearen Modells der Batterie kann man sich ebenfalls an sich bekannter Methoden nichtlinearer Modellidentifikation bedienen. Nachfolgend wird diese datenbasierte Modellierung anhand eines lokalen Modellnetzwerks (local model network, LMN) beschrieben, wie nachfolgend anhand von Fig.6 näher erläutert. Ein LMN interpoliert zwischen lokalen Modellen, die jeweils in bestimmten Betriebsbereichen (bzw. Bereichen der Eingangsgrößen) Gültigkeit haben.

[0028] Dabei kann jedes i-te lokale Modell LM_i des LMN aus zwei Teilen bestehen, nämlich aus einer Gültigkeitsfunktion Φ_i und einem Modellparametervektor θ_i . Der Modellparametervektor θ_i umfasst alle Parameter für das i-te Modell und die Gültigkeitsfunktion Φ_i definiert den Gültigkeitsbereich des i-ten lokalen Modells (innerhalb des Eingangsraumes). Ein lokaler Schätzwert der Ausgangsgröße $\hat{y}_i(k)$ als Ausgang des i-ten lokalen Modells LM_i zum Zeitpunkt k ergibt sich aus $\hat{y}_i(k) = x^T(k)\theta_i$, wobei $x(k)$ einen Regressionsvektor bezeichnet, der gegenwärtige und vergangene Ein- und Ausgänge enthält, z.B. den Zellstrom $I(k)$ und dessen letzten vier vergangene Werte $I(k-1) \dots I(k-4)$, den letzten SoC(k-1) und die Zelltemperatur $T(k-1)$. Der globale Modellausgang $\hat{y}(k)$, z.B. die Zellspannung $U(k)$, ergibt sich dann aus einer Linearkombination mit einer Wichtung der M lokalen Modellausgänge durch die Gültigkeitsfunktion Φ_i in der Form

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k) \hat{y}_i(k).$$

[0029] Das nichtlineare Systemverhalten der Batterie wird durch das LMN folglich über lokal gültige, lineare Modelle beschrieben. Diese Teilmodelle sind jeweils in einem gewissen Teilbereich (definiert über Strom, SoC, Temperatur, etc.) des gesamten Arbeitsbereichs gültig.

[0030] Z.B. könnte der Modellausgang durch $y(k) = U(k)$ und der Regressionsvektor durch $x(k)$

= $[U(k-1), U(k-2), \dots, U(k-n), I(k), I(k-1), \dots, I(k-m), T(k-1), \text{SoC}(k-1), 1]^T$ gegeben sein, wobei m und n die entsprechenden Systemordnungen angeben. Der Modellparametervektor θ_i wäre dann z.B. $[a_{U,1}, a_{U,2}, \dots, a_{U,n}, b_{I,0}, b_{I,1}, \dots, b_{I,m}, b_{T,1}, b_{\text{SoC},1}, c_0]$. U bezeichnet dabei die Spannung der Batterie, I den Strom und T die Temperatur, die in der jeweiligen Systemordnung $(k), (k-1), \dots, (k-n)$ aus dem ermittelten und durchgeführten Versuchsplan als Messwerte bekannt sind und als Trainingsdaten für die Modellidentifikation dienen. Das Ergebnis des Versuchsplans wird folglich für die Modellidentifikation herangezogen, wobei die Modellparameter bzw. der Modellparametervektor θ_i durch eine hinlänglich bekannte Optimierung, z.B. durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, die den Fehler zwischen geschätztem Ausgang und gemessenem Ausgang minimiert, oder ähnlicher Optimierungsmethoden, ermittelt wird.

[0031] Als Ergebnis erhält man ein nichtlineares Modell der Batterie, das den Ausgang $\hat{y}(k)$, z.B. $U(k)$, als Funktion der Eingangsgrößen, z.B. Strom I und Temperatur T , sowie von vergangenen Werten dieser Größen vorhersagt.

[0032] Aus dem derart ermittelten nichtlinearen Modell der Batterie in Form des LMN kann dann ein regelungstechnischer Beobachter für den SoC ermittelt werden, was hier am Beispiel eines Fuzzy-Beobachters beschrieben wird. Die Verwendung eines Fuzzy-Beobachters ermöglicht eine einfache und automatisierte Parametrierung des nichtlinearen Zustandsbeobachters. Durch die stationäre Auslegung der lokalen Filter ist eine echtzeitfähige Implementierung möglich, da der Rechenaufwand in jedem Zeitschritt gering ist (im Gegensatz zum z.B. Extended Kalman Filter). Jedes lokale Modell des LMN ist ein lineares, zeitinvariantes, dynamisches System. Daher wird unter Verwendung der Standard Kalmanfiltertheorie ein lokaler Beobachter für jedes lokale lineare Zustandsraummodell erstellt. Ein globaler Filter ergibt sich dann aus einer Linearkombination der lokalen Filter. Das nichtlineare Beobachterdesign umfasst daher die Beschreibung des nichtlinearen Systems als lokale, lineare Zustandsraummodelle. Im Wesentlichen wird dazu der Zustandsvektor $z(k-1)$ des Systems durch den Zustand $\text{SoC}(k-1)$, der vorher als Eingang für die Ermittlung des LMN gedient hat, ergänzt. Das ergibt sich aus einer Kombination des LMNs mit dem relativen SoC-Modell von vorhin in der Form

$\text{SoC}(k) = \text{SoC}(k-1) + \frac{T_s}{C_n} i(k)$, wobei T_s die Samplingzeit bezeichnet. Für das i -te lokale Modell

erhält man gemäß dem Zustandsraummodell den Zustandsvektor $z_i(k) = A_i z(k-1) + B_i u(k)$, mit der Systemmatrix A_i , der Eingangsmatrix B_i und dem Eingangsvektor $u(k)$, wobei der Zustandsvektor $z(k-1)$ den Zustand $\text{SoC}(k-1)$ und die Systemmatrix A_i und die Eingangsmatrix B_i die vorher ermittelten Modellparameter enthält. Daraus folgt der Zustandsvektor für den Systemzustand wieder durch Wichtung der lokalen Zustände mit der Gültigkeitsfunktion Φ_i zu

$z(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k-1) \{A_i z(k-1) + B_i u(k)\}$ und der globale Modellausgang $y(k) = C z(k)$ mit $C = [1 \ 0 \dots \ 0 \ 0]$.

[0033] Der Zustandsvektor $z(k)$ enthält im Beispiel von oben vergangene Ausgänge und den Ladezustand gemäß $z(k) = [U(k-1), U(k-2), \dots, U(k-n), \text{SoC}(k-1)]^T$ und der Eingangsvektor $u(k)$ enthält die aktuellen und zeitverzögerten Eingangsgrößen (und den Offset-Term der lokalen Modelle) in der Form $u(k) = [I(k), I(k-1), \dots, I(k-m), T(k-1), 1]$.

[0034] Ein Beobachter ist dabei notwendig, da das relative SoC-Modell über einen längeren Zeitraum unzuverlässig ist und falsche Ergebnisse liefert und weiters dazu der initiale Ladezustand exakt bekannt sein muss, was in der Regel nicht der Fall ist. Der Beobachter kann diesen Zustand basierend auf gemessenen echten Eingangs- und Ausgangsgrößen adaptieren und somit Fehler, die durch die falsche Initialisierung bzw. durch die Unzuverlässigkeit des Modells entstehen, kompensieren.

