



(10) **DE 10 2015 011 745 B3** 2016.09.22

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 011 745.9**  
 (22) Anmeldetag: **04.09.2015**  
 (43) Offenlegungstag: –  
 (45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **22.09.2016**

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

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**AUDI AG, 85045 Ingolstadt, DE**

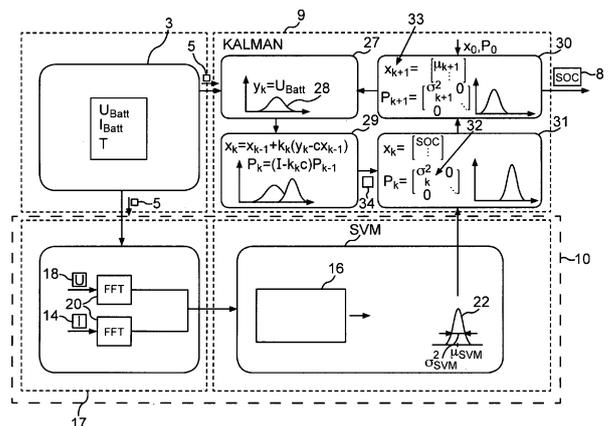
(72) Erfinder:  
**Jansen, Patrick, 85051 Ingolstadt, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:  
**DE 10 2013 018 405 A1**

**ZHANG, Jingliang; LEE, Jay. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery. Journal of Power Sources, 2011, 196. Jg., Nr. 15, S. 6007-6014.**

(54) Bezeichnung: **Ladezustandsbestimmung bei einer Kraftfahrzeug-Batterie**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Ladezustands (8) einer elektrischen Batterie (2) in einem Kraftfahrzeug (1), wobei in aufeinanderfolgenden Messzyklen (k) jeweils ein jeweiliger Messwert (5) zumindest einer Betriebsgröße ( $U_{BATT}$ ,  $I_{BATT}$ , T) der Batterie (2) gemessen wird und durch eine Kalman-Filtereinrichtung (9) in einem Korrekturschritt (29) ein aktueller Zustandsvektor aus einem vorangegangenen Zustandsvektor und eine aktuelle Kovarianz eines Schätzfehlers aus einer vorangegangenen Kovarianz des Schätzfehlers berechnet werden und in einem Prädiktionsschritt (30) aus dem aktuellen Zustandsvektor ein prädizierter Zustandsvektor (33) und aus der aktuellen Kovarianz eine prädizierte Kovarianz berechnet wird, und in einem Ausgabeschritt ein in dem neuen prädizierten Zustandsvektor (33) enthaltener geschätzter Ladezustandswert (SOC) als der Ladezustand (8) ausgegeben wird. Die Schätzung des Ladezustandswerts (SOC) soll robust sein. Die Erfindung sieht vor, dass vor dem Korrekturschritt (29) in dem vorangegangenen Zustandsvektor oder vor dem Prädiktionsschritt (30) in dem aktuellen Zustandsvektor der Ladezustandswert durch einen Schätzwert ersetzt wird, der durch eine von der Kalman-Filtereinrichtung (9) unabhängige Schätzeinrichtung (10) für den Ladezustand ermittelt wird.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Ladezustands einer elektrischen Batterie in einem Kraftfahrzeug. Bei dem Verfahren wird in aufeinanderfolgenden Messzyklen jeweils ein jeweiliger Messwert zumindest einer Betriebsgröße der Batterie gemessen und durch eine Kalman-Filtereinrichtung jeweils ein Zustandsvektor prädiziert, der als ein Vektoreintrag einen geschätzten Ladezustandswert enthält, der als Ladezustand ausgegeben wird. Zu der Erfindung gehört auch eine Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens. Schließlich gehört zu der Erfindung ein Kraftfahrzeug, welches die Vorrichtung aufweist.

**[0002]** Die exakte Ermittlung des Ladezustands einer Kraftfahrzeug-Batterie, insbesondere einer Lithium-Ionen-Batterie, stellt eine Herausforderung für die Signalverarbeitung dar. Die Anforderungen an die Genauigkeit des ermittelten Ladezustands sind insbesondere im automobilen Anwendungsbereich von großer Bedeutung, um in einem Kraftfahrzeug einen sicheren und effizienten Betrieb des elektrochemischen Energiespeichers, das heißt der Batterie, gewährleisten zu können.

**[0003]** Aus der DE 10 2013 018 405 A1 ist ein Verfahren zum Ermitteln eines den Zustand einer Batterie kennzeichnenden Schätzparameters bekannt, bei dem ein Berechnungsergebnis einer Support-Vector-Maschine als initiale Startgröße einen verwendeten Kalman-Filter verwendet.

**[0004]** Aus der Publikation von Zhang und Lee (2011, A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery, Journal of power sources, 196 (15), S. 6007 bis 6014) ist ein Überblick über gängige Verfahren gegeben, einen Ladezustand einer Batterie zu bestimmen. Unter anderem wird dabei die Verwendung von einem „extended Kalman filter“ angesprochen.

**[0005]** Bereits bekannte, auf einem elektrischen Ersatzschaltbild basierende Verfahren, wie das Kalman-Filter, das Extended-Kalman-Filter oder der Zustandsbeobachter, stoßen hierbei an ihre Grenzen. Grund hierfür sind zwei wesentliche Punkte, die insbesondere bei der Lithium-Eisenphosphat-Technologie eine Rolle spielen: Zum einen das sehr flache Plateau der Ruhespannungs-Kennlinie im mittleren Ladezustandsbereich und zum anderen die Genauigkeit des elektrischen Ersatzschaltbilds bezüglich der Netzwerkparameter, die zur Berechnung der Ruhespannung aus der Klemmenspannung zugrundegelegt werden. So kann bei den ruhespannungsbasierten Verfahren die Ladezustandsermittlung im mittleren Bereich mit Genauigkeiten im einstelligen Prozentbereich nur mit sehr großem messtechnischen Aufwand realisiert werden.

**[0006]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Ladezustand einer Kraftfahrzeug-Batterie zu ermitteln.

**[0007]** Die Aufgabe wird durch die Gegenstände der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind durch die Merkmale der abhängigen Patentansprüche gegeben.

**[0008]** Durch die Erfindung ist ein Verfahren zum Ermitteln eines Ladezustands einer elektrischen Batterie in einem Kraftfahrzeug bereitgestellt. Unter Batterie ist im Zusammenhang mit der Erfindung ein elektrochemischer Akkumulator zu verstehen, insbesondere eine Lithium-Ionen-Batterie. Bei dem Verfahren wird in aufeinanderfolgenden Messzyklen jeweils ein jeweiliger Messwert zumindest einer Betriebsgröße der Batterie gemessen. Durch eine Kalman-Filtereinrichtung werden die folgenden, an sich bekannten Schritte durchgeführt. In einem Updateschritt oder Korrekturschritt werden ein aktueller Zustandsvektor aus einem vorangegangenen Zustandsvektor, die jeweils einen Ladezustandswert des Ladezustands enthalten, und eine aktuelle Kovarianz eines Schätzfehlers der Kalman-Filtereinrichtung aus einer vorangegangenen Kovarianz des Schätzfehlers berechnet. Der aktuelle Zustandsvektor kann in an sich bekannter Weise aus einem prädizierten Zustandsvektor des unmittelbar vorangegangenen Messzyklus ermittelt werden, der also den vorangegangenen Zustandsvektor darstellt. Genauso kann die aktuelle Kovarianz aus einer prädizierten Kovarianz des unmittelbar vorangegangenen Messzyklus ermittelt werden, die also die vorangegangene Kovarianz darstellt.

**[0009]** Aus dem aktuellen Zustandsvektor wird in einem Prädiktionsschritt ein neuer prädizierter Zustandsvektor und aus der aktuellen Kovarianz eine neue prädizierte Kovarianz berechnet. Die für den Korrekturschritt und den Prädiktionsschritt nötigen Berechnungen sind an sich aus der Theorie für das Kalman-Filter bekannt. In dem neuen prädizierten Zustandsvektor ist ein geschätzter Ladezustandswert enthalten. Dieser geschätzte Ladezustandswert wird in einem Ausgabeschritt als der aktuelle Ladezustand ausgegeben.

**[0010]** Um nun die beschriebenen Unzulänglichkeiten oder Nachteile des Kalman-Filters bei einem flachen Plateau der Ruhespannung zu kompensieren, sieht die Erfindung vor, dass vor dem Korrekturschritt (29) in dem vorangegangenen Zustandsvektor oder vor dem Prädiktionsschritt in dem aktuellen Zustandsvektor der Ladezustandswert durch einen Schätzwert ersetzt wird, der durch eine von der Kalman-Filtereinrichtung unabhängige Schätzeinrichtung ermittelt wird. Mit anderen Worten wird zum Berechnen des prädizierten Zustandsvektors nicht der originale aktuelle Zustandsvektor verwendet, sondern ein manipulierter aktueller Zustandsvek-

tor, bei welchem ein Vektoreintrag, nämlich der Ladezustandswert, durch einen Schätzwert ersetzt worden ist, der mittels der unabhängigen Schätzeinrichtung des Ladezustands ermittelt worden ist.

**[0011]** Durch die Erfindung ergibt sich der Vorteil, dass der Ladezustandswert des aktuellen Zustandsvektors und der korrespondierende Ladezustandswert des prädierten Zustandsvektors dahingehend entkoppelt werden, dass zwei unterschiedliche Schätzeinrichtungen, nämlich zum einen die Kalman-Filtereinrichtung und zum anderen die von der Kalman-Filtereinrichtung unabhängige Schätzeinrichtung, verwendet werden. Hierdurch kann die Kovarianz des Schätzfehlers insbesondere in einem flachen Plateau der Ruhespannungskennlinie verringert oder stabilisiert werden.

