

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50399/2018 (51) Int. Cl.: **H01M 8/04992** (2016.01)
(22) Anmeldetag: 14.05.2018 **H01M 8/04298** (2016.01)
(43) Veröffentlicht am: 15.11.2019 **H01M 8/04537** (2016.01)
G01R 31/367 (2019.01)

(56) Entgegenhaltungen:
US 2016149240 A1
Rahimi-Eichi, H. et al. "Modeling and online
parameter identification of Li-Polymer battery cells
for SOC estimation" 2012 IEEE International
Symposium on Industrial Electronics, 28.-31. Mai
2012. <doi: 10.1109/ISIE.2012.6237284>.
US 6208147 B1

(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
Pofahl Stefan Dr.
8020 Graz (AT)
Ritzberger Daniel
1050 Wien (AT)
Jakubek Stefan Dr.
1230 Wien (AT)

(74) Vertreter:
Kopetz Heinrich Dipl.Ing.
8020 Graz (AT)

(54) **Verfahren zur Ermittlung von Parametern einer Ersatzschaltung**

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur
Ermittlung von wenigstens einem Parameter einer
Ersatzschaltung (10) für eine elektrochemische Zelle
(1), wobei die nachfolgenden Schritte wiederholt in
Echtzeit durchgeführt werden:

- Durchführen einer Anregung (120) der Zelle (1),
- Durchführen einer Messung (130) an der Zelle
(1), um wenigstens ein
Messergebnis zu ermitteln,
- Durchführen einer Schätzung (140) anhand des
Messergebnisses und anhand
einer Modellvorgabe im Zeitbereich, um ein
Schätzergebnis zu ermitteln,
- Durchführen einer Transformation (150) anhand
des Schätzergebnisses zur

Bestimmung des wenigstens einen Parameters der
Ersatzschaltung (10) im Frequenzbereich, wobei eine
Struktur der Ersatzschaltung (10) automatisch anhand
der Modellvorgabe ermittelt wird.

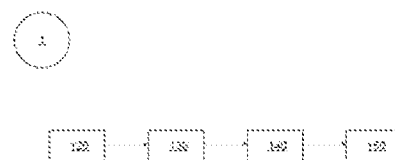


Fig. 1

Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von wenigstens einem Parameter einer Ersatzschaltung (10) für eine elektrochemische Zelle (1), wobei die nachfolgenden Schritte wiederholt in Echtzeit durchgeführt werden:

- Durchführen einer Anregung (120) der Zelle (1),
- Durchführen einer Messung (130) an der Zelle (1), um wenigstens ein Messergebnis zu ermitteln,
- Durchführen einer Schätzung (140) anhand des Messergebnisses und anhand einer Modellvorgabe im Zeitbereich, um ein Schätzergebnis zu ermitteln,
- Durchführen einer Transformation (150) anhand des Schätzergebnisses zur Bestimmung des wenigstens einen Parameters der Ersatzschaltung (10) im Frequenzbereich, wobei eine Struktur der Ersatzschaltung (10) automatisch anhand der Modellvorgabe ermittelt wird.

Fig. 1

Verfahren zur Ermittlung von Parametern einer Ersatzschaltung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von wenigstens einem Parameter einer Ersatzschaltung.

5 Im Stand der Technik ist es bekannt, dass Impedanzen einer Brennstoffzelle im Frequenzbereich mittels eines Anregungssignals erfasst werden, um Parameter für eine Ersatzschaltung zu bestimmen. So offenbart bspw. die Schrift DE 10 2016 106 735 A1 ein Verfahren zur Diagnose einer Brennstoffzelle, bei welchem eine Parameterschätzung im Frequenzbereich erfolgt.

10 Weniger verbreitet sind Varianten, welche eine Parameterschätzung im Zeitbereich nutzen. Entsprechende Verfahren sind bspw. in den Veröffentlichungen

H. Rahimi-Eichi et al. "Online Adaptive Parameter Identification and State-of-Charge Coestimation for Lithium-Polymer Battery Cells," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 4, pp. 2053-2061, April 2014

oder

15 Zhang et al., "Online estimation of battery equivalent circuit model parameters and state of charge using decoupled least squares technique" in Energy 142 (2018) 678 – 688

offenbart.

20 Nachteilhaft bei den bekannten Lösungen ist, dass die Eignung für die Online-Parameterschätzung, also zeitaufgelöst z. B. während eines Betriebs einer Brennstoffzelle, oft noch eingeschränkt ist. Dies kann durch ein Vorhandensein von Messrauschen begründet sein, wodurch systematische Schätzfehler bedingt durch die Schätzmethode (wie „Recursive Least Squares“) auftreten. Insbesondere sind herkömmliche Lösungen noch wenig anpassungsfähig, da bspw. die zu schätzende
25 Struktur oder die Ersatzschaltung a-priori bekannt sein muss.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, der voranstehend beschriebenen Problematik zumindest teilweise Rechnung zu tragen. Insbesondere ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Parameterschätzung zu verbessern und/oder eine verbesserte Möglichkeit zur Überwachung einer Brennstoffzelle vorzuschlagen.