[0035] Dazu kann für jedes lokale Modell des LMN ein lokaler Kalman Filter mit der Verstärkungsmatrix K_i ermittelt werden, um den lokalen Zustand zu schätzen. Der geschätzte Zustand $\hat{z}(k)$, der den geschätzten SoC enthält, folgt dann aus den Gleichungen

$$\hat{z}(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k-1) \{z_i^*(k) + K_i[y(k) - \hat{y}(k)]\} \text{ mit}$$

$$z_i^*(k) = A_i \hat{z}(k-1) + B_i u(k) \text{ und } \hat{y}(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k-1) C z_i^*(k).$$

[0036] Die Bestimmung der Kalman Verstärkungsmatrix K_i erfolgt z.B. über die bekannte diskrete, algebraische Riccatigleichung (DARE) mit den Kovarianzmatrizen, die das Messrauschen und das Prozessrauschen beschreiben. Diese Kovarianzmatrizen können dabei z.B. über bekannte Verfahren aus den auf dem Prüfstand erfassten Messwerten bestimmt werden.

[0037] Der Kovarianzwert der das Prozessrauschen des SoC in den Kovarianzmatrizen beschreibt kann aber auch als einstellbarer Tuningparameter für den nichtlinearen SoC-Beobachter betrachtet und herangezogen werden, wie anhand der Fig.7 und 8 gezeigt. Die beiden Figs.7 und 8 zeigen die Funktion des regelungstechnischen Beobachters. In beiden Figuren erkennt man, dass sich die Schätzung des SoC (jeweils die strichlierte Kurve Diagramm) auch bei beliebigen Ausgangsdaten an den tatsächlichen Wert des SoC annähert. In Fig.8 wurde die Gewichtung des SoC im Zustand erhöht, was zu einer schnelleren Konvergenz, aber zu einem leicht erhöhten Fehler führt.

[0038] Der ermittelte regelungstechnische Beobachter zur Schätzung des SoC lässt sich, wie in Fig. 5 dargestellt, in ein Batteriemanagementsystem 11 integrieren. Der Laststrom I einer Batterie 10 erzeugt eine Batteriespannung U und eine Batterietemperatur T , die als Messgrößen dem Batteriemanagementsystem 11 zugeführt werden. Darin ist das erfindungsgemäß ermittelte erweiterte Zustandsraummodell 12 und der nichtlineare Beobachter 13 implementiert, der den aktuellen SoC schätzt. Der geschätzte SoC kann dann entsprechend weiterverwendet werden, z.B. in der Batteriemanagementeinheit 11 selbst, oder in einer nicht dargestellten Batterie- oder Fahrzeugsteuereinheit.

[0039] Neben der Schätzung des Ladezustandes SoC ist die Bestimmung des Alterungszustandes (State-of-Health, SoH) wichtig, um ein Kriterium für die Güte der Batterie 10 angeben zu können. Für den SoH gibt es jedoch noch keine allgemein gültige Definition. Oftmals wird der Alterungszustand SoH einer Batterie 10 durch eine Kenngröße, wie z.B. als Verhältnis der verfügbaren Kapazität C_{akt} der Batterie im Vergleich zur bekannten Nennkapazität C_{init} der Batterie angegeben, also C_{akt}/C_{init} . Um einen effizienten Einsatz der Batterie 10 zu ermöglichen und somit auch eine möglichst lange Lebensdauer zu erzielen, soll vorzugsweise auch der SoH, oder eine Kenngröße dafür, möglichst exakt bestimmt werden, z.B. von der Batteriemanagementeinheit 11, da der aktuelle Alterungszustand SoH auch die Bestimmung des Ladezustandes SoC beeinflusst. Für eine exakte Bestimmung des Ladezustandes SoC einer gealterten Batterie 10 ist es daher vorteilhaft, wenn auch der jeweilige aktuelle Alterungszustand SoH bei der Bestimmung des Ladezustandes SoC berücksichtigt wird. Nachfolgend wird nun beschrieben, wie der oben beschriebene SoC-Beobachter ergänzt werden kann, um auch den Alterungszustand SoH zu berücksichtigen bzw. zu ermitteln.

[0040] Im Gegensatz zu klassischen Modellierungsansätzen (chemisch-physikalische Modelle, Equivalent-Circuit Modelle, etc.) enthält das oben beschriebene, rein datenbasierte (Black-Box) Batteriemodell in Form des LMN, bzw. das davon abgeleiteten Zustandsraummodell 12, keinerlei physikalische Information über die Batterie 10 selbst. Die im Modellparametervektor θ_i enthaltenen Modellparameter, stehen allerdings über die Beziehung $\hat{y}(k) = x^T(k)\theta_i$ in Zusammenhang mit den Eingangsgrößen im Regressionsvektor $x(k)$ und mit der Ausgangsgröße $y(k)$. Diese Interpretierbarkeit des lokalen Modellnetzwerkes LMN kann nun dazu genutzt werden, um Einflussgrößen für den Alterungszustand SoH aus dem LMN zu bestimmen bzw. zu extrahieren und über diese Einflussgrößen, Einfluss auf das Batteriemodell bzw. auf die Schätzung des SoC zu nehmen. Das Ziel dabei ist, durch Adaption dieser Einflussgrößen auch das dynamische Verhalten der Ausgangsgröße $y(k)$, z.B. der Batteriespannung $U(k)$, von alternden Bat-

terien 10 mit dem LMN, bzw. dem daraus abgeleiteten Zustandsraummodell 12, wiederzugeben und damit eine genaue Schätzung des SoC zu ermöglichen. Zusätzlich kann dadurch der Alterungszustand SoH als weitere Größe bestimmt, ausgegeben und weiter verwendet werden.

[0041] Im einfachsten Fall handelt es sich bei der Kenngröße für den Alterungszustand SoH um die verfügbare Kapazität C_{akt} , bzw. um das Verhältnis der verfügbare Kapazität C_{akt} im Vergleich zur Nennkapazität C_{init} , also C_{akt}/C_{init} . Es kann jedoch als Kenngröße für den Alterungszustand SoH auch der aktuelle Innenwiderstand R_{akt} oder das Verhältnis von aktuellen Innenwiderstand der gealterten Batterie R_{akt} im Vergleich zum bekannten Innenwiderstand einer neuen Batterie R_{init} , also R_{init}/R_{akt} , oder eine Kombination davon, berücksichtigt werden. Ein Batteriemodell in Form des LMN kann dann durch Vorgabe der Kenngröße, z.B. C_{akt}/C_{init} und/oder R_{akt}/R_{init} , adaptiert werden, um das Verhalten der Ausgangsgröße $y(k)$ bei bekannten Eingangsgrößen $x(k)$ für beliebige, sich ergebende Alterungszustände SoH zu simulieren, wie in Fig.9 angedeutet. Dabei wird die Wirkung dieser Kenngröße(n) auf zumindest einen Modellparameter im Modellparametervektor θ_i und gegebenenfalls auch auf die Gültigkeitsfunktionen Φ_i , und/oder auf zumindest eine Eingangsgröße $x(k)$ umgerechnet, wodurch eine Anpassung des statischen und dynamischen Verhaltens des nichtlinearen Batteriemodells erfolgt. Gleichzeitig kann mit einem solchen ergänzten Batteriemodell aus dem davon abgeleiteten Beobachter für den Ladezustand SoC, wie oben beschrieben, auch der Ladezustand SoC in Abhängigkeit vom aktuellen Alterungszustand SoH ermittelt werden. Das soll nachfolgend am obigen Beispiel erläutert werden.