**[0012]** Zu der Erfindung gehören auch optionale Weiterbildungen, durch deren Merkmale sich zusätzliche Vorteile ergeben.

**[0013]** Gemäß einer Weiterbildung umfasst die zumindest eine Betriebsgröße, die für die Schätzung zugrundegelegt wird, eine Klemmenspannung der Batterie und/oder einen Batteriestrom der Batterie und/oder eine Temperatur der Batterie. Diese Betriebsgrößen sind in vorteilhafter Weise von außen messbar, das heißt sie stellen geeignete Beobachtungsgrößen dar. Der innere Betriebszustand, nämlich insbesondere der Ladezustand der Batterie, wird dann mittels der Kalman-Filtereinrichtung und der Schätzeinrichtung aus diesen Betriebsgrößen ermittelt.

**[0014]** Gemäß einer Weiterbildung wird durch die Schätzeinrichtung zusätzlich ein Varianzwert der Schätzvarianz ermittelt. Vor dem Korrekturschritt in einer die vorangegangene Kovarianz beschreibenden Kovarianzmatrix oder vor dem Prädiktionsschritt wird in einer die aktuelle Kovarianz des Schätzfehlers beschreibenden Kovarianzmatrix dieser Varianzwert als Matrixeintrag gespeichert. Mit anderen Worten wird vor dem Korrekturschritt oder vor dem Prädiktionsschritt nicht nur der Ladezustandswert überschrieben oder ersetzt, sondern auch der Wert für die Kovarianz. Hierdurch ergibt sich eine genauere Anpassung der Kalman-Verstärkung oder des Kalman-Gains, die dann auf der Varianz des von der unabhängigen Schätzeinrichtung ermittelten Schätzwerts des Ladezustands beruht.

**[0015]** Um eine geeignete alternative Schätzung des Ladezustandswerts mittels der Schätzeinrichtung zu erreichen, wird gemäß einer Weiterbildung durch die Schätzeinrichtung auf der Grundlage der Messwerte mehrerer Messzyklen eine jeweilige Zeitreihe für die zumindest eine Betriebsgröße gebildet. Es kann also eine Zeitreihe für die Klemmenspannung und/oder eine Zeitreihe für den Batteriestrom gebildet werden. Mittels einer Frequenzanalyse, beispielsweise einer

Fourier-Transformation, wird eine frequenzabhängige Impedanz der Batterie aus der zumindest einen Zeitreihe ermittelt. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass einerseits mittels der Kalman-Filtereinrichtung eine Ladezustandsschätzung auf der Grundlage eines Signals im Zeitbereich und mittels der unabhängigen Schätzeinrichtung eine Schätzung des Ladezustands auf der Grundlage eines Signals im Frequenzbereich ermittelt wird. Dies resultiert in einer besonders robusten Schätzung des Ladezustands.

**[0016]** Gemäß einer Weiterbildung wird durch die Schätzeinrichtung mittels einer Support-Vector-Machine durch Klassieren der Messwerte oder von daraus hergeleiteten Werten eine aus mehreren vorbestimmten Klassen ausgewählt, wobei jede Klasse einen Ladezustand repräsentiert. Die hergeleiteten Werte können z. B. die beschriebene frequenzabhängige Impedanz der Batterie umfassen. Die ausgewählte Klasse legt dann also den Schätzwert der Schätzeinrichtung für den Ladezustand fest, der dann in den aktuellen Zustandsvektor eingetragen wird. Diese Weiterbildung weist den Vorteil auf, dass keine integrierende Zustandsschätzung zugrundegelegt wird, wie sie bei der Kalman-Filtereinrichtung nötig ist, die auf einem Zustandsraummodell basiert, das eine Amperestunden-Integration vorsieht. Dagegen ist mittels der Support-Vector-Machine durch die Klassierung der Messwerte direkt ein Schätzwert für den Ladezustand durch Ermitteln oder Auswählen der aktuellen Klasse bereitgestellt.

**[0017]** Eine Weiterbildung berücksichtigt, dass die Kalman-Filtereinrichtung einerseits und die davon unabhängige Schätzeinrichtung andererseits für unterschiedliche Betriebssituationen unterschiedlich genau sein können. Bei dieser Weiterbildung wird der Ladezustandswert durch den Schätzwert der Schätzeinrichtung nur ersetzt, falls in zumindest einem vorangegangenen Messzyklus der ermittelte Ladezustand in einem vorbestimmten Ladezustandsbereich liegt. Hierdurch kann beispielsweise das beschriebene flache Plateau der Ruhespannungskennlinie abgegrenzt werden, für welches dann die Schätzeinrichtung verwendet wird, während der Ladezustand der Batterie außerhalb des Ladezustandsbereichs, also bei vollgeladener oder nahezu vollgeladener Batterie einerseits und nahezu entladener oder entladener Batterie andererseits ausschließlich die Kalman-Filtereinrichtung verwendet werden kann.

**[0018]** Eine Weiterbildung sieht in diesem Zusammenhang vor, die Auswahl zwischen der Kalman-Filtereinrichtung und der unabhängigen Schätzeinrichtung von der aktuellen Schätzgüte abhängig zu machen. Bei dieser Weiterbildung wird der Ladezustandswert durch den Schätzwert der Schätzeinrichtung nur ersetzt, falls die vorangegangene oder die aktuelle Kovarianz ein vorbestimmtes Gütekriterium verletzt. Diese Weiterbildung weist den Vorteil

auf, dass unabhängig vom aktuellen Ladezustand die Auswahl in Abhängigkeit von der aktuellen Schätzgüte erfolgt. Das Gütekriterium kann beispielsweise einen Grenzwert oder ein Werteintervall für die Kovarianz vorsehen. Unterhalb des Grenzwerts beziehungsweise innerhalb des Werteintervalls wird dann nur die Kalman-Filtereinrichtung verwendet, während oberhalb des Grenzwerts beziehungsweise außerhalb des Werteintervalls dann in der beschriebenen Weise mittels der Schätzeinrichtung der zusätzliche Schätzwert ermittelt wird, der dann in den aktuellen Zustandsvektor eingesetzt wird.

**[0019]** Zu der Erfindung gehört auch eine Vorrichtung für ein Kraftfahrzeug, mittels welcher das erfindungsgemäße Verfahren durchgeführt werden kann. Die Vorrichtung kann beispielsweise als Steuergerät, insbesondere als Batteriesteuergerät, ausgestaltet sein. Die Vorrichtung weist einen Messeingang zum Empfangen von jeweiligen Messwerten zumindest einer Betriebsgröße der Batterie auf. Des Weiteren ist eine Recheneinrichtung bereitgestellt, die beispielsweise mittels eines Mikrocontrollers oder eines Mikroprozessors realisiert sein kann. Die Recheneinrichtung umfasst eine Kalman-Filtereinrichtung zum Schätzen eines Ladezustands einer Batterie des Kraftfahrzeugs sowie eine von der Kalman-Filtereinrichtung unabhängige Schätzeinrichtung zum Erzeugen eines Schätzwerts für den Ladezustand. Die Kalman-Filtereinrichtung und die Schätzeinrichtung können beispielsweise auf der Grundlage eines oder mehrerer Programmmodule für die Recheneinrichtung realisiert sein. Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist dazu ausgelegt, eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen.

**[0020]** Schließlich gehört zu der Erfindung auch ein Kraftfahrzeug. Das Kraftfahrzeug weist eine Batterie, insbesondere eine Lithium-Ionen-Batterie auf. Des Weiteren ist eine Messeinrichtung zum Messen von Messwerten zumindest einer Betriebsgröße der Batterie vorgesehen. Hierbei handelt es sich insbesondere um eine Klemmenspannung der Batterie und/oder einen Batteriestrom der Batterie und/oder eine Temperatur der Batterie. Schließlich ist in dem Kraftfahrzeug eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung bereitgestellt, die mit der Messeinrichtung gekoppelt ist.

**[0021]** Das erfindungsgemäße Kraftfahrzeug ist bevorzugt als Kraftwagen, insbesondere als Personenkraftwagen, ausgestaltet.

**[0022]** Im Folgenden ist ein Ausführungsbeispiel der Erfindung beschreiben. Dabei zeigt:

**[0023]** Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Kraftfahrzeugs,

**[0024]** Fig. 2 ein Diagramm mit Ruhespannungskennlinien,

**[0025]** Fig. 3 ein Batteriemodell,

**[0026]** Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Kalman-Filtereinrichtung,

**[0027]** Fig. 5 ein Diagramm mit frequenzabhängigen Impedanzen,

**[0028]** Fig. 6 eine Skizze zur Veranschaulichung einer Support-Vector-Maschine,

**[0029]** Fig. 7 eine Skizze zur Veranschaulichung einer Klassierung, und

**[0030]** Fig. 8 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

**[0031]** Bei dem im Folgenden erläuterten Ausführungsbeispiel handelt es sich um eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung. Bei dem Ausführungsbeispiel stellen die beschriebenen Komponenten der Ausführungsform jeweils einzelne, unabhängig voneinander zu betrachtende Merkmale der Erfindung dar, welche die Erfindung jeweils auch unabhängig voneinander weiterbilden und damit auch einzeln oder in einer anderen als der gezeigten Kombination als Bestandteil der Erfindung anzusehen sind. Des Weiteren ist die beschriebene Ausführungsform auch durch weitere der bereits beschriebenen Merkmale der Erfindung ergänzbar.