Die voranstehende Aufgabe wird durch die Patentansprüche gelöst. Insbesondere wird die voranstehende Aufgabe durch das Verfahren gemäß Anspruch 1 gelöst. Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen.

- 5 Die Aufgabe wird insbesondere gelöst durch ein Verfahren zur Ermittlung von wenigstens einem Parameter einer Ersatzschaltung für eine elektrochemische Zelle, vorzugsweise Brennstoffzelle.

Hierbei ist vorgesehen, dass die nachfolgenden Schritte durchgeführt werden, vorzugsweise wiederholt und/oder in Echtzeit, bevorzugt in der angegebenen

10 Reihenfolge:

- Durchführen einer Anregung der Zelle,
- Durchführen einer Messung an der Zelle, um wenigstens ein Messergebnis zu ermitteln,
- Durchführen einer Schätzung im anhand des Messergebnisses und/oder
15 anhand einer Modellvorgabe im Zeitbereich, um ein Schätzergebnis zu ermitteln,
- Durchführen einer Transformation anhand des Schätzergebnisses zur Bestimmung des wenigstens einen Parameters der Ersatzschaltung,

wobei eine Struktur der Ersatzschaltung automatisch anhand der Modellvorgabe
20 ermittelt wird.

Dabei erfolgt die Ermittlung der Struktur der insbesondere elektrischen Ersatzschaltung bevorzugt automatisch aus der insbesondere zeitdiskreten Modellvorgabe. Dies hat den Vorteil, dass ein besonders anpassungsfähiges und für die Online-Parameterabschätzung geeignetes Verfahren bereitgestellt wird, da
25 vorzugsweise dabei nicht nur der zeitliche Verlauf der Ersatzschaltbildparameter, sondern auch eine Veränderung der Ersatzschaltungsstruktur während dem Betrieb ermittelt wird.

Die Messung im zweiten Schritt erfolgt vorzugsweise zeitlich überlappend mit der Anregung. Die Schätzung im dritten Verfahrensschritt wird insbesondere im Zeitbereich, bevorzugt im diskreten Zeitbereich anhand des Messergebnisses und/oder anhand einer insbesondere zeitdiskreter Modellvorgabe durchgeführt, um

5 ein Schätzergebnis zu ermitteln, welches vorzugsweise für den Parameter, insbesondere im diskreter Zeitbereich, spezifisch ist. Im vierten Verfahrensschritt wird die Transformation insbesondere in den Frequenzbereich anhand des Schätzergebnisses zur Bestimmung des wenigstens einen, insbesondere physikalischen, Parameters der Ersatzschaltung durchgeführt. Die Parameter, die

10 hierbei ermittelt werden, sind dann die tatsächlichen physikalischen Parameter der Ersatzschaltung (im Allgemeinen beispielsweise ein Widerstand, eine Kapazität und/oder eine Induktivität). Diese werden über eine Transformation im Frequenzbereich und über die sogenannte Foster-Synthese ermittelt. Die beispielhafte Ersatzschaltung mit bekannten Parametern im Frequenzbereich ist

15 dabei äquivalent zur elektrochemischen Impedanz. Das heißt, liegen alle (physikalischen) Parameter der Ersatzschaltung vor, so entspricht die Ersatzschaltung im Frequenzbereich der elektrochemischen Impedanz. Der zu schätzende Parameter ist also der physikalische Parameter (beispielsweise Widerstand, Kapazität und/oder Induktivität). Dieser ist in der Regel unabhängig von

20 der Domäne, das heißt unabhängig vom Zeit- oder Frequenzbereich.

Vorteilhafterweise können die Schritte eines erfindungsgemäßen Verfahrens in Echtzeit durchgeführt werden, d. h. vorzugsweise innerhalb eines Sampling-Intervalls der Messung (also eines Messintervalls) abgearbeitet werden.

Die Zelle ist eine elektrochemische Zelle, wie eine Brennstoffzelle. Der Parameter,

25 vorzugsweise als ein Parameter wie eine Größe eines Widerstands oder Kondensators der Ersatzschaltung, kann somit spezifisch sein für eine elektrochemische Impedanz der Zelle. Um eine zuverlässige Parameterschätzung vornehmen zu können, kann somit alternativ oder zusätzlich der Schritt des Durchführens einer Anregung der Zelle eine breitbandige Anregung aufweisen. Es

30 kann weiter möglich sein, dass die Zelle als eine Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEMFC) ausgebildet ist. Insbesondere kann die breitbandige Anregung essentiell für die Parameterbestimmung im Zeitbereich sein.