[0042] Durch die Interpretierbarkeit der lokal linearen Modelle LM_i des lokalen Modellnetzwerks LMN können die Modellparameter, wie z.B. $a_{U,1}$, $a_{U,2}$, ..., $a_{U,n}$, $b_{I,0}$, $b_{I,1}$, ..., $b_{I,m}$, $b_{T,1}$, $b_{SoC,1}$, C_0 , die den Modellparametervektor θ_i bzw. die Systemmatrix A_i im Zustandsraummodell 12 bestimmen, entsprechend verändert werden, um die Alterung der Batterie 10 im Batteriemodell zu berücksichtigen. Gleichfalls können auch die Eingangsgrößen $x(k)$ des lokalen Modellnetzwerks LMN bzw. die Zustandsgrößen im Zustandsraummodell 12 verändert werden.

[0043] Folgend sind beispielhaft Möglichkeiten angegeben, um die Kenngröße(n) für den Alterungszustand SoH zu berücksichtigen:

- Anpassung des Innenwiderstands: Über den Modellparameter $b_{I,0}$, der mit dem aktuellen Strom $I(k)$ zusammenhängt und der bei einer Ausgangsgröße $U(k)$ die Eigenschaft eines Widerstandes hat, kann direkt der Innenwiderstand R der Batterie 10 beeinflusst werden. Damit kann der Modellparameter $b_{I,0}$ z.B. gemäß der Kenngröße R_{akt}/R_{init} skaliert werden.
- Anpassung der Stationärverstärkung: Über die den Eingangsgrößen zugeordneten Modellparameter $b_{I,1}$, ..., $b_{I,m}$, $b_{T,1}$, $b_{SoC,1}$ oder direkt über die Eingangsgrößen kann die Stationärverstärkung der Übertragungsfunktion (als Quotient von Eingang und Ausgang) angepasst werden.
- Anpassung der Kapazität im relativen SoC-Modell: Der Beobachter für den SoC berücksichtigt den Zusammenhang zwischen Strom und SoC über das relative SoC-Modell in der Form $SoC(k) = SoC(k-1) + \frac{T_s}{C_n} i(k)$. Durch Anpassung oder Skalierung der Kapazität C_n kann dabei die Änderung der Kapazität über die Alterung berücksichtigt werden. Die Skalierung kann dabei in Abhängigkeit von der Kenngrößen, z.B. C_{akt}/C_{init} erfolgen, gegebenenfalls unter Berücksichtigung des aktuellen SoC.
- Eine Kenngröße, z.B. C_{akt}/C_{init} , kann dazu genutzt werden, um Eingangssignale (bzw. Zustände im Zustandsraummodell) des Systems zu skalieren. Z.B. in Form einer SoC-Korrektur im Batteriemodell oder im Zustandsraummodell 12, z.B. über den Modellparameter $b_{SoC,1}$. Die Skalierung kann dabei in Abhängigkeit von der Kenngröße, z.B. C_{akt}/C_{init} , erfolgen, beispielsweise durch $SoC_{norm} = SoC * C_{init}/C_{akt}$, wobei SoC der geschätzte SoC ist und SoC_{norm} der skalierte und rückgeführte SoC.

- Eine Kenngröße, z.B. C_{akt}/C_{init} , kann dazu genutzt werden, um über die Modellparameter $b_{l,1}, \dots, b_{l,m}$ die Stationärverstärkung K_i der Übertragungsfunktionen der lokal linearen Modelle LM_i und den Batteriestrom zu korrigieren, z.B. durch $K_{i,norm} = K_i \cdot C_{akt}/C_{init}$, wobei K_i die sich aus dem Modell ergebende Stationärverstärkung ist und $K_{i,norm}$ die skalierte.

[0044] Bei Kenntnis oder Vorgabe der Kenngröße, kann damit das nichtlineare Batteriemodell LMN bzw. das Zustandsraummodell 12 und damit die Schätzung des SoC an den aktuellen Alterungszustand angepasst werden. Die konkrete Art der Skalierung in Abhängigkeit von der Kenngröße ist hierbei nicht entscheidend, sondern es gibt natürlich vielfältigste Möglichkeiten, wie skaliert wird.

[0045] Die Kenngröße für den Alterungszustand SoH, also z.B. die Kapazität C_{akt} oder der Innenwiderstand R_{akt} , ist aber in der Regel nicht direkt messbar und daher nicht bekannt. Diese Kenngröße, bzw. der damit in Zusammenhang stehende Alterungszustand SoH, soll daher durch den nichtlinearen Beobachter mitgeschätzt werden. Der oben beschriebene nichtlineare Beobachter 13 wird daher nun um die Schätzung des Alterungszustandes SoH, bzw. einer Kenngröße davon, erweitert.

[0046] Dieser kombinierte SoH/SoC-Beobachter basiert auf dem erweiterten nichtlinearen Batteriemodell in Form des lokalen Modellnetzwerkes LMN bzw. dem daraus abgeleiteten erweiterten Zustandsraummodell 12. Die Kenngröße, wie z.B. C_{akt} , C_{akt}/C_{init} , R_{akt} oder R_{akt}/R_{init} , beeinflusst dabei direkt oder indirekt Eingangsgrößen und/oder Modellparameter dieses Zustandsraummodells, wie oben beschrieben.

[0047] Bei der Wahl der Architektur des kombinierten SoH/SoC-Beobachters kann man unterscheiden zwischen einem vollständigen Beobachter für SoC und SoH und einem kaskadierten Beobachter.

[0048] Beim vollständigen Beobachter werden SoC und SoH (bzw. die Kenngrößen für den Alterungszustand SoH) gleichzeitig geschätzt. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Berücksichtigung der unterschiedlichen Zeitkonstanten für die Beobachtung von SoC und SoH, da sich der SoH in der Regel viel langsamer ändert als der SoC.

[0049] Beim kaskadierten Beobachter gibt es einen inneren Beobachter(kreis) welcher darauf abzielt, den SoC möglichst exakt zu bestimmen und der oben beschrieben ist. Ein auf dem inneren Beobachter 13 aufbauender äußerer Beobachter 14 stellt dann einen übergeordneten Schätzer für die SoH-Kenngröße dar, wie in Fig.10 dargestellt. Der Vorteil des kaskadierten Beobachters ist, dass die unterschiedlichen Zeitkonstanten für die beiden Beobachter bereits indirekt über die Architektur berücksichtigt werden. Der SoH-Schätzer kann durch die Trennung in einen inneren und äußeren Beobachter somit auch mit einer deutlich geringeren Abtastzeit betrieben werden. Der kaskadierte Beobachter wird daher bevorzugt.

[0050] In Fig.10 ist der Beobachter aus Fig.5 um einen Beobachter 14 für den Alterungszustand SoH, bzw. einer Kenngröße dafür, wie hier z.B. $\hat{C}_{akt}$, in kaskadierter Ausführung ergänzt worden. Das ermittelte erweiterte Zustandsraummodell 12, ergänzt um die oben beschriebene Berücksichtigung der Kenngröße für den Alterungszustand SoH, und der nichtlineare Beobachter 13 für den Ladezustand SoC sind wiederum vorgesehen. Hinzugekommen ist ein Beobachter 14 für die Schätzung der Kenngröße des Alterungszustandes, hier der aktuellen Kapazität $\hat{C}_{akt}$.

[0051] Zur Schätzung der Kenngröße wird ein Beobachtungsfehler e bezüglich der Kenngröße minimiert. Der Beobachtungsfehler e wird z.B. aus der Differenz aus der gemessenen Ausgangsgröße y , hier die Batteriespannung U , und der vom nichtlinearen Batteriemodell bzw. vom Zustandsraummodell 12 berechneten Ausgangsgröße $\hat{y}$, hier die geschätzte Batteriespannung $\hat{U}$, ermittelt. Um die Kenngröße zu schätzen, wird der Beobachtungsfehler e in einem gewissen Zeitfenster $t=0\dots T$ betrachtet, wobei jedoch nur zurückliegende Werte berücksichtigt werden.

