(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 01 823 A1** 2004.07.29

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 01 823.9**
(22) Anmeldetag: **20.01.2003**
(43) Offenlegungstag: **29.07.2004**

(51) Int Cl.[7]: **G01R 31/36**

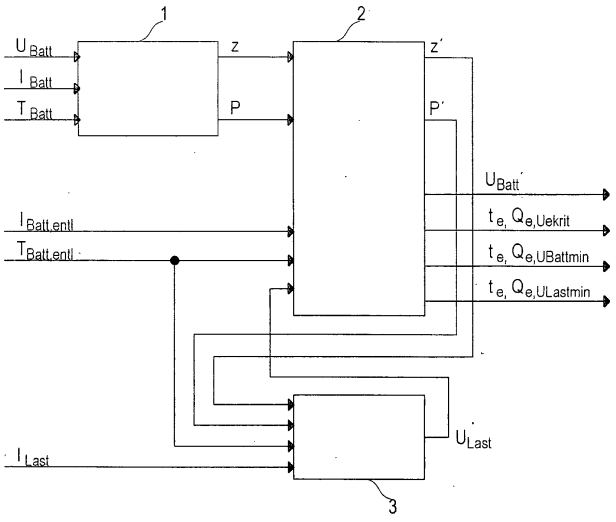
(71) Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Schoch, Eberhard, 70469 Stuttgart, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln der aus einem Energiespeicher entnehmbaren Ladung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Ermitteln der aus einem Energiespeicher, insbesondere einer Batterie, bis zu einem vorgegebenen Entladeschluss entnehmbaren Ladung. Eine besonders genaue Ladungsprädiktion kann erreicht werden, wenn ein mathematisches Energiespeichermodell verwendet wird, das die elektrischen Eigenschaften des Energiespeichers mathematisch darstellt, und mit dessen Hilfe ein Ladungsprädiktor (2) die bei einem vorgegebenen Entladestrom ($I_{Batt,entl}$) entnehmbare Ladung berechnet, wobei der Ladungsprädiktor (2) mit einem Zustandsgrößen- und Parameterschätzer (1) verbunden ist, der aus aktuellen Betriebsgrößen (U_{Batt}, I_{Batt}, T_{Batt}) des Energiespeichers Zustandsgrößen und/oder Parameter für das mathematische Energiespeichermodell ermittelt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Ermitteln der aus einem Energiespeicher, insbesondere einer Batterie, bis zu einem vorgegebenen Entladeschluss entnehmbaren Ladung gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie ein entsprechendes Verfahren gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 9.

[0002] Bei elektrischen Energiespeichern, wie z.B. Batterien, ist die aktuell entnehmbare Ladung eine wichtige Grösse, da sie Ausdruck für die noch verfügbare Energiereserve bis zum Unterschreiten einer vom Energiespeicher geforderten Mindestleistungsfähigkeit ist. Gerade auf dem Gebiet der Automobiltechnik ist eine genaue Vorhersage der entnehmbaren Ladung entscheidender als die Kenntnis des aktuellen, über die mittlere Säurekonzentration im Bleiakkumulator definierten, Ladezustands der Batterie, da dieser nur eine Information über die bereits entnommene Ladung gegenüber Vollladung liefert, nicht jedoch über die noch entnehmbare Ladungsmenge.

[0003] Die gesamte noch entnehmbare Ladung bestimmt unmittelbar die Verfügbarkeit der am Energiespeicher angeschlossenen elektrischen Verbraucher. Die Kenntnis der entnehmbaren Ladung kann außerdem für steuer- oder regelungstechnische Massnahmen, wie z.B. für ein Energiemanagement in einem Fahrzeug, genutzt werden. Dadurch wird es z.B. möglich, rechtzeitig vor Erreichen einer Mindestladungsreserve verbrauchsmindernde Maßnahmen, wie z.B. das Abschalten oder Dimmen weniger wichtiger Verbraucher, einzuleiten.