Des Weiteren kann der Schritt des Durchführens der Messung an der Zelle eine Messung der elektrischen Größen elektrische Spannung und/oder elektrische Stromstärke aufweisen. Bspw. kann hierzu eine Zellspannung und/oder ein Zellstrom der Zelle gemessen werden. Mittels eines Analog-Digital-Wandler oder dergleichen
5 wird dann vorzugsweise das Messergebnis in der Form von digitalen Messdaten bestimmt. Diese eignen sich besonders für eine weitere Verarbeitung, wie die Schätzung.

Außerdem ist bei dem Durchführen der Schätzung anhand des Messergebnisses und anhand der Modellvorgabe im Zeitbereich optional vorgesehen, dass wenigstens
10 ein Modellparameter eines linearen Modells im Zeitbereich durch die Schätzung bestimmt wird. Die Modellvorgabe kann für das konkret genutzte Modell spezifisch sein, z. B. eine Ordnung des linearen Modells betreffen und/oder vorgeben. Auch kann die Modellvorgabe für eine Samplingzeit der Messung spezifisch sein, welche für die zeitliche Updaterate der Schätzung relevant ist. In anderen Worten ist es
15 möglich, dass für die Schätzung lediglich die Ordnung des linearen Modells und/oder die Samplingzeit der Messung (z. B. durch einen Benutzer) vorgegeben werden muss. Dies hat den Vorteil, dass anders als bei herkömmlichen Verfahren die Struktur der Ersatzschaltung, also die konkrete Ersatzschaltung und/oder die Anzahl und/oder Konfiguration der Bauelemente wie Widerstände und/oder Kondensatoren
20 und/oder das zugehörige Ersatzschaltbild, nicht vorgegeben werden muss. Die einzige strukturelle Vorgabe ist somit ggf., dass es sich bei dem Modell um ein lineares Modell handelt. Aus der Modellvorgabe kann bspw. das lineare Modell abgeleitet werden, und aus dem linearen Modell (und damit anhand der Modellvorgabe) die Struktur der Ersatzschaltung bestimmt werden. Die Samplingzeit
25 entspricht bspw. der Aktualisierungsrate der Parameter bei der Schätzung.

Die Ermittlung der Struktur der Ersatzschaltung automatisch anhand der Modellvorgabe und/oder eine Transformation des linearen Modells in ein Ersatzschaltbild (also die Bestimmung der Struktur der Ersatzschaltung) und/oder die Extraktion der Parameter kann vorteilhafterweise automatisch mittels eines
30 geeigneten Verfahrens zur Synthese analoger Schaltungen erfolgen. Ein solches geeignetes Verfahren ist z. B. die Foster-Synthese, wie sie bspw. in

Ionutiu, R., & Rommes, J. (2009). A framework for synthesis of reduced order models. (CASA-report; Vol. 0928). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven

oder

Guillemin, E.A.: Synthesis of passive networks, 2 edn. John Wiley (1959)

beschrieben ist. In anderen Worten kann die Struktur der Ersatzschaltung, welche durch das Ersatzschaltbild beschrieben wird, hierdurch automatisch und/oder

5 während dem Betrieb anhand der Modellvorgabe ermittelt werden.

Da es sich bei dem wenigstens einen Parameter um einen Parameter der Ersatzschaltung handeln kann, ist für die Aussagekraft des ermittelten (bestimmten) Parameters von Bedeutung, dass onlinefähig eine sinnvolle Struktur der Ersatzschaltung offenbart wird. Entsprechend kann das Durchführen der

10 Transformation anhand des Schätzergebnisses zur Bestimmung des wenigstens einen Parameters der Ersatzschaltung im Frequenzbereich besonders vorteilhaft dadurch erfolgen, dass eine Frequenztransformation und/oder eine Methode einer Synthese einer analogen Schaltung (z. B. die vorgenannte Foster-Synthese) angewandt wird.

15 Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Schätzung durch einen und/oder anhand eines rekursiven Algorithmus erfolgt, vorzugsweise durch eine rekursiv durchgeführte lineare Regression und/oder durch eine rekursive Form einer Kleinste-Quadrate-Schätzung, sodass eine Gewichtung von zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Messergebnissen für die Schätzung

20 variiert. Die Variation betrifft insbesondere historische Messergebnisse, welche mit fortschreitender Zeit und wiederholter Durchführung der Schätzung an Bedeutung verlieren können (vergessen werden). Bspw. ist die Gewichtung eines Messergebnisses umso geringer, je länger die zugehörige Messung zur Bestimmung des Messergebnisses zeitlich zurückliegt.