Das Ziel der Schätzung/Optimierung im Beobachter 14 ist nun, ein bestimmtes Gütemaß bezüglich des Beobachtungsfehlers e zu minimieren. Als Gütemaß kann z.B. das Minimum der Fehlerquadrate $\int_{i=0}^T e^2(t)dt = \min_{\hat{C}_{akt}}$ herangezogen werden. Alternativ kann auf eine möglichst symmet-

rische Fehlerverteilung abgezielt werden, z.B. in der Form $\int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{\max}} (h(\varepsilon) - h(-\varepsilon))^2 d\varepsilon = \min_{\hat{C}_{akt}}$, oder auf

eine Minimierung des Offsets des Schätzfehlers, z.B. in der Form $\int_{\varepsilon=-\varepsilon_{\max}}^{\varepsilon_{\max}} h(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon = \min_{\hat{C}_{akt}}$, wobei

die Funktion eine beliebige Verteilungsfunktion, z.B. die Normalverteilung, sein kann.

[0052] Dabei kann man so vorgehen, dass im Zeitfenster $t=0\dots T$ die Ausgangsgröße $\hat{U}$ für verschiedene Kapazitäten $\hat{C}_{akt}$, z.B. zwischen einem vorgegebenen $C_{\min}$ und einem $C_{\max}$, vom nichtlinearen Batteriemodell bzw. vom Zustandsraummodell 12 berechnet und der SoC geschätzt wird und daraus mit der zum jeweiligen Zeitpunkt zugehörige gemessenen Ausgangsgröße U der Beobachtungsfehler e ermittelt wird. Daraus kann dann über das Gütemaß die Kapazität $\hat{C}_{akt}$ bestimmt werden, die den Beobachtungsfehler e gemäß dem Gütemaß minimiert. Durch Anpassung von $\hat{C}_{akt}$ wird also ein bestimmtes Gütemaß des Beobachtungsfehlers e minimiert, was letztendlich dazu führt, dass jene Kapazität $\hat{C}_{akt}$ ermittelt wird, welche das Verhalten der Batterie 10 am besten erklärt.

[0053] Dabei können auch Rand- und Nebenbedingungen berücksichtigt werden, z.B. monotoner Abfall der Kapazität $\hat{C}_{akt}$ über der Zeit, da die Batterie 10 nur älter werden kann, nicht jedoch jünger. Der kombinierte Beobachter hat also generell zum Ziel, dass die Abweichungen der geschätzten Zustände von den tatsächlichen Werten minimiert und dabei Rand- und Nebenbedingungen in Form von Gleichheits- oder Ungleichheitsbeschränkungen berücksichtigt werden. Diese Nebenbedingungen können verwendet werden, um z.B. Änderungsraten der Kapazität, die Richtung der SoH-Korrektur, etc. zu beschränken oder zu bestrafen. Je nach Architektur und Formulierung des Gütemaßes und der Beschränkungen können unterschiedliche, aber an sich bekannte, Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen.

[0054] Der so ermittelte Beobachter 14 kann dann den SoH, bzw. eine Kenngröße des SoH, bestimmen. In Fig.11 ist die mit dem kombinierten SoH/SoC-Beobachter geschätzte Kenngröße $\hat{C}_{akt}$, bezogen auf die Nennkapazität C_{init} einer Batterie, in Abhängigkeit der Anzahl voller Lade-/Entladezyklen Z dargestellt (mit Kreuzen). Mit Punkten ist der tatsächlich gemessene Kapazitätsabfall dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich der Alterungszustand SoH, bzw. eine Kenngröße dafür, durch das beschriebene Verfahren sehr gut schätzen lässt.

[0055] Nachdem der Beobachter für den Alterungszustand SoH auf den vergangenen Daten basiert, kann die SoH-Schätzung viel langsamer erfolgen, als die SoC-Schätzung. Der Beobachter für den SoC berücksichtigt dabei immer den aktuellen Schätzwert für den SoH, bzw. der Kenngröße dafür.

[0056] Im Falle eines vollständigen Beobachters wäre der Beobachter 14 für den Alterungszustand SoH im Beobachter 13 für den SoC integriert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung eines regelungstechnischen Beobachters (13) zur Schätzung des SoC einer Batterie (10), umfassend die folgenden Verfahrensschritte:
 - Vorgeben eines Ausgangs-Anregungssignals der Batterie (10), wobei das Anregungssignal aus einer zeitlichen Abfolge von einer Vielzahl von durch den Laststrom (I) und den SoC-Wert definierten Designpunkten besteht,
 - Vorgeben eines Ausgangsmodells der Batterie (10), mit einem Modellausgang (y) und Modellparametern (ψ),
 - Ermitteln eines optimierten Versuchsplans in Form einer optimierten zeitlichen Abfolge von Designpunkten mittels einer modellbasierten Design of Experiments Methode auf Basis der Fisher Information Matrix (I_{FIM}) definiert durch

$$I_{FIM} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^N \frac{\partial y(k, \psi)}{\partial \psi} \frac{\partial y(k, \psi)^T}{\partial \psi} \text{ und eines Beurteilungskriteriums,}$$

- Beaufschlagen der Batterie (10) mit den einzelnen Designpunkten in der zeitlichen Sequenz gemäß dem ermittelten Versuchsplan, wobei dabei Messwerte von Zustandsgrößen der Batterie (10) erfasst werden,
 - Ermitteln eines nichtlinearen Modells der Batterie (10) auf Basis der ermittelten Messwerte und anhand eines lokalen Modellnetzwerks bestehend aus einer Anzahl von lokalen, linearen, zeitinvarianten, dynamischen Modellen (LM_i), die jeweils in bestimmten Bereichen der Eingangsgrößen Gültigkeit haben, wobei der Modellausgang als gewichtete Linearkombination der Ausgänge der lokalen Modelle (LM_i) bestimmt wird,
 - Umwandeln der lokalen Modelle (LM_i) des Modellnetzwerks in lokale, lineare Zustandsraummodelle, mit einem Zustandsvektor, der den SoC enthält,
 - Erstellen eines lokalen Beobachters für jedes lokale, lineare Zustandsraummodell und
 - Erstellen des regelungstechnischen Beobachters (13) aus einer Linearkombination der lokalen Beobachter.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der optimierte Versuchsplan durch Minimierung einer Ergebnisfunktion $J_{opt} = \alpha \frac{J_{FIM, init}}{J_{FIM, opt}} + (1 - \alpha) \frac{T_{opt}}{T_{init}}$ ermittelt wird, wobei bei J_{FIM} die Determinante der Fisher Information Matrix und α ein Gewichtungsfaktor ist.
 3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass jedes i-te lokale Modell (LM_i) des lokalen Modellnetzwerks (LMN) aus einer Gültigkeitsfunktion (Φ_i) und einem Modellparametervektor θ_i besteht, wobei der Modellparametervektor (θ_i) alle Modellparameter für das i-te Modell (LM_i) umfasst und die Gültigkeitsfunktion (Φ_i) den Gültigkeitsbereich des i-ten lokalen Modells (LM_i) definiert, und ein lokaler Schätzwert der Ausgangsgröße $\hat{y}_i(k)$ des i-ten lokalen Modells (LM_i) zum Zeitpunkt k aus $\hat{y}_i(k) = x^T(k) \theta_i$ ermittelt wird, wobei $x(k)$ einen Regressionsvektor bezeichnet, der gegenwärtige und vergangene Ein- und Ausgänge enthält, dass der globale Modellausgang $\hat{y}(k)$ aus einer Linearkombination mit einer Wichtung der lokalen Modellausgänge durch die Gültigkeitsfunktion (Φ_i) gemäß $y(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k) \hat{y}_i(k)$ ermittelt wird und dass der Modellparametervektor (θ_i) mittels einer Optimierung, die den Fehler zwischen geschätzter Ausgangsgröße und gemessener Ausgangsgröße minimiert, ermittelt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jedes i-te lokale Modell (LM_i) ein Zustandsvektor $z_i(k) = A_i z_i(k-1) + B_i u(k)$ angesetzt wird, wobei sich die Systemmatrix A_i und die Eingangsmatrix B_i aus dem ermittelten Modellparametervektor (θ_i) ergeben, und sich der gesamte Systemzustand durch Wichtung der lokalen Zustände mit der Gültigkeits-