**[0032]** In den Figuren sind funktionsgleiche Elemente jeweils mit denselben Bezugszeichen versehen.

**[0033]** Fig. 1 zeigt ein Kraftfahrzeug **1**, bei dem es sich beispielsweise um einen Kraftwagen, insbesondere einen Personenkraftwagen, handeln kann. Das Kraftfahrzeug **1** weist in dem gezeigten Beispiel eine Batterie **2**, eine Messeinrichtung **3** und eine Vorrichtung **4** auf. Die Batterie **2** kann beispielsweise eine Traktionsbatterie für einen elektrischen Antriebsmotor (nicht dargestellt) des Kraftfahrzeugs **1** sein. Die Batterie **2** kann beispielsweise eine Lithium-Ionen-Batterie sein. Sie kann insbesondere auf einer Lithium-Eisenphosphat-Technologie beruhen. Mittels der Vorrichtung **4** kann ein Ladezustand SOC (state of charge) der Batterie **2** ermittelt werden. Hierzu erfasst die Messeinrichtung **3** Messwerte **5** von Betriebsparametern oder Betriebsgrößen der Batterie **2**. Die Messeinrichtung **3** kann beispielsweise einen Temperatursensor **6** umfassen, der eine Temperatur  $T$  der Batterie **2** erfasst. Des Weiteren kann die Messeinrichtung **3** in an sich bekannter Weise dazu ausgelegt sein, einen Batteriestrom  $I_{\text{Batt}}$  und eine Klemmenspannung  $U_{\text{Batt}}$  von Klemmen **7** der Batterie **2** erfassen. Die Vorrichtung **4** kann beispielsweise

se als Steuergerät ausgestaltet sein. Die Vorrichtung **4** ermittelt auf der Grundlage der Messwerte **5** einen geschätzten Ladezustandswert **8** des Ladezustands SOC.

**[0034]** Fig. 2 veranschaulicht, welches Problem sich beim Schätzen des Ladezustands SOC ergeben kann. In Fig. 2 zeigt über die möglichen Werte des Ladezustands SOC in Prozent (%) die sich jeweils ergebende batterieinterne Ruhespannung  $U_{OCV}$  in Volt für eine Batteriezelle der Batterie **2**. Es ergeben sich eine Ladekurve **11** und eine Entladekurve **12**, die jeweils eine Ruhespannungskennlinie darstellen. In einem Ladezustandsbereich **13** weisen beide Ruhespannungskennlinie **11**, **12** ein flaches Plateau **14** auf. Hier ergibt schon ein geringer Schätzfehler der Ruhespannung  $U_{OCV}$  eine große Veränderung des geschätzten Ladezustands SOC. Die Schätzfehler können insbesondere daher herrühren, dass die Ruhespannung  $U_{OCV}$  nicht direkt gemessen werden kann.

**[0035]** Dies ist in Fig. 3 noch einmal anhand eines Batteriemodells **15** der Batterie **2** veranschaulicht. Die durch die Messeinrichtung **3** gemessene Klemmenspannung  $U_{Batt}$  setzt sich zusammen aus der Ruhespannung  $U_{OCV}$  und den über den internen Widerstand  $R_i$  und einem RC-Glied des Modells **15** abfallenden Spannungen  $U_{Ri}$  und  $U_{RC}$ . Hierbei hat auch die aktuelle Temperatur  $T$  einen Einfluss.

**[0036]** Die Kalman-Filtereinrichtung **9** ist für eine Erzeugung eines geschätzten Ladezustandswerts **8** außerhalb des Ladezustandsbereichs **13** besonders geeignet. Um die beschriebene Schwäche der Kalman-Filtereinrichtung **9** im Ladezustandsbereich **13** auszugleichen, ist die zusätzliche Schätzeinrichtung **10** bereitgestellt.

**[0037]** Fig. 4 zeigt die Kalman-Filtereinrichtung **9** im Detail. Durch die Kalman-Filtereinrichtung **9** ist ein Kalman-Filter realisiert, durch welches ein Zustandsvektor  $x_k$  geschätzt wird. Der Zustandsvektor  $x_k$  wird jeweils für einzelne Iterationen oder Messzyklen  $k$  aktualisiert. Der Zustandsvektor  $x_k$  umfasst Ladezustandswert  $SOC_k$  für den aktuellen Ladezustand SOC sowie einen aktuellen Schätzwert  $U_{RC,k}$  für die über dem RC-Glied abfallende batterieinterne Spannung  $U_{RC}$  (siehe Fig. 3):

$$x_k = \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{RC,k} \end{bmatrix}$$

**[0038]** Als Eingangsvektor  $u_k$  kann die aktuelle Strommessung für den Batteriestrom  $I_{Batt}$  verwendet werden:

$$u_k = I_{Batt,k}$$

**[0039]** Als Systemausgangsgröße  $y_k$  kann beispielsweise die ermittelte Klemmenspannung  $U_{Batt}$  verwendet werden.

**[0040]** Die in Fig. 4 dargestellten Filterkomponenten können auf der Grundlage des Batteriemodells **15** von Fig. 3 gebildet sein und stellen in an sich bekannter Weise die Eingangsmatrix  $b$ , die Durchgangsmatrix  $d$ , die Ausgangsmatrix  $c$ , die Kalman-Verstärkung oder den Kalman-Gain  $k_k$  und die Systemmatrix  $A$  dar. Die Kalman-Filtereinrichtung **9** dient der Prozess und Messrauschunterdrückung und reagiert auf stochastische Störungen, um bei entsprechender Systemkenntnis gemäß dem Batteriemodell **15** das Systemverhalten der Batterie **2** korrekt präzisieren zu können. Das Kalman-Filter nutzt ähnlich dem Zustandsbeobachter eine Rückführung wie in der folgenden Gleichung (2) beschrieben, um mit der Kalman-Verstärkung  $k_k$  die Abweichung zwischen der Ausgangsgröße des Modells und der Systemausgangsgröße  $y_k$  zu verringern. Durch das Ausregeln der Differenz nähert sich auch der Zustand des Modells demjenigen des Systems an. Im Gegensatz zum Zustandsbeobachter arbeitet das Kalman-Filter allerdings in zwei Schritten nach dem Prinzip der wechselseitigen Rekursion.

**[0041]** In diesem Updateschritt oder Korrekturschritt wird auch die Kalman-Verstärkung  $k_k$  berechnet. Diese ist im Gegensatz zur Verstärkung des Zustandsbeobachters kein fester Pol, sondern wird mit jedem Zeitschritt oder Messzyklus  $k$  über stochastische Ansätze mit der Kovarianz des Schätzfehlers  $P_k$  gemäß der folgenden Gleichung (3) und der Kovarianz des Systemrauschens  $R_k$  (fest vorgegeben) neu berechnet beziehungsweise korrigiert, wie in der folgenden Gleichung (1) beschrieben ist, um eine optimale Ausregung der Differenz mit hoher Dynamik gewährleisten zu können. Auf diese Weise kann das Mess- und Systemrauschen optimal unterdrückt werden.

$$k_k = P_{k-1}c^T(cP_{k-1}c^T + R_k)^{-1} \quad (1)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + k_k(y_k - c\hat{x}_{k-1}) \quad (2)$$

$$P_k = (I - k_k c)P_{k-1} \quad (3)$$

**[0042]** In einem Prädiktionsschritt berechnet das Kalman-Filter den zukünftigen Systemzustand, wie durch die folgende Gleichung (4) beschrieben. Die Korrektur der Kovarianz  $P_{k+1}$  des Schätzfehlers für die nächste Berechnung der Kalman-Verstärkung beschreibt dabei die folgende Gleichung (5) über die Kovarianz des Messrauschens  $Q_k$  (fest vorgegeben).

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + bu_k \quad (4)$$

$$P_{k+1} = AP_kA^T + Q_k \quad (5)$$

**[0043]** Die Güte der Prädiktion in Form der Kovarianz des Schätzfehlers und damit eine wesentliche Eigenschaft des Kalman-Filters wird somit für die nächste Korrektur neu berechnet.

**[0044]** Im Folgenden ist anhand von **Fig. 5** und **Fig. 6** die Schätzeinrichtung **10** beschreiben. Sie kann eine Support-Vector-Machine SVM aufweisen. Eine Support-Vector-Machine ist keine Maschine im herkömmlichen Sinne, sondern stellt ein mathematisches Verfahren zur Klassifikation von Mengen und Klassierung von Elementen zu einer Menge dar.

**[0045]** Die Schätzeinrichtung **10** basiert auf der in **Fig. 5** veranschaulichten Tatsache, dass Impedanzortskurven oder kurz Ortskurven **16** (frequency response locus) einer Impedanz  $Z$  einer Lithium-Ionen-Batterie vom aktuellen Ladezustand SOC der Batterie **2** abhängig ist. Insbesondere gilt dies für eine Lithium-Eisenphosphat-Batterie. **Fig. 5** stellt die Impedanzortskurven **16** über dem Realteil  $Re$  und dem Imaginärteil  $Im$  dar für mehrere unterschiedliche, beispielhafte Ladezustände SOC1, SOC2, SOC3, ..., SOCn dar. Jede Ortskurve **16** stellt den Verlauf der Impedanz  $Z$  für unterschiedliche Frequenzen dar.

**[0046]** In **Fig. 6** und **Fig. 7** ist die Zuordnung einer Ortskurve **16** zu einem Ladezustand SOC veranschaulicht, wie sie durch die SVM durchgeführt wird. Bei der SVM sind die einzelnen Ladezustände in jeweils einer Klasse zusammengefasst, die hier als Ladezustandsklasse  $c_1, c_2, \dots, c_n$  bezeichnet sind.