25 Die Verwendung eines rekursiven „Least Square“ Algorithmus ist sehr effizient in Echtzeit möglich. Die Nutzung geht möglicherweise aber mit der technischen Herausforderung einher, dass die zugrundeliegenden Annahmen des Messrauschens für ein lineares, dynamisches System, wie es bei der Schätzung Verwendung finden kann, nicht korrekt sein können. Dies hat ggf. systematische

30 Schätzfehler zur Folge und kann das Messergebnis negativ beeinflussen. Um eine weitere Verbesserung zu erzielen, kann daher auch ein besonderer Algorithmus zum

Schätzen genutzt werden, welcher trotz verrauschten Messergebnissen eine robuste Schätzung ermöglicht.

Als vorteilhafte Weiterentwicklung ist es daher möglich, dass zur Schätzung (als der rekursive Algorithmus) ein Schätzverfahren „Recursive Generalized Total Least

5 Squares“ (RGTLS) zum Einsatz kommt. Hierzu wird bspw. das in

Jakubek et al. „Identification of Neurofuzzy Models Using GTLS Parameter Estimation,” IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, VOL. 39, NO. 5, OCTOBER 2009, pp. 1121-1133

und/oder

10 Hametner et al. “Nonlinear Identification with Local Model Networks Using GTLS Techniques and Equality Constraints,” IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS, VOL. 22, NO. 9, SEPTEMBER 2011, pp. 1406-1418

offenbarte Generalized Total Least Squares (GTLS) Verfahren rekursiv durchgeführt.

Auch sind weitere Modifikationen dieser Verfahren denkbar, bei welchen die online-
15 fähigkeit verbessert wird.

Es kann optional möglich sein, dass das automatische Ermitteln der Struktur der Ersatzschaltung dadurch in automatischer Weise erfolgt, dass ein Verfahren zur Synthese analoger Schaltungen, vorzugsweise einer Foster-Synthese, durchgeführt wird. Damit ist ein deutlicher Zeitgewinn und/oder ein besseren Schätzergebnis

20 möglich gegenüber Varianten, bei denen die Ersatzschaltung vorgegeben werden muss.

Auch ist es optional denkbar, dass die Modellvorgabe eine Ordnung eines linearen Modells ist, welches zur Schätzung im Zeitbereich genutzt wird. Die Ordnung ist insbesondere die Ordnung eines beliebigen linearen Differenzgleichungsmodells.

25 Dies hat den Vorteil, dass die Bestimmung des Parameters zeitaufgelöst durchgeführt möglich ist, wie es z. B. für eine ständige Diagnose und/oder Überwachung der Zelle im Betrieb sinnvoll sein kann. Insbesondere eignet sich dabei das lineare Modell dazu, eine Impedanz der Zelle zu beschreiben. Ferner kann die Schätzung durch die Nutzung eines Least-Squares Verfahren (also einer Methode
30 der kleinsten Quadrate bzw. Kleinste-Quadrate-Schätzung) und/oder eines

- gleitenden und/oder adaptiven Datenfensters (über zeitlich aufeinanderfolgende Messergebnisse) erfolgen. Grundsätzlich ist es dabei möglich, dass die Extraktion der Parameter (Ersatzschaltbildparameter) aus dem linearen Modell mittels analytischer Gleichungen erfolgt. Erfindungsgemäß kann es aber auch vorgesehen
- 5 sein, dass eine konkrete Ersatzschaltung nicht direkt vorgegeben ist, sondern lediglich die Modellvorgabe. Die Rückrechnung auf die physikalischen Parameter und/oder die Struktur der Ersatzschaltung kann sich dann aus eine Synthese, vorzugsweise Foster-Synthese, ergeben. Weiter kann die Schätzung ggf. mittels RGTLS erfolgen.
- 10 Die Beschreibung der Impedanz als lineares Modell kann z. B. dadurch erfolgen, dass die Struktur der Ersatzschaltung aus wenigstens einen Widerstand und/oder wenigstens einen RC-Glied (aus Widerstand und Kondensator) definiert wird. Die Parameter sind bspw. spezifisch für die Größen des Widerstands und/oder des RC-Glieds im Frequenzbereich. Für den Zeitbereich kann aus dem Ersatzschaltbild das
- 15 lineare Modell, vorzugsweise Differenzgleichungsmodell, erzeugt werden. Üblicherweise erfolgt dabei eine Vorgabe der Struktur der Ersatzschaltung, um daraus das lineare Modell zu ermitteln. Erfindungsgemäß kann jedoch ggf. der umgekehrte Weg gegangen werden, dass anhand eines vorgegebenen Modells und/oder der Modellvorgabe die Struktur, insbesondere anhand des
- 20 Messergebnisses, automatisch ermittelt wird. Als Vorteil kann dabei erzielt werden, dass ein deutlicher Zeitgewinn möglich ist und/oder die Anpassungsfähigkeit und/oder Zuverlässigkeit erhöht wird. In anderen Worten kann aus dem Messergebnis (also den Messdaten) der wenigstens eine Parameter und/oder das Ersatzschaltbild ermittelt werden, insbesondere rückgerechnet, werden. Hierzu ist
- 25 bspw. lediglich erforderlich, dass ein generisches Differenzgleichungsmodell mit fixer Ordnung als die Modellvorgabe vorgegeben wird. Die Rückrechnung und/oder die Bestimmung (Auswahl) der Struktur des Ersatzschaltbilds erfolgt bspw. durch die Foster-Synthese.
- Ein Vorteil der Synthese, vorzugsweise Foster-Synthese, einer Ersatzschaltung bei
- 30 dem erfindungsgemäßen Verfahren kann sein, dass keine a-priori Informationen über die Struktur vorhanden sein müssen und/oder dass damit auch eine (durchaus mögliche) Änderung der Struktur während des Betriebs erfasst werden kann. Damit kann die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit verbessert werden.