funktion (Φ_i) zu $z(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k-1) \{A_i z_i(k-1) + B_i u(k)\}$ und der globale Modellausgang zu $y(k) = C z(k)$, mit $C = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]$, ergibt und dass für jeden lokalen Zustand ein lokaler Kalman Filter mit der Verstärkungsmatrix K_i ermittelt wird, um den lokalen Zustand zu schätzen.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich der geschätzte Zustand $\hat{z}(k)$, der den geschätzten SoC enthält, aus der Gleichung,

$$\hat{z}(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k-1) \{z_i^*(k) + K_i [y(k) - \hat{y}(k)]\} \text{ mit } z_i^*(k) = A_i \hat{z}(k-1) + B_i u(k) \text{ und}$$

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^M \Phi_i(k-1) C z_i^*(k) \text{ ergibt.}$$

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch zumindest eine Kenngröße (C_{akt} , R_{akt}) für den Alterungszustand (SoH) der Batterie (10) zumindest eine Eingangsgröße des lokalen Modellnetzwerks (LMN) skaliert wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch zumindest eine Kenngröße (C_{akt} , R_{akt}) für den Alterungszustand (SoH) der Batterie (10) zumindest ein Modellparameter des lokalen Modellnetzwerks (LMN) skaliert wird.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Beobachter für den SoC um einen Beobachter (14) für die Kenngröße (C_{akt} , R_{akt}) erweitert wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch den Beobachter für den SoH ein Beobachtungsfehler (e) zwischen gemessener Ausgangsgröße (y) und geschätzter Ausgangsgröße ($\hat{y}$) des nichtlinearen Batteriemodells mit Hilfe eines vorgegebenen Gütemaßes für den Beobachtungsfehler (e) bezüglich der Kenngröße (C_{akt} , R_{akt}) minimiert wird.