[0004] Aus der EP-0376967 B1 ist es bereits bekannt, die aus einem Energiespeicher entnehmbare Ladung zu bestimmen. Dabei wird die entnehmbare Ladung über empirisch ermittelte Kennlinienfelder, die in einer Recheneinheit hinterlegt sind, in Abhängigkeit eines konstanten Entladestromes, der Batterietemperatur und von Alterungserscheinungen auf Grundlage der Peukert-Formel abgeschätzt. Dadurch ist es zwar möglich, die entnehmbare Ladung bis zu einem Entladeschluss zu ermitteln, der durch das vollständige Entladen des Energiespeichers gekennzeichnet ist, dagegen ist es nicht möglich, die entnehmbare Ladung bis zum Unterschreiten einer vorgegebenen Mindest-Klemmenspannung oder bis zum Unterschreiten einer Mindest-Leistungsfähigkeit des Energiespeichers zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Bestimmung der entnehmbaren Ladung auf Grundlage der Peukert-Formel relativ ungenau, da verschiedene Effekte, die den Zustand des Entladeschlusses beeinflussen, wie z.B. ein Aktivmasseverlust an den Elektroden durch Batteriealterung oder die Eisbildung an den Elektroden bei niedrigen Temperaturen, nicht berücksichtigt werden.

[0005] Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zum Ermitteln der aus einem Energiespeicher entnehmbaren Ladung zu schaffen, die bzw. das eine sehr genaue Bestimmung der entnehmbaren Ladung bis zu einem vorgegebenen Entladeschlusskriterium ermöglicht.

[0006] Gelöst wird diese Aufgabe gemäss der Erfindung durch die im Patentanspruch 1 bzw. 9 angegebenen Merkmale. Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

[0007] Der wesentliche Gedanke der Erfindung besteht darin, einen Ladungsprädiktor, d.h. eine Einrichtung zur Berechnung der entnehmbaren Ladung, vorzusehen, der die aus dem Energiespeicher entnehmbare Ladung unter. Berücksichtigung eines vorgegebenen Entladestromverlaufs und Temperaturverlaufs mit Hilfe eines mathematischen Energiespeichermodells berechnet. Das Energiespeichermodell ist dabei ein mathematisches Modell, das die auf verschiedenen physikalischen Effekten beruhenden elektrischen Eigenschaften des Energiespeichers anhand verschiedener mathematischer Modelle darstellt. Die mathematischen Modelle beschreiben funktionale Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen, wie beispielsweise Spannungen, Strömen, Temperatur etc., und umfassen verschiedene Parameter.

[0008] Die vom Ladungsprädiktor durchgeführte Ladungsberechnung erfolgt ausgehend vom aktuellen Zustand des Energiespeichers. Die im Ladungsprädiktor hinterlegten mathematischen Modelle werden daher zunächst auf den aktuellen Betriebszustand des Energiespeichers initialisiert. Hierzu ist ein Zustandsgrößen- und Parameterschätzer vorgesehen, der aus den aktuellen Betriebsgrößen, wie beispielsweise der Spannung, dem Strom und der Temperatur des Energiespeichers, die Zustandsgrößen und gegebenenfalls auch Parameter des Energiespeichermodells ermittelt. Für diejenigen Zustandsgrößen des Energiespeichers, die während des Betriebs nicht direkt gemessen werden können, kann beispielsweise ein bekannter Kalman-Filter als Zustandsgrößen- und Parameterschätzer verwendet werden. Ausgehend von diesem Initialisierungszustand errechnet der Ladungsprädiktor dann die aus dem Energiespeicher entnehmbare Ladung bis zu einem vorgegebenen Entladeschluss, d.h. bis zu einem oder mehreren vorgegebenen Entladeschlusskriterien, die nachstehend noch ausführlich erläutert werden.

[0009] Das Energiespeichermodell umfasst im Falle einer Batterie wenigstens ein Modell für den Innenwiderstand R_i der Batterie, einen Säurediffusionswiderstand R_k und eine Durchtrittspolarisation U_D.