Nach einer weiteren Möglichkeit kann vorgesehen sein, dass die Schätzung anhand eines, insbesondere zeitdiskreten, linearen Modells erfolgt, wobei bei dem Schritt des Durchführens der Transformation das lineare Modell automatisch in das Ersatzschaltbild transformiert wird, um den wenigstens einen Parameter automatisch zu extrahieren. Hierdurch kann eine Verbesserung des Komforts bei der Auswertung, der Zuverlässigkeit und/oder Anpassungsfähigkeit des erfindungsgemäßen Verfahrens erzielt werden. Insbesondere kann der Komfort dadurch erhöht werden, dass die Darstellung der Schätzergebnisse in gewohnter Weise erfolgt (also z. B. in Impedanz und physikalische Ersatzschaltbildparameter, jedoch zeitlich aufgelöst).

- 5
10 Vorteilhafterweise ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen, dass zur Schätzung als Schätzverfahren ein rekursiver Schätzalgorithmus (z. B. recursive Least Squares oder recursive generalized total least squares) verwendet wird. Damit kann die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens in vorteilhafter Weise erzielt werden.

- 15 Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Schritte während eines Betriebs der Zelle durchgeführt werden, sodass der wenigstens eine Parameter wiederholt aktualisiert wird, um insbesondere eine elektrochemische Impedanz der Zelle im Frequenzbereich zu ermitteln und/oder, insbesondere online und/oder zeitaufgelöst, zu überwachen. Somit ist – ggf. auch während des Betriebs – eine zuverlässige Diagnose der Zelle möglich.

- 20 Es kann ferner möglich sein, dass die Schätzung als eine online-fähige Parameterschätzung erfolgt. Vorteilhafterweise kann hierzu die Messung und/oder die Schätzung mit einer Frequenz von ca. 1-10 kHz erfolgen, sodass eine durchgängige Überwachung der Zelle gewährleistet ist. Auf diese Weise kann durch das erfindungsmäße Verfahren auch eine zeiteffizientere Alternative zum
25 herkömmlichen Verfahren „Electrochemical Impedance Spectroscopy“ genutzt werden.

- Zudem ist im Rahmen der Erfindung denkbar, dass die Anregung als eine breitbandige Anregung und/oder durch ein vorgegebenes Anregungsmuster (als Eingangssignal der Zelle zur Anregung) erfolgt, welches vorzugsweise an die
30 Messung und/oder Schätzung angepasst ist. Dies kann den Vorteil haben, dass eine Parameterkovarianz reduziert wird. Insbesondere kann dabei die breitbandige

Anregung als Voraussetzung für die Durchführung der Schätzung im Zeitbereich genutzt werden.

Vorzugsweise kann ein an die Messung und/oder an die Schätzung angepasstes Anregungssignal (Eingangssignal) dadurch erzeugt werden, dass ein

- 5 Optimierungssproblem rechnerisch und/oder automatisiert gelöst wird. Hierbei kann z. B. ein skalares Gütekriterium, welches sich aus der Abschätzung der Parameterkovarianz herleitet, minimiert werden.