Hierzu 7 Blatt Zeichnungen

1/7

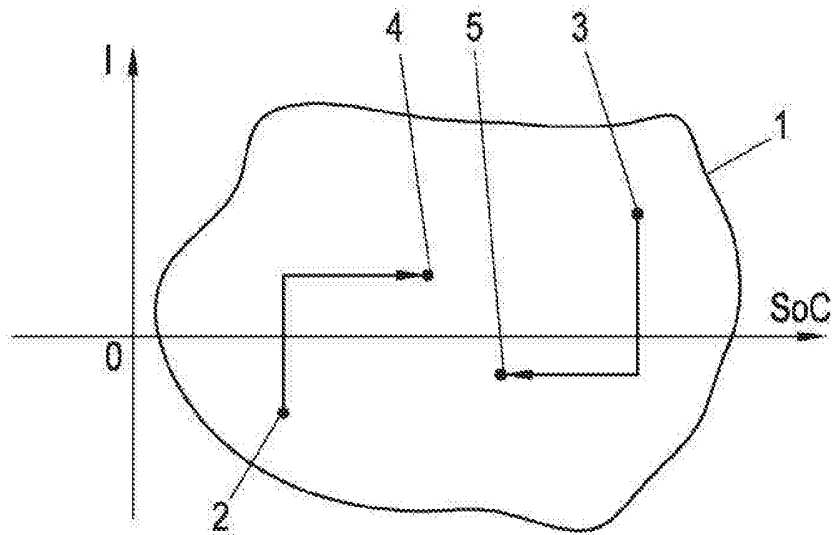


Fig. 1

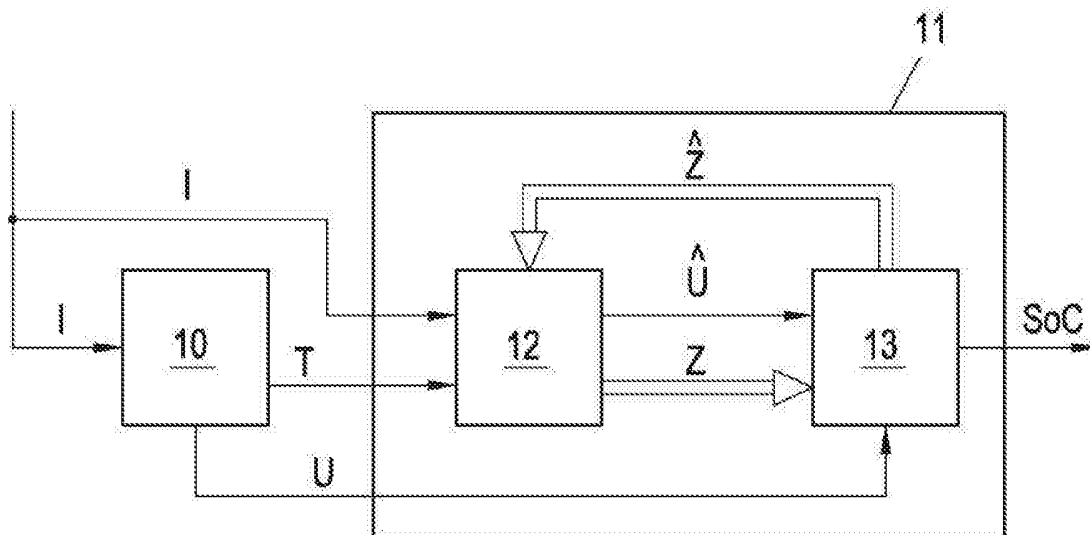


Fig. 5

2/7

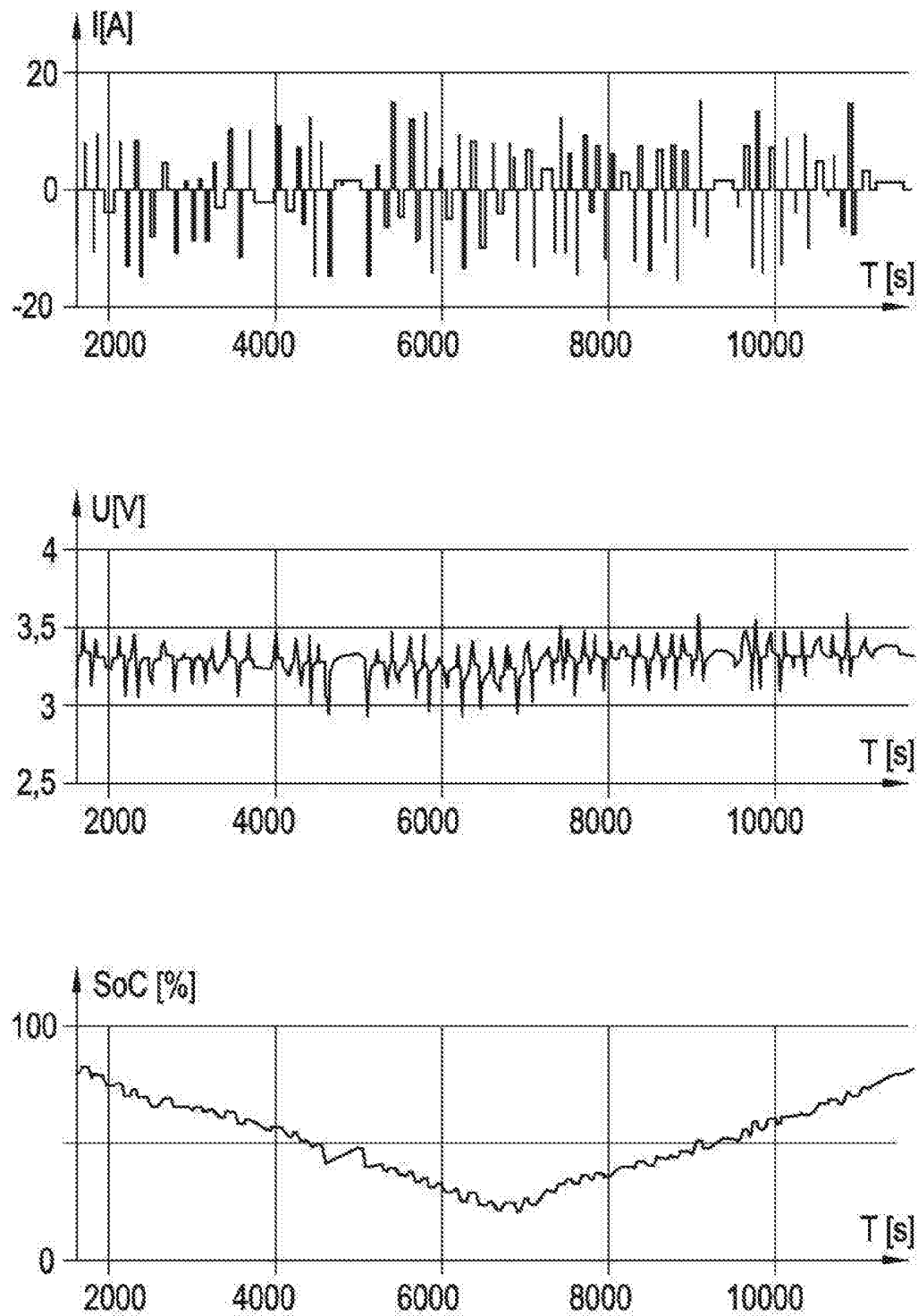


Fig. 2

3/7