[0010] Der Zustands- und Parameterschätzer ermittelt als Zustandsgrößen Z zumindest eine Ruhespannung U_{C0} der Batterie und eine Konzentrationspolarisation U_k. Sofern die Batteriekapazität und damit auch die Säurekapazität Co der verwendeten Batterie unbekannt ist, ist auch diese zu berechnen. Hierzu ermittelt der Zustandsgrößen- und Parameterschätzer vorzugsweise zumindest die Parameter R_{i025}, $U_{e,grenz}$, R_{k025}, U_{D025} und Co. Diese Parameter werden im folgenden noch ausführlich erläutert.

[0011] Das Entladeschlusskriterium, bis zu dem die entnehmbare Ladung berechnet wird, kann beispielsweise das Erreichen bzw. Unterschreiten einer vorgegebenen minimalen Elektrolytspannung U_{ekrit}, einer minimalen Klemmenspannung $U_{Battmin}$ oder das Erreichen einer vorgegebenen Mindestleistungsfähigkeit $U_{Lastmin}$ sein. Gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die entnehmbare Ladung bis zum Erreichen bzw. Unterschreiten von wenigstens zwei, vorzugsweise aller drei, der genannten Entladeschlusskriterien berechnet.

[0012] Das Entladeschlusskriterium der minimalen Elektrolytspannung U_{ekrit} ist erfüllt, wenn die Elektrolytspannung U_e unter die vorgegebene minimale Elektrolytspannung U_{ekrit} fällt. Die vorgegebene Elektrolytspannung U_{ekrit} berücksichtigt dabei vorzugsweise den Aktivmasseverlust durch Batteriealterung und/oder die Eisbildung an den Elektroden bei niedrigen Temperaturen.

[0013] Das Entladeschlusskriterium der minimalen Klemmenspannung $U_{Battmin}$ ist erfüllt, wenn die Klemmenspannung U_{Batt} unter die vorgegebene minimale Klemmenspannung $U_{Battmin}$ fällt.

[0014] Das Kriterium der Mindestleistungsfähigkeit ist dann erreicht, wenn eine Netzspannung, wie z.B. die Spannung an einer vom Energiespeicher versorgten Last, unter einen vorgegebenen Schwellenwert sinken würde, wenn der Energiespeicher über eine vorgegebene Zeitdauer mit der Last belastet werden würde. Um festzustellen, ob die Lastspannung bei einem vorgegebenen Laststromverlauf unter einen vorgegebenen Schwellenwert sinken würde, ist ein Spannungsprädiktor vorgesehen, der in Abhängigkeit vom Laststromverlauf die zugehörige Lastspannung ermittelt. In einem Kraftfahrzeug kann somit ermittelt werden, wieviel Ladung noch aus der Kraftfahrzeugbatterie bei einem vorgegebenen Entladestrom- und Batterietemperaturverlauf entnehmbar ist, bis nur noch soviel Ladung enthalten ist, dass die Netzspannung an einer zuzuschaltenden Last, bei vorgegebenem Laststromverlauf , nicht unter einen vorgegebenen Schwellenwert fällt. Dies ist im Falle eines Kfz-Bordnetzes vor allem notwendig, um zu verhindern, dass nicht mehr Ladung aus der Batterie entnommen wird, wie z.B. für einen erneuten Startvorgang benötigt wird.

[0015] Wahlweise können auch andere Entladeschlusskriterien. definiert werden.

[0016] Die Ermittlung der aus dem Energiespeicher entnehmbaren Ladung wird in vorgegebenen zeitlichen Abständen vom Ladungsprädiktor wiederholt, wobei jeweils aktuelle Werte für den Entladestrom $I_{Batt,entl}$ und die Energiespeichertemperatur $T_{Batt,entl}$ berücksichtigt werden. Der Ladungsprädiktor ist vorzugsweise auch in der Lage, die Zeit bis zum Erreichen des vorgegebenen Entladeschlusskriteriums zu bestimmen.

[0017] Der Zustands- und Parameterschätzer arbeitet vorzugsweise auf der Grundlage des gleichen Energiespeichermodells wie der Ladungsprädiktor.

[0018] Die Erfindung wird nachstehend anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Es zeigen:

[0019] **Fig.** 1 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Ermitteln der aus einer Batterie entnehmbaren Ladung, mit einem