- 10 Vorteilhafterweise kann bei der Erfindung vorgesehen sein, dass das eine, vorzugsweise adaptive, Fensterung am Messergebnis durchgeführt wird, um anhand des gefensterten Messergebnisses die Schätzung durchzuführen. Das Fenster ist bspw. ein gleitendes und/oder veränderliches Fenster, welches vorteilhafterweise anhand einer Auswertung des Messergebnisses (z. B. anhand eines Rauschanteils) angepasst wird.

- 15 Weitere, die Erfindung verbessernde Maßnahmen ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung zu verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung, welche in den Figuren schematisch dargestellt sind. Sämtliche aus den Ansprüchen, der Beschreibung oder den Figuren hervorgehende Merkmale und/oder Vorteile, einschließlich konstruktiver Einzelheiten und räumlicher Anordnungen können sowohl für sich als auch in den verschiedenen Kombinationen
- 20 erfindungswesentlich sein.

Es zeigen jeweils schematisch:

Figur 1 eine schematische Darstellung zur Visualisierung eines erfindungsgemäßen Verfahrens,

Figur 2 eine Darstellung eines Ersatzschaltbildes.

- 25 In Fig. 1 ist schematisch ein erfindungsgemäßes Verfahren visualisiert. Dabei wird gemäß einem ersten Verfahrensschritt eine – insbesondere breitbandige und/oder elektrische – Anregung 120 der Zelle 1 durchgeführt. Gemäß einem zweiten Verfahrensschritt erfolgt ein Durchführen einer Messung 130 an der Zelle 1, um wenigstens ein Messergebnis zu ermitteln, vorzugsweise zeitlich überlappend mit der
- 30 Durchführung der Anregung. Bei der Zelle 1 kann es sich um eine elektrochemische

Zelle 1, vorzugsweise eine Brennstoffzelle 1, bevorzugt eine Polymerelektrolytbrennstoffzelle 1 handeln. Anschließend kann eine Schätzung 140 anhand des Messergebnisses und anhand einer Modellvorgabe im Zeitbereich durchgeführt werden, um ein Schätzergebnis zu ermitteln. In einem weiteren

5 Verfahrensschritt ist ein Durchführen einer Transformation 150 anhand des Schätzergebnisses zur Bestimmung des wenigstens einen Parameters der Ersatzschaltung 10 im Frequenzbereich vorgesehen. Erfindungsgemäß kann es außerdem von Vorteil sein, dass eine Struktur der Ersatzschaltung 10 automatisch anhand der Modellvorgabe ermittelt wird.

10 In Fig. 2 ist ein Ersatzschaltbild einer Ersatzschaltung 10 gezeigt. Es sind als Parameter dieser Ersatzschaltung 10 gemäß einer beispielhaften Struktur der Ersatzschaltung 10 zwei RC-Glieder jeweils bestehend aus einem Widerstand R1 bzw. R2 und einem Kondensator C1 bzw. C2 sowie ein weiterer seriell zu den RC-Gliedern geschalteter Widerstand Rm gezeigt. Das Ersatzschaltbild ist dabei nur

15 beispielhaft, sodass in Abhängigkeit von der Modellvorgabe und/oder dem Messergebnis auch andere Ersatzschaltungen 10 in Frage kommen. Im Frequenzbereich kann eine Bestimmung der Parameter R1, R2, C1, C2 sowie Rm offline direkt durch entsprechende Schätzalgorithmen erfolgen. Der Zusammenhang ist dabei:

$$20 \quad \frac{U(i\omega)}{I(i\omega)} = R_m + \frac{R_1}{(C_1 R_1) i\omega + 1} + \frac{R_2}{(C_2 R_2) i\omega + 1}$$

Erfindungsgemäß kann es möglich sein, dass die Schätzung auch online erfolgt, dann allerdings im Zeitbereich. Die Parameter im Frequenzbereich werden dann erst indirekt über eine Transformation bestimmt. Auf Grundlage der Schätzung anhand der direkt oder indirekt ermittelten Parameter kann z. B. eine Diagnose der Zelle 1

25 durchgeführt werden.

Um die echtzeitfähige Schätzung der Parameter zu ermöglichen, wird ein zeitdiskretes und/oder lineares Modell genutzt:

$$U(k) = a_1 U(k-1) + \dots + b_0 i(k) + b_1 i(k-1) + \dots$$

Nach einer optionalen Fehlerauswertung

$$30 \quad e(k) = \bar{U}(k) - U(k)$$

und/oder einer Aktualisierung der Parameter aufgrund der Schätzung

$$a_1, \dots, b_0, b_1, \dots$$

kann sodann eine Transformation in den Frequenzbereich erfolgen, sodass beispielhaft die genannten Parameter R_m , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 im Frequenzbereich ermittelt werden können.