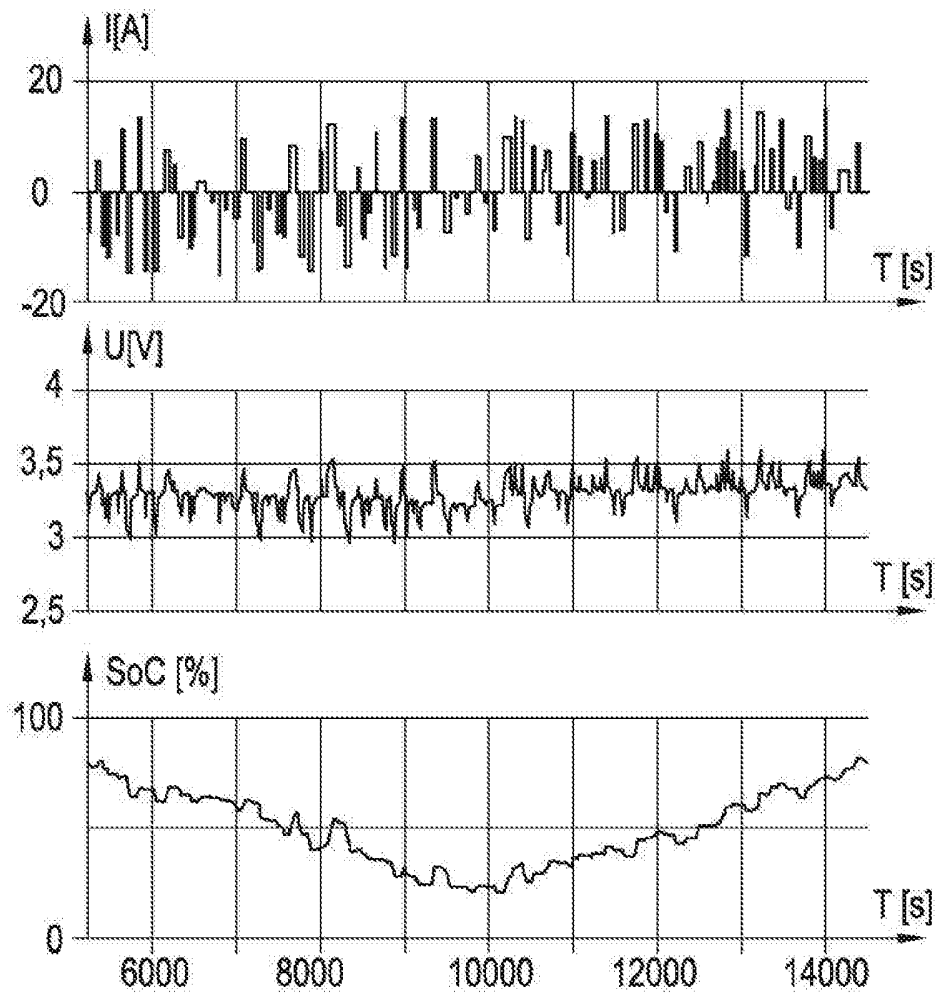


Fig. 3

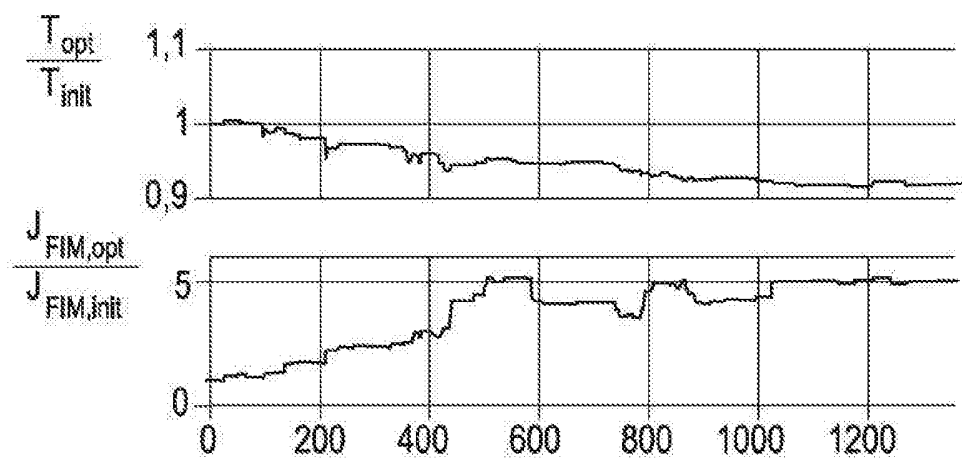


Fig. 4

4/7

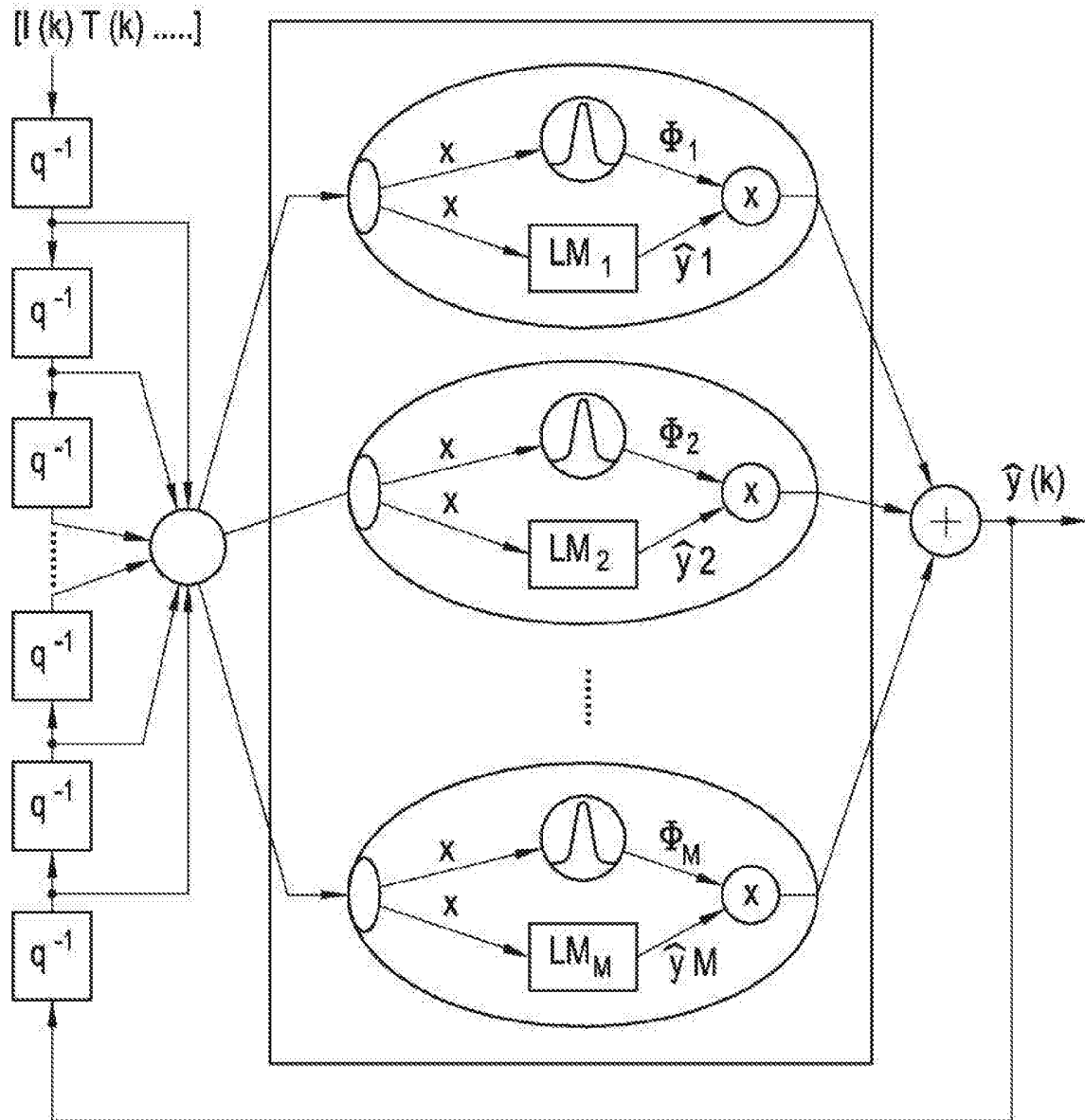


Fig. 6

5/7

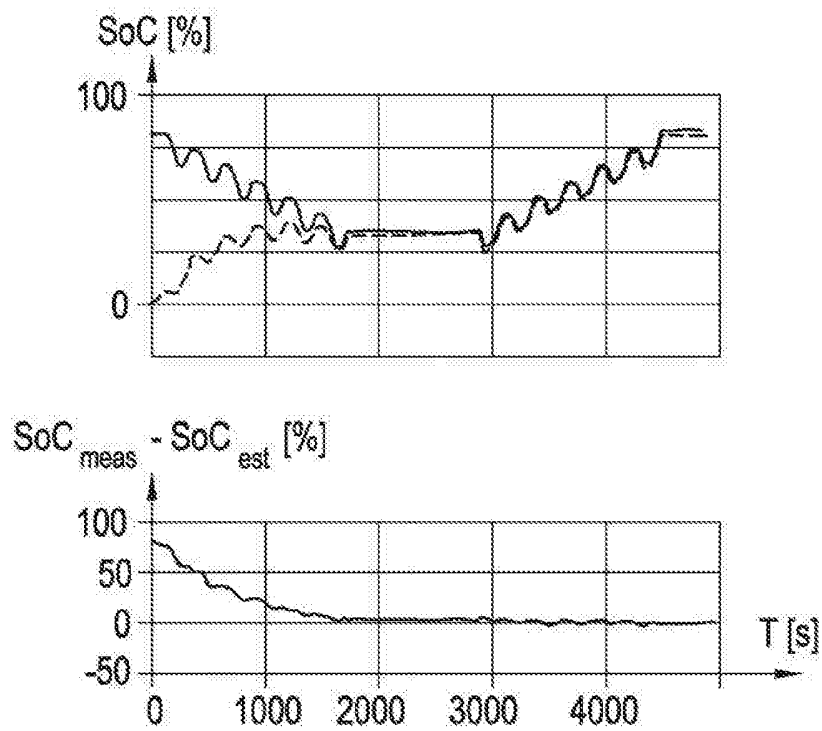


Fig. 7