**[0047]** Die Ladezustandsklassen  $c_1, c_2, \dots, c_n$  werden, wie in **Fig. 6** an einem Beispiel veranschaulicht, mittels des SVM in der Form abgegrenzt, dass jede Ladezustandsklasse durch eine von der SVM berechnete Hyperebene **21** zu einer nächstgelegenen anderen Ladezustandsklasse eindeutig getrennt wird. **Fig. 6** veranschaulicht hierzu, wie auf der Grundlage von Trainingswerten für einen ersten Ladezustand  $+$  und einen zweiten Ladezustand  $*$  Parameter der Hyperebene **21** bei einem Training oder Konfigurieren der SVM ermittelt wurden. Die Hyperebene **21** trennt die beiden Trainingsmengen  $+$ ,  $*$ . Mit einem Beobachtungswert für eine Impedanz  $Z$  wird dieser Beobachtungswert auf eine Seite der Hyperebene **21** klassiert.

**[0048]** Um alle Ladezustandsklassen  $c_1, c_2, \dots, c_n$  voneinander zu trennen, muss jede Ladezustandsklasse zu ihrer nächstgelegenen von einer Hyperebene **21** räumlich getrennt werden. So ergeben sich bei  $n$  Klassen entsprechend  $n - 1$  Hyperebenen **21**, welche die Klassen unterteilen, das heißt klassifizieren. Die so entstehende Schar an Hyperebenen stellt somit die Entscheidungsgrundlage der SVM bezüglich einer zu klassierenden gemessenen Impedanzortskurve **16** dar.

**[0049]** Die gesamte Klassierung ist durch **Fig. 7** veranschaulicht. Eine messtechnisch im Betrieb erfasste Impedanz  $Z$  kann nun mittels der SVM klassiert werden. Da eine SVM mittels ihrer berechneten Hyperebenen allerdings für jede einzelne Hyperebene nur zu einer binären Entscheidung (ja, nein) fähig ist, wird ein Verfahren benötigt, das die Entscheidungen der einzelnen Hyperebenen bewertet und zu einer eindeutigen Klassierung der Impedanz  $Z$  führt. Mit der Abbildung der Menge aller Ladezustandsklassen und deren Potenzmengen in einem binären Suchbaum lässt sich dieses Problem der Auswertung effizient lösen. Bei dem Suchbaum gemäß **Fig. 7** stellt die Wurzel **23** die Menge aller Ladezustandsklassen dar. Die beiden folgenden Knoten **25** des binären Suchbaums stellen jeweils die zwei Potenzmengen der durch den Median der Hyperebene getrennten Obermenge dar. Der Median ist dadurch ermittelt, dass bezüglich der Hyperebene der Obermenge (also zunächst der Wurzel **23**) eine möglichst gleiche Anzahl an Hyperebenen diesseits und jenseits der Hyperebene der Obermenge angeordnet ist. Diese Teilung der Potenzmenge lässt sich nun so lange in Folgeschritten  $s$  weiter fortführen, bis der Suchbaum komplett aufgefüllt ist und die einzelnen Blätter den jeweiligen Ladezustandsklassen  $c_1, c_2, \dots, c_n$  entsprechen. Es ergeben sich idealerweise  $\log_2(n)$  Folgeschritte bei  $n$  Ladezustandsklassen.

**[0050]** Hierdurch ergibt sich ein Suchalgorithmus nach dem Prinzip „teile und herrsche“, der nun in der Lage ist, eine gemessene Impedanz  $Z$  einer Ladezustandsklasse  $c_1, c_2, \dots, c_n$  eindeutig zuzuordnen. Bei diesem Verfahren müssen nicht einmal alle Hyperebenen ausgewertet werden.

**[0051]** Soll eine gemessene Impedanz  $Z$  klassiert werden, entscheidet die SVM anhand der relevanten Hyperebene und des Medians der Hyperebenen der jeweiligen Potenzmenge (Wurzel/Knoten), ob die Impedanz zur ober- oder unterhalb der Hyperebene gelegenen Potenzmenge gehört. Jede Kante **24** im Suchraum steht hierbei für eine Entscheidung der jeweiligen Hyperebene. Bei der Klassierung von mehreren Impedanzen  $Z$  kann auf diese Weise eine statistische Verteilung **22** der Ladezustände in Form eines Histogramms mit einem Schätzwert  $\mu_{SVM}$  für den Ladezustand und einer Varianz  $\sigma_{SVM}^2$  zum Erwartungswert  $\mu_{SVM}$  abgeleitet werden.

**[0052]** Die Verwendung der SVM zum Schätzen des Ladezustands ist auch in einer Veröffentlichung von Jansen et al. (P. Jansen, D. Vergossen, D. Renner, W. John, J. Götze, „Impedance spectra classification for determining the state of charge on a lithium iron phosphate cell using a support vector machine“, *Advances in Radio Science*, Volume 13, 2015, doi: 10.5194/ars-13-1-2015, www.adv-radio-sci-net/13/1/2015) beschrieben.

**[0053]** Die Impedanz  $Z$  kann aus den Messwerten **5** für die Klemmenspannung  $U_{\text{Batt}}$  und den Batteriestrom  $I_{\text{Batt}}$  ermittelt werden. In **Fig. 8** ist hierzu veranschaulicht, wie die Schätzeinrichtung **10** eine Transformationseinrichtung **17** umfassen kann, die mittels einer Fourier-Transformation aus einer Messreihe **18** für die Klemmenspannung und einer Messreihe **19** für den Batteriestrom jeweils mittels einer Transformation **20** Frequenzwerte oder Spektralwerte erzeugt, mittels welchen die Impedanz  $Z$  in bekannter Weise berechnet werden kann. Die Transformation **20** kann auf einer schnellen Fourier-Transformation FFT beruhen. Die Impedanz  $Z$  und die ermittelte Batterietemperatur  $T$  können als Eingangsparameter für die Support-Vector-Machine SVM bereitgestellt werden.

**[0054]** **Fig. 8** veranschaulicht des Weiteren, wie die Kalman-Filtereinrichtung **9** und die Schätzeinrichtung **10** kombiniert werden können.

**[0055]** Für eine hybride Ladezustandsbestimmung erfolgt eine Kopplung der beiden Methoden, das heißt der Kalman-Filtereinrichtung **9** und der Schätzeinrichtung **10**, sodass durch die Kalman-Filtereinrichtung **9** im Zeitbereich und durch die SVM im Frequenzbereich die Ladezustandsbestimmung erfolgt. Hierdurch ergeben sich synergistische Effekte. Die Kopplung soll explizit nicht über eine Gewichtungsfunktion umgesetzt werden, sondern es soll ein Eingriff in die wechselseitige Rekursion des Kalman-Filters über den veralteten Zustandsvektor mit den Ergebnissen aus dem Messungs-Update sowie der Bewertung der Messung durch die Kovarianzmatrix erfolgen. In der Form, dass das Klassierungsergebnis der SVM, also der Schätzwert  $\mu_{\text{SVM}}$  für den Ladezustand und die über das beschriebene Ermittlungsverfahren abgeleitete Varianz  $\sigma_{\text{SVM}}^2$  des Klassierungsfehlers, die alten Werte des Kalman-Filters überschreiben.

**[0056]** Hierzu ist in **Fig. 8** dargestellt, wie durch die Messung **27** die Systemausgabe  $y_k$  mit einer Messvarianz **28** erfasst wird. In dem bereits beschriebenen Korrekturschritt **29** werden die Kalman-Verstärkung  $k_k$  gemäß der obigen Gleichung (1) und auf Grundlage der obigen Gleichungen (2) und (3) die Korrekturen oder Updates ausgeführt.

**[0057]** Wie in der Darstellung von **Fig. 8** gezeigt, kann danach durch ein Zeit-Update **31** der nächste Messzyklus beginnen, d. h. es gilt nun der Index  $k$ . In dem Zeit-Update **31** wird in dem aktuellen Zustandsvektor  $x_k$  der Vektoreintrag für den Ladezustand SOC ersetzt durch den Schätzwert  $\mu_{\text{SVM}}$ . In der Kovarianzmatrix  $P_k$  wird der Matrixeintrag **32** für die aktuelle Kovarianz des Schätzfehlers des Ladezustands SOC ersetzt durch die Varianz  $\sigma_{\text{SVM}}^2$ , wie die durch die Schätzeinrichtung **10** ermittelt worden ist. Die Ersetzung kann auch im Korrekturschritt **29** im vorangegangenen Zustandsvektor  $x_{k-1}$  und in der Kovarianz-

matrix  $P_{k-1}$  bei der vorangegangenen Kovarianz  $\sigma_{k-1}^2$  erfolgen.

**[0058]** Danach kann der Prädiktionsschritt **30** erfolgen gemäß den Gleichungen (4) und (5). Hieraus ergibt sich ein prädizierter Zustandsvektor **33**, aus welchem der beschriebene geschätzte Ladezustandswert **8** des Ladezustands SOC ausgelesen oder entnommen werden kann.

**[0059]** Auf diese Weise kann die wechselseitige Rekursion oder Iteration des Kalman-Filters und die Messung beeinflusst werden, damit in der darauffolgenden Prädiktion des Zustandsvektors durch das Kalman-Filter auf Grundlage der überschriebenen Kovarianzmatrix die Schätzung des Kalman-Filters verworfen wird.