Wenn ein lineares Modell genutzt wird, bietet sich eine lineare Parameterschätzung an:

$$\mathbf{U} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} \quad \boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, \dots]^T$$

$\mathbf{X}$... Regressor Matrix (Past Inputs/ Outputs)

10 ($\mathbf{U} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}$ ist hierbei das „wahre System“)

Anschließend kann der Parameterschätzwert $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ ermittelt werden unter der Annahme, dass das Messergebnis durch gaußsches Rauschen beeinflusst ist:

$$\tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{U}_\epsilon$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \underset{\boldsymbol{\theta}}{\operatorname{argmin}} \|\tilde{\mathbf{U}} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}\|_2^2 = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \tilde{\mathbf{U}}$$

15 Bei der Nutzung eines „Least Squares“ Algorithmus, also der Methode der kleinsten Quadrate, muss für den vorliegenden Anwendungsfall davon ausgegangen werden, dass vergangene Messergebnisse (historische Messdaten) die Schätzung beeinflussen (Autoregression).

20 Daher wird vorgeschlagen, ggf. einen sogenannten „Total least squares“ Algorithmus rekursiv zu verwenden.

$$\tilde{\mathbf{U}} = \tilde{\mathbf{X}}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{U}_\epsilon$$

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{X} + \mathbf{X}_\epsilon$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{TLS}} = \underset{\boldsymbol{\theta}}{\operatorname{argmin}} \|\begin{bmatrix} \mathbf{X}_\epsilon \\ \mathbf{U}_\epsilon \end{bmatrix}\|_F^2$$

Hierbei kann der Einfluss von historischen Messdaten vergessen werden nach einer vorgegebenen Anzahl von Wiederholungen der Verfahrensschritte zwischen den historischen Messdaten und aktuellen Messdaten.

- 5 Ferner kann es vorgesehen sein, dass die Anregung als eine breitbandige Anregung durch ein vorgegebenes Anregungsmuster erfolgt, welches an die Messung und/oder Schätzung angepasst ist. Hierzu kann das Anregungsmuster z. B. mittels der nachfolgenden Formel ermittelt werden (Ermittlung der Untergrenze der Parametervarianz ermittelt durch die Fisher-Information):

$$\text{cov}(\hat{\theta}) \geq M^{-1}$$

10
$$M(\hat{\theta}, \mathbf{i}) = \sum_{k=1}^N \frac{\partial U(k)}{\partial \hat{\theta}}^T \frac{\partial U(k)}{\partial \hat{\theta}}$$

$$\mathbf{i} = [i(1), i(2), \dots, i(N)]^T$$

Mit der skalaren Zielfunktion:

$$J = -\log \det M(\hat{\theta}, \mathbf{i})$$

ergibt sich das zu lösende Optimierungsproblem:

15
$$\min_{\mathbf{i}} J + \alpha \mathbf{i}^T \mathbf{i} \quad \text{s.t. constraints}$$

, wodurch das Anregungsmuster bestimmt wird.

Die Erfindung lässt neben den dargestellten Ausführungsformen weitere Gestaltungsgrundsätze zu. D. h. die Erfindung soll nicht auf die mit Bezug auf die Figuren erläuterten Ausführungsbeispiele beschränkt betrachtet werden.

Bezugszeichenliste

1	Zelle
10	Ersatzschaltung
120	Anregung
130	Messung
140	Schätzung
150	Transformation
Rx	Widerstand X
Cx	Kondensator X

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von wenigstens einem Parameter einer Ersatzschaltung (10) für eine elektrochemische Zelle (1), wobei die nachfolgenden Schritte wiederholt in Echtzeit durchgeführt werden:
 - Durchführen einer Anregung (120) der Zelle (1),
 - Durchführen einer Messung (130) an der Zelle (1), um wenigstens ein Messergebnis zu ermitteln,
 - Durchführen einer Schätzung (140) anhand des Messergebnisses und/oder anhand einer Modellvorgabe im Zeitbereich, um ein Schätzergebnis zu ermitteln,
 - Durchführen einer Transformation (150) anhand des Schätzergebnisses zur Bestimmung des wenigstens einen Parameters der Ersatzschaltung (10),wobei eine Struktur der Ersatzschaltung (10) automatisch anhand der Modellvorgabe ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Schätzung (140) durch einen rekursiven Algorithmus erfolgt, vorzugsweise durch eine rekursiv durchgeführte lineare Regression, bevorzugt durch eine rekursive Form einer Kleinst-Quadrate-Schätzung, sodass eine Gewichtung von zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Messergebnissen für die Schätzung (140) variiert.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
das automatische Ermitteln der Struktur der Ersatzschaltung (10) durch ein Verfahren zur Synthese analoger Schaltungen, vorzugsweise einer Foster-Synthese, erfolgt.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Modellvorgabe eine Ordnung eines linearen Modells ist, welches zur Schätzung (140) im Zeitbereich genutzt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Schätzung (140) anhand eines, insbesondere zeitdiskreten, linearen Modells erfolgt, wobei bei dem Schritt des Durchführens der Transformation (150) das lineare Modell automatisch in das Ersatzschaltbild transformiert wird, um den wenigstens einen Parameter automatisch zu extrahieren.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Schritte des Verfahrens während eines Betriebs der Zelle (1) durchgeführt werden, sodass der wenigstens eine Parameter wiederholt aktualisiert wird, um eine elektrochemische Impedanz der Zelle (1) im Frequenzbereich zu ermitteln und/oder, insbesondere online und/oder zeitaufgelöst, zu überwachen.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Schätzung (140) als eine online-fähige Parameterschätzung erfolgt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Anregung (120) als eine breitbandige Anregung (120) durch ein vorgegebenes Anregungsmuster erfolgt, welches an die Messung (130) und/oder Schätzung (140) angepasst ist.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
das eine adaptive Fensterung am Messergebnis durchgeführt wird, um anhand des gefensterten Messergebnisses die Schätzung (140) durchzuführen.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Zelle (1) als eine Polymerelektrolytbrennstoffzelle ausgebildet ist.