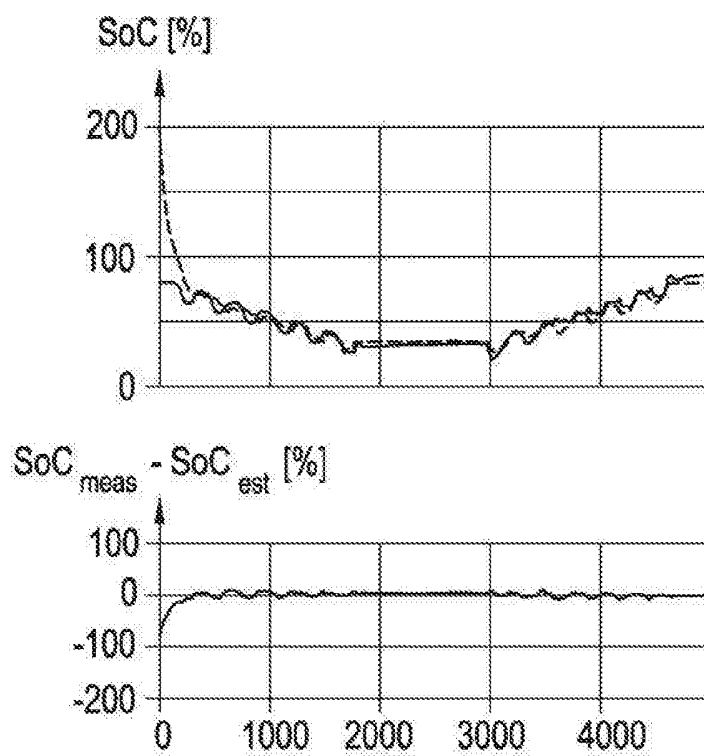


Fig. 8

6/7

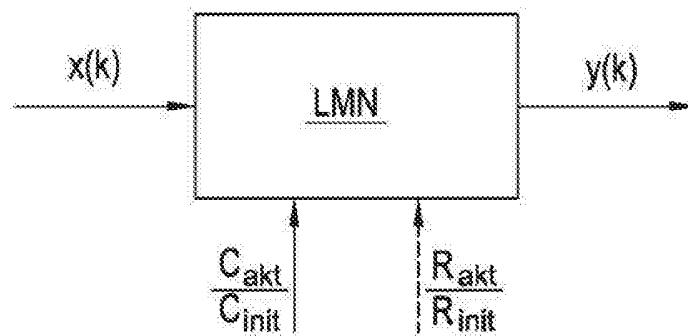


Fig. 9

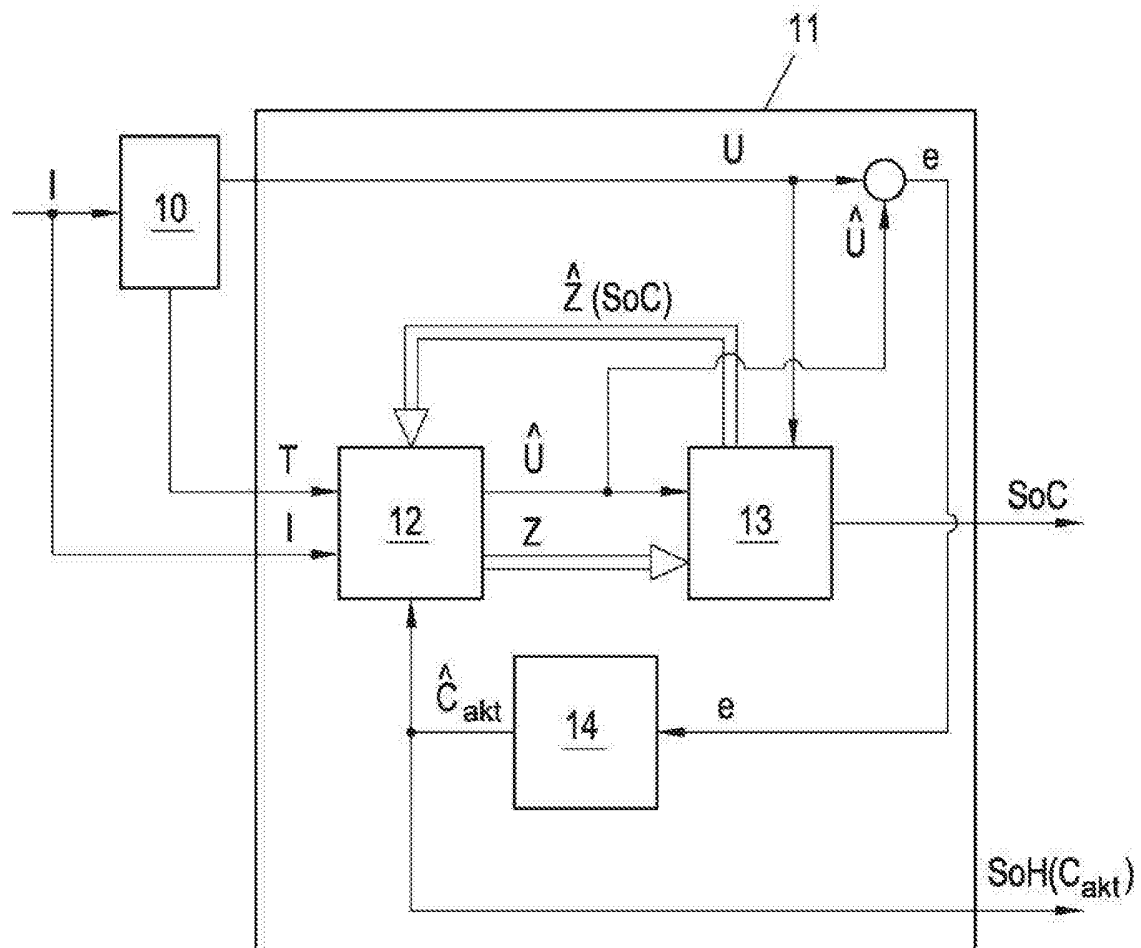


Fig. 10

7/7

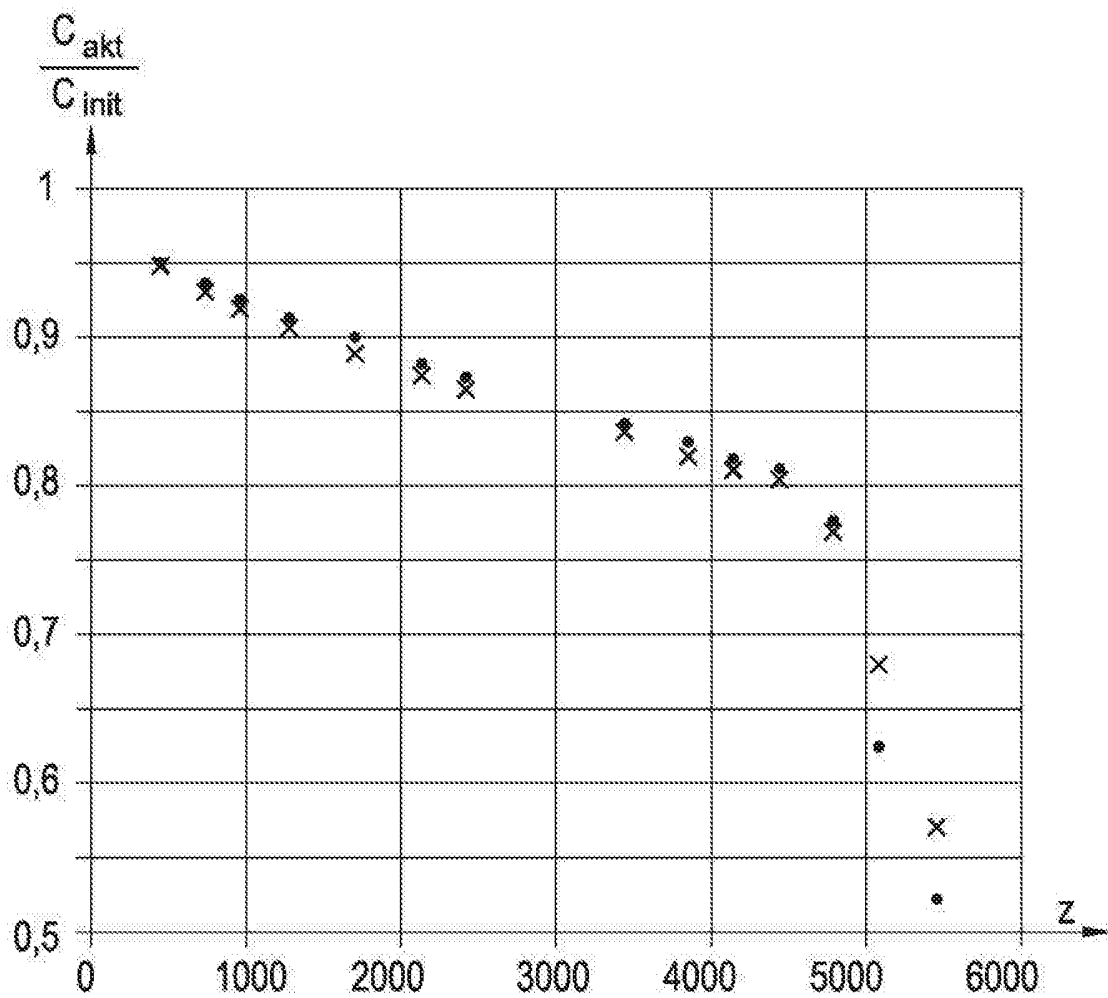


Fig. 11