**[0060]** Hierbei kann optional durch eine Überprüfungseinrichtung **34** zunächst überprüft werden, ob das Kalman-Filter aufgrund der Güte der Kovarianzmatrix  $P_k$  die Prädiktionsergebnisse zur Ladezustandsbestimmung herangezogen werden sollen anstelle der Schätzwerte der Schätzeinrichtung **10**.

**[0061]** Insgesamt können auf diese Weise Informationen über den Ladezustand der Batterie **2** im Zeit- und im Frequenzbereich zur Ladezustandsbestimmung herangezogen werden. Durch eine derartige Umsetzung können die Vorteile beider Einrichtungen, das heißt der Kalman-Filtereinrichtung **9** und der Schätzeinrichtung **10**, für die Zellchemie Lithium-Eisenphosphat miteinander verbunden werden. Die sehr gute Ladezustandsbestimmung des Kalman-Filters im oberen und unteren Ladezustandsbereich, also außerhalb des Plateaus **14** des Ladezustandsbereichs **13**, sowie die erste Ladezustandsbestimmung der SVM im mittleren Ladezustandsbereich **13** mittels Klassierung können auch dadurch genutzt werden, dass die Schätzeinrichtung **10** nur für solche Ladezustände verwendet wird, die sich innerhalb des Ladezustandsbereichs **13** befinden.

**[0062]** Für die Verarbeitung im Frequenzbereich mittels SVM werden Batterieimpedanzwerte spezifischer Frequenzen auf der Grundlage der Verbraucheranregung im Bordnetz identifiziert. Dies kann beispielsweise durch die beschriebene schnelle Fourier-Transformation FFT geschehen.

**[0063]** Die Kopplung der Kalman-Filtereinrichtung **9** und der Schätzeinrichtung **10** erfolgt über den veralteten Zustandsvektor  $x_{k-1}$  im Zeit-Update **31**. Dazu werden der Systemzustand sowie die Bewertung der alten Messung durch die Kovarianzmatrix  $P_{k-1}$  aus dem vorangegangenen Berechnungsschritt herangezogen. Hierzu werden das Klassierungsergebnis der SVM, also der Wartungswert des Ladezustands  $\mu_{\text{SVM}}$  und eine über das zugrundeliegende Ermittlungsverfahren abgeleitete Varianz  $\sigma_{\text{SVM}}^2$  der wahrscheinli-

chen Klassierungungenauigkeit verwendet. Die unzulänglich genauen Elemente der Matrizen des Kalman-Filters  $x_{k-1}$  und  $P_{k-1}$ , aus dem vorangegangenen Berechnungsschritt, werden nun mit den neuen Ergebnissen der SVM ( $\mu_{SVM}$  und  $\sigma_{SVM}^2$ ) bei Aufenthalt im mittleren Ladezustandsbereich überschrieben.

**[0064]** Insgesamt zeigt das Beispiel, wie durch die Erfindung eine hybride Ladezustandsbestimmung von Batterien mittels gekoppelter Informationen aus dem Frequenzbereich und dem Zeitbereich bereitgestellt werden kann.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln eines Ladezustands (8) einer elektrischen Batterie (2) in einem Kraftfahrzeug (1), wobei in aufeinanderfolgenden Messzyklen (k) jeweils ein jeweiliger Messwert (5) zumindest einer Betriebsgröße ( $U_{BATT}$ ,  $I_{BATT}$ , T) der Batterie (2) gemessen wird und durch eine Kalman-Filtereinrichtung (9):  
 – in einem Korrekturschritt (29) ein aktueller Zustandsvektor aus einem vorangegangenen Zustandsvektor, die jeweils einen Ladezustandswert enthalten, und eine aktuelle Kovarianz eines Schätzfehlers aus einer vorangegangenen Kovarianz des Schätzfehlers berechnet werden und  
 – in einem Prädiktionsschritt (30) aus dem aktuellen Zustandsvektor ein prädizierter Zustandsvektor (33) und aus der aktuellen Kovarianz eine prädizierte Kovarianz berechnet wird, und  
 – in einem Ausgabeschritt ein in dem neuen prädizierten Zustandsvektor (33) enthaltener geschätzter Ladezustandswert (SOC) als der Ladezustand (8) ausgegeben wird,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
 vor dem Korrekturschritt (29) in dem vorangegangenen Zustandsvektor oder vor dem Prädiktionsschritt (30) in dem aktuellen Zustandsvektor der jeweilige Ladezustandswert durch einen Schätzwert ersetzt wird, der durch eine von der Kalman-Filtereinrichtung (9) unabhängige Schätzeinrichtung (10) für den Ladezustand ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die zumindest eine Betriebsgröße ( $U_{BATT}$ ,  $I_{BATT}$ , T) eine Klemmenspannung ( $U_{BATT}$ ) und/oder einen Batteriestrom ( $I_{BATT}$ ) und/oder eine Temperatur (T) umfasst.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei durch die Schätzeinrichtung (10) zusätzlich ein Varianzwert des Schätzwerts ermittelt wird und vor dem Korrekturschritt (29) in einer die vorangegangene Kovarianz beschreibenden Kovarianzmatrix oder vor dem Prädiktionsschritt (30) in einer die aktuelle Kovarianz des Schätzfehlers beschreibenden Kovarianzmatrix der Varianzwert als Matrixeintrag gespeichert wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Schätzeinrichtung (10) auf der Grundlage der Messwerte (5) mehrerer Messzyklen eine jeweilige Zeitreihe (18, 19) für die zumindest eine Betriebsgröße ( $U_{BATT}$ ,  $I_{BATT}$ ) gebildet wird und mittels einer Frequenzanalyse (20) der zumindest einen Zeitreihe (18, 19) eine frequenzabhängige Impedanz (Z) der Batterie (2) ermittelt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei durch die Schätzeinrichtung (10) mittels einer Support-Vector-Machine (SVM) durch eine Klassierung eine aus mehreren vorbestimmten Klassen ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_n$ ) ausgewählt wird, wobei jede der Klassen ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_n$ ) einen Ladezustand repräsentiert.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Ladezustandswert durch den Schätzwert nur ersetzt wird, falls in zumindest einem vorangegangenen Messzyklus der ermittelte Ladezustand (8) in einem vorbestimmten Ladezustandsbereich (13) liegt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Ladezustandswert durch den Schätzwert nur ersetzt wird, falls die vorangegangene oder die aktuelle Kovarianz ein vorbestimmtes Gütekriterium verletzt.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Ladezustand (8) einer Lithium-Ionen-Batterie ermittelt wird.

9. Vorrichtung (4) für ein Kraftfahrzeug (1), mit einem Messeingang zum Empfangen von jeweiligen Messwerten (5) zumindest einer Betriebsgröße ( $U_{BATT}$ ,  $I_{BATT}$ , T) einer Batterie (2) des Kraftfahrzeugs (1) und mit einer Recheneinrichtung, die eine Kalman-Filtereinrichtung (9) zum Schätzen eines Ladezustands der Batterie (2) und eine von der Kalman-Filtereinrichtung (9) unabhängige Schätzeinrichtung (10) zum Erzeugen eines Schätzwerts für den Ladezustand aufweist, wobei die Vorrichtung (4) dazu ausgelegt ist, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen.

10. Kraftfahrzeug (1) aufweisend:

- eine Batterie (2),
- eine Messeinrichtung (3) zum Messen von Messwerten (5) zumindest einer Betriebsgröße ( $U_{BATT}$ ,  $I_{BATT}$ , T) der Batterie (2) und
- eine mit der Messeinrichtung (3) gekoppelte Vorrichtung (4) nach Anspruch 9.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

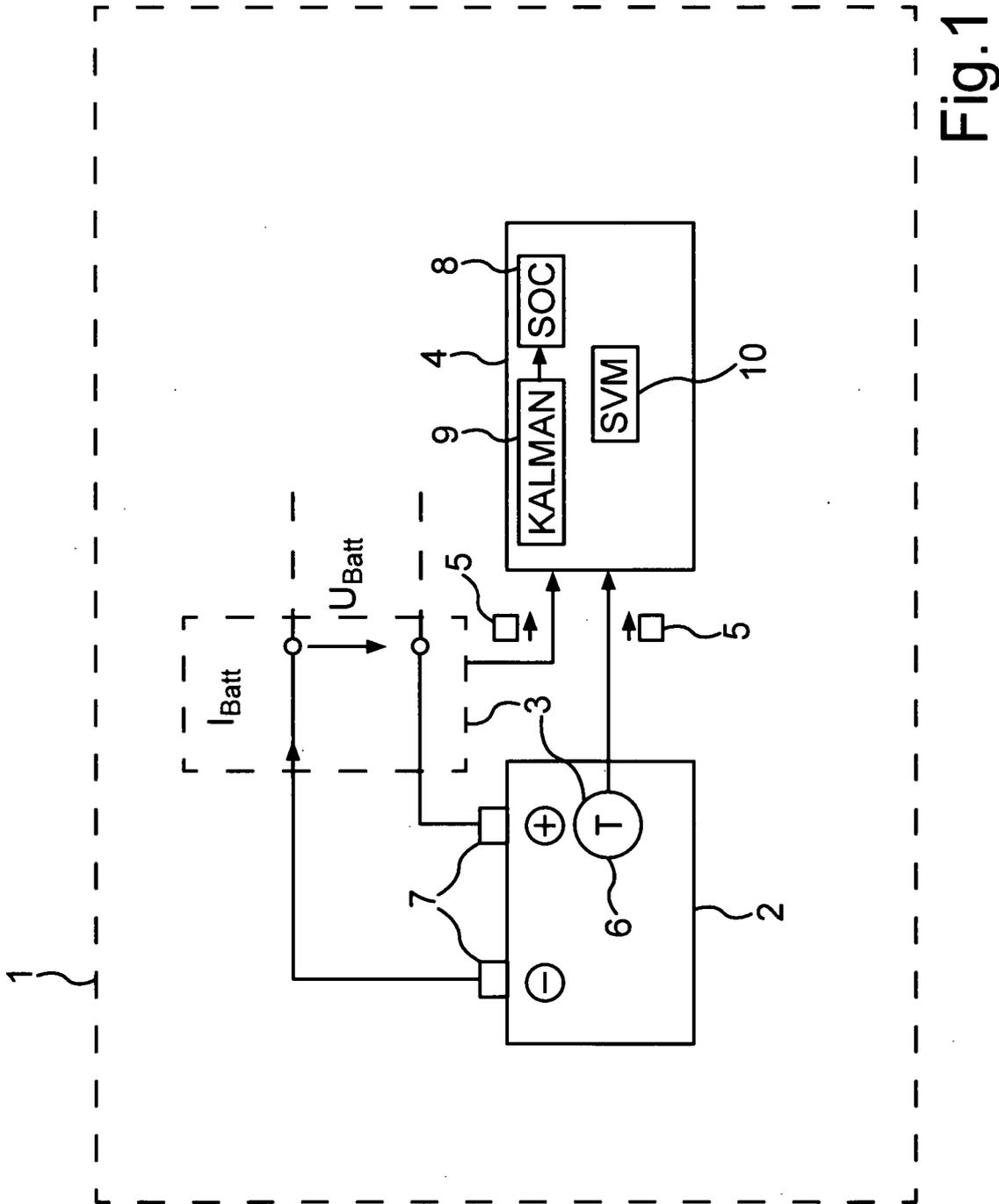


Fig.1

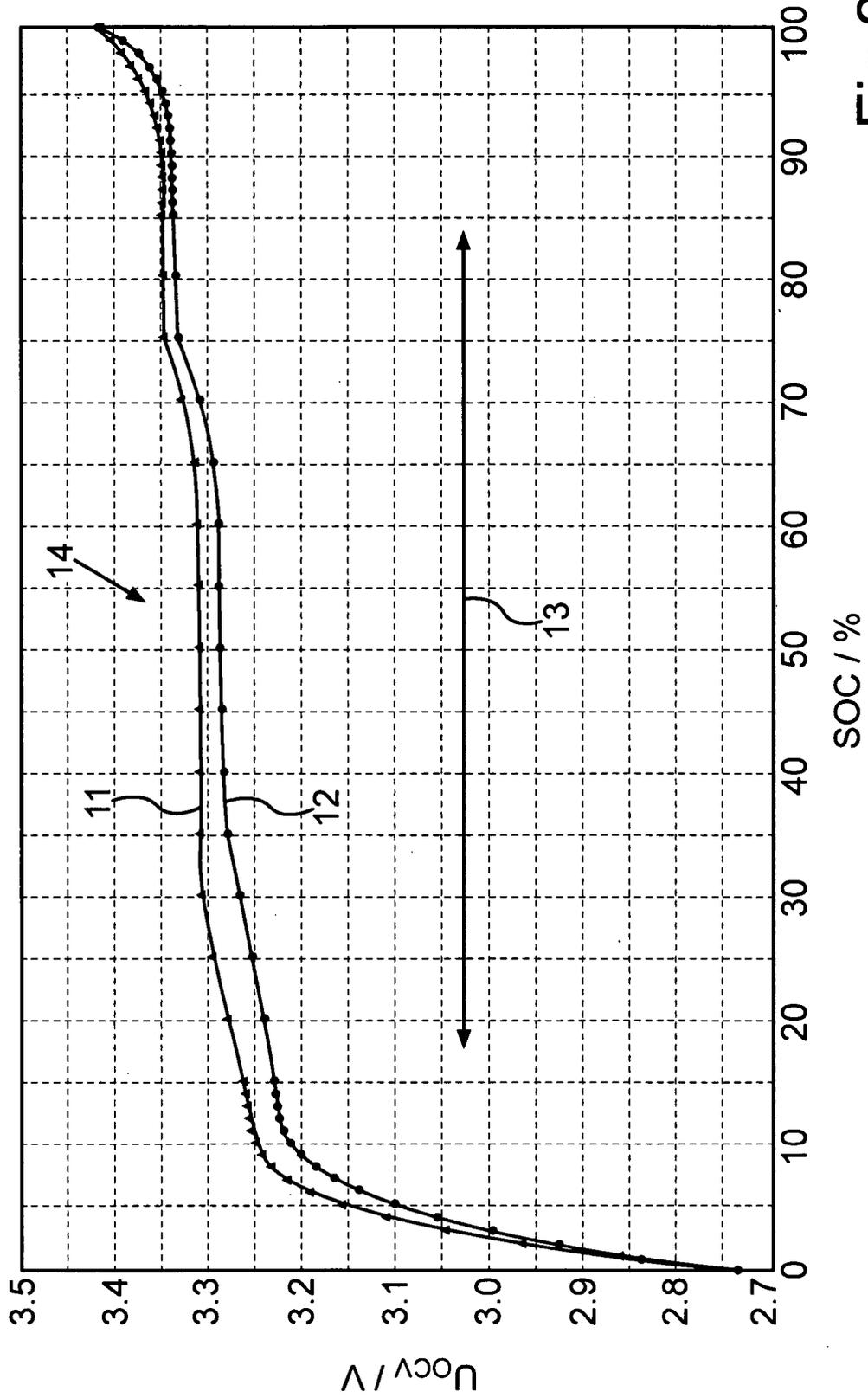


Fig.2

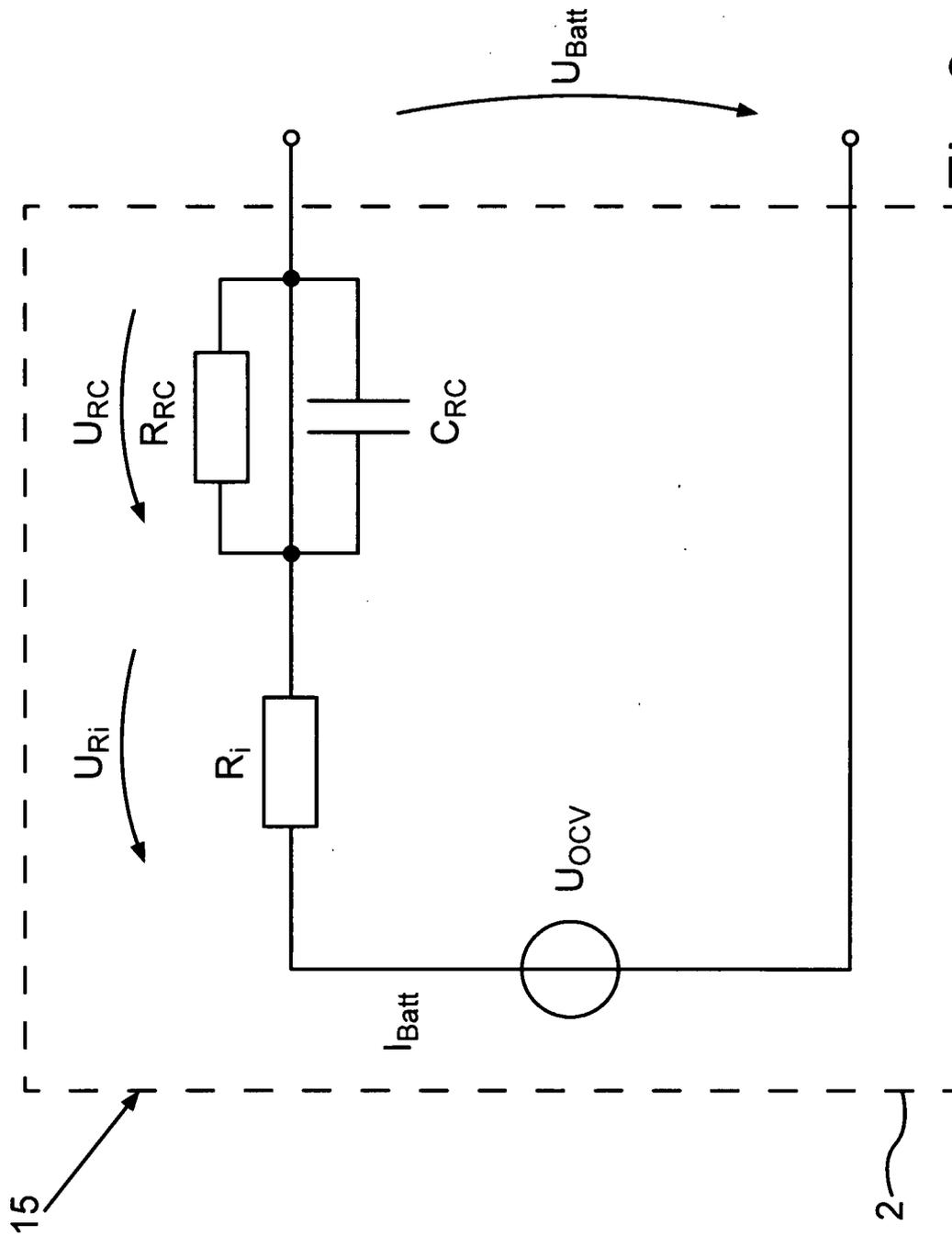


Fig.3

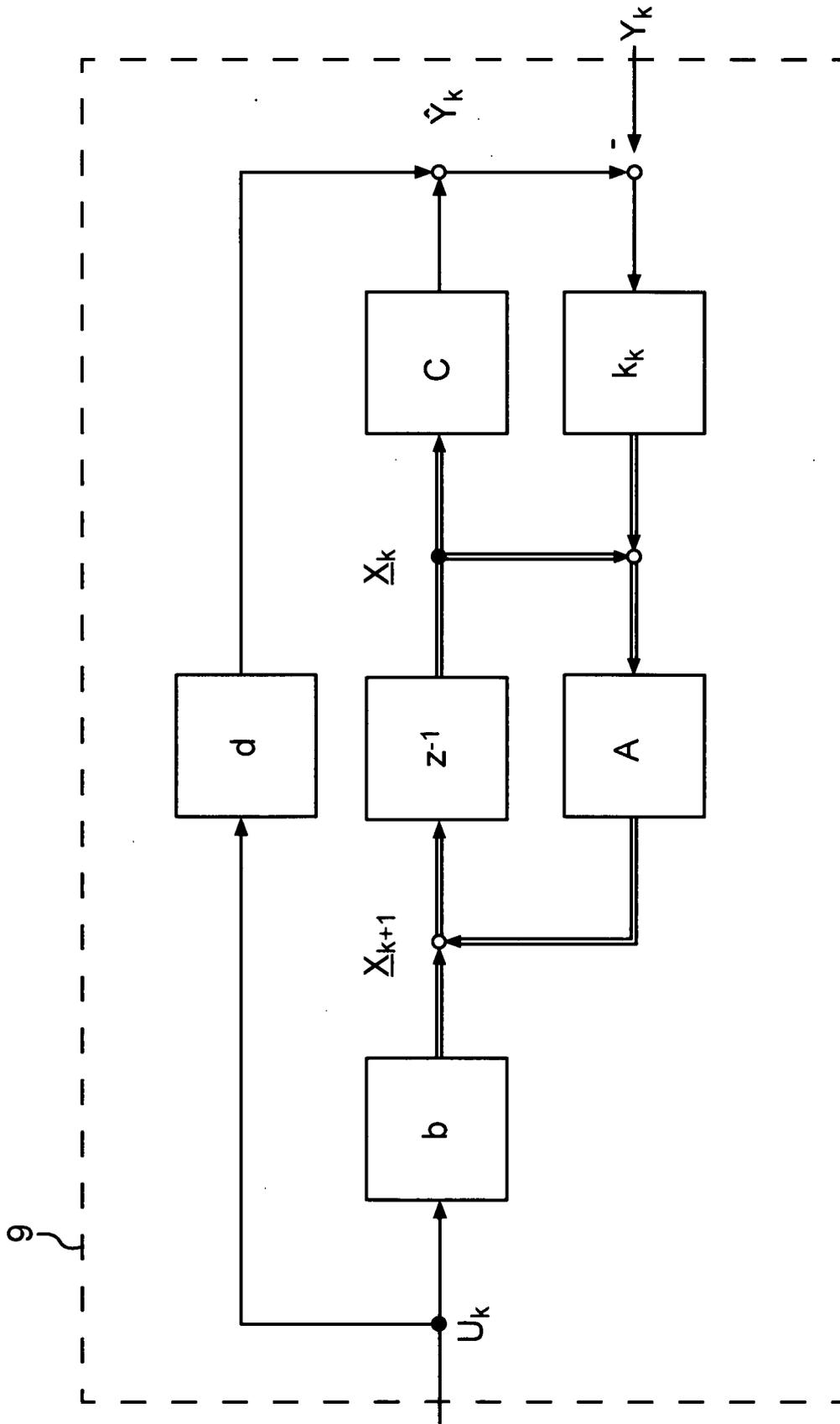


Fig.4

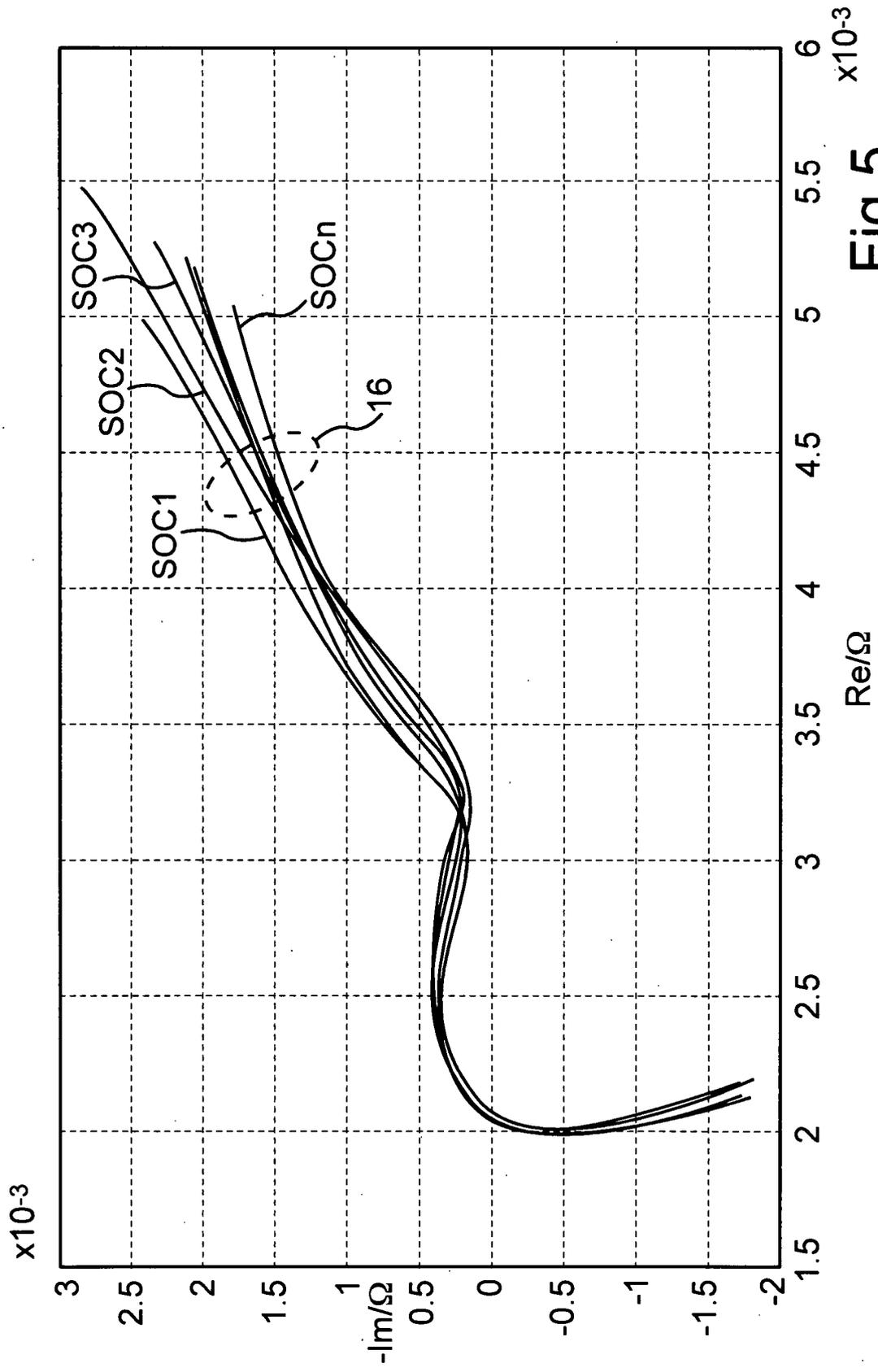


Fig.5

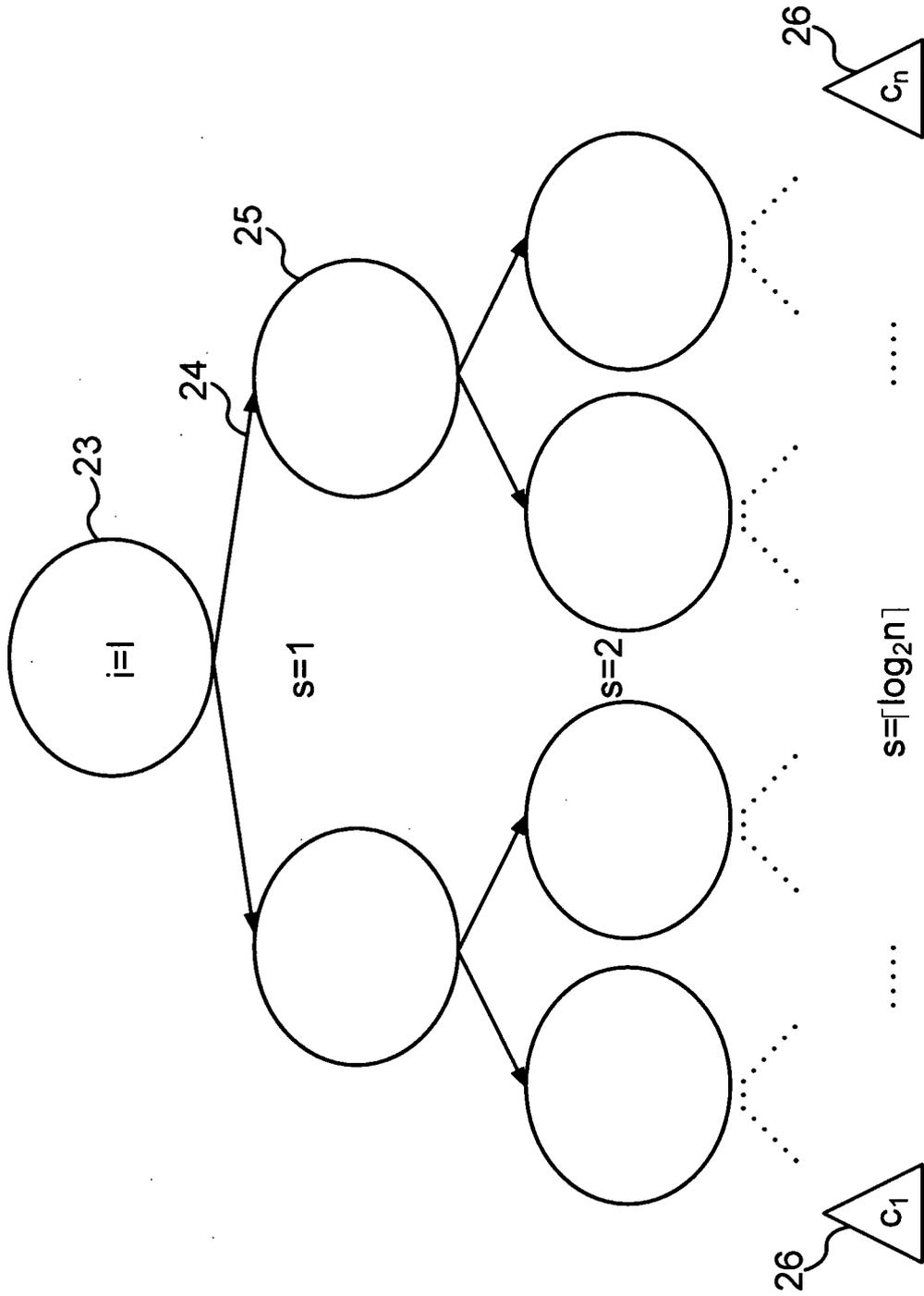


Fig.6

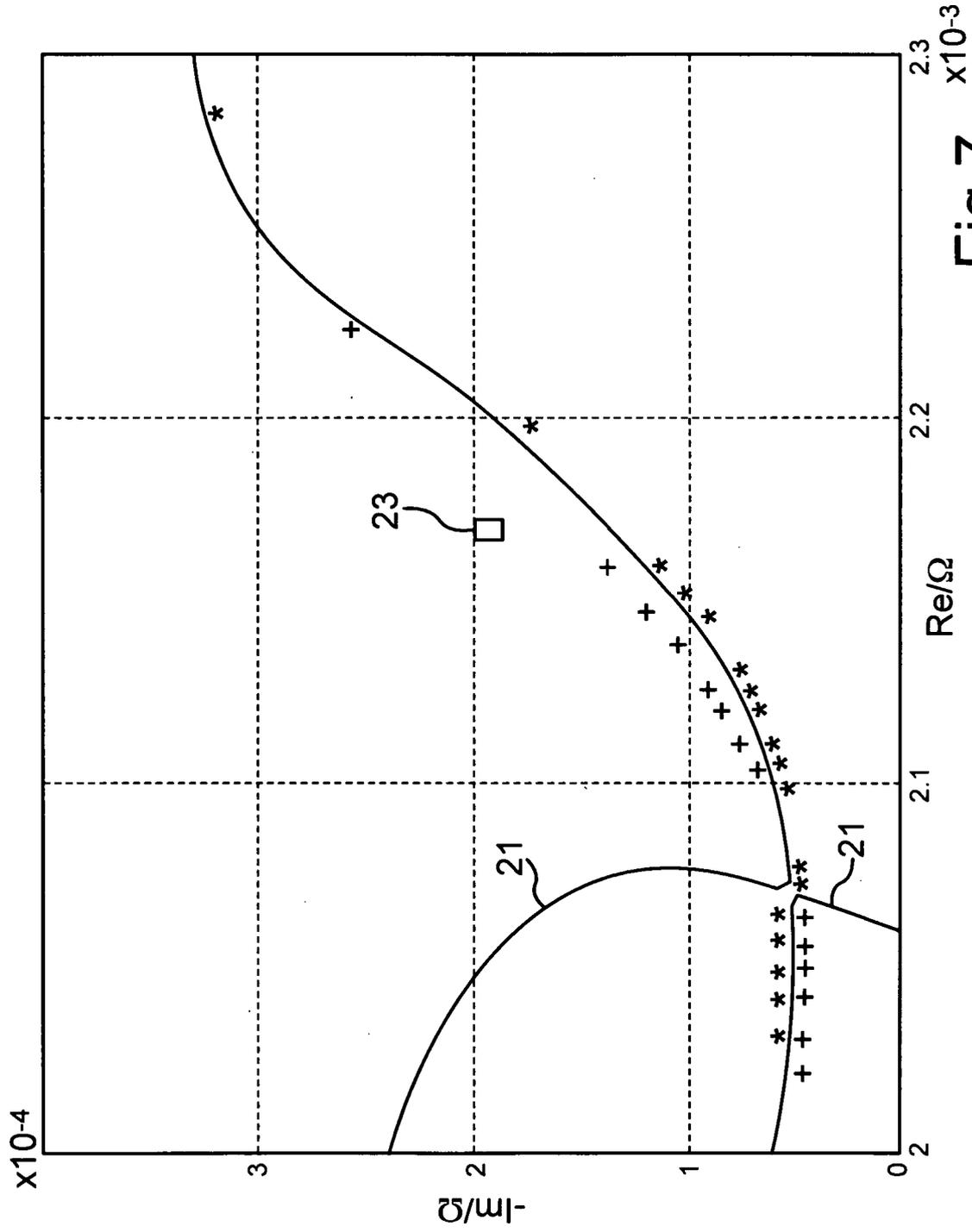


Fig.7

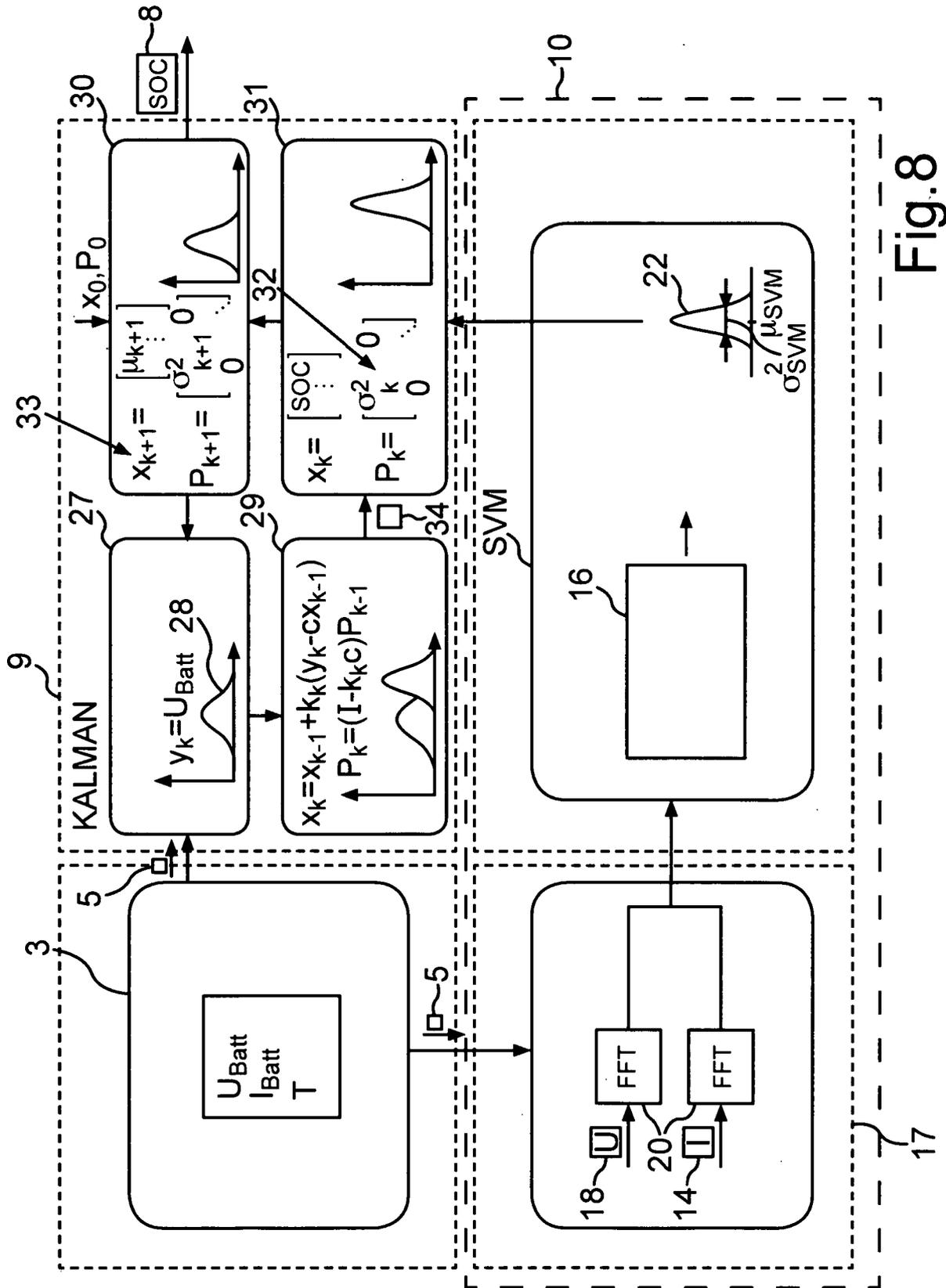


Fig.8