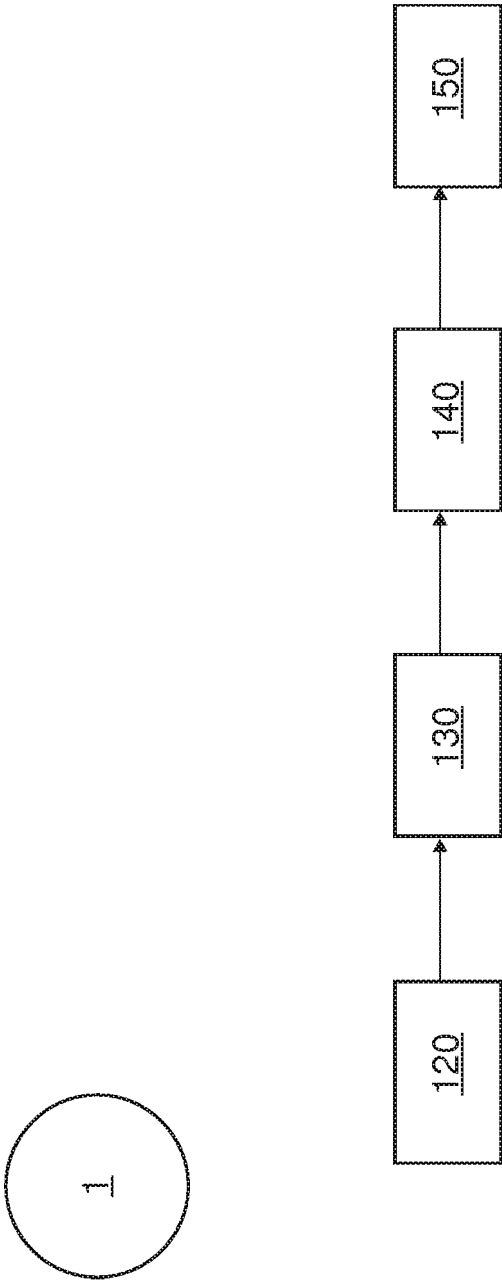


Fig. 1

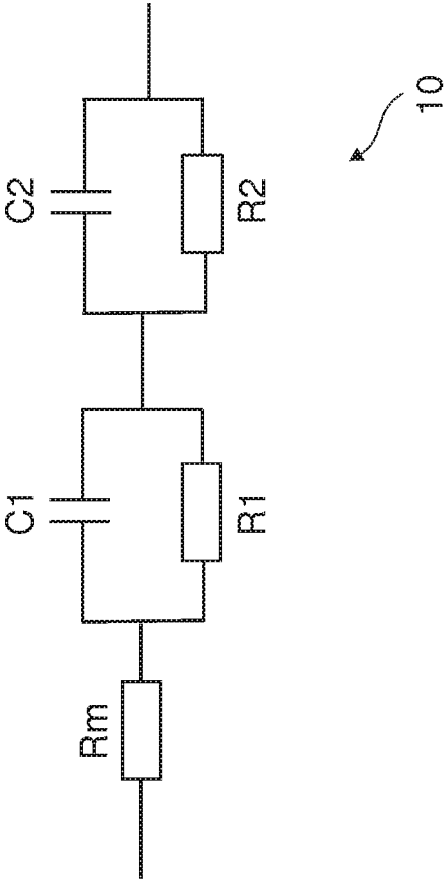


Fig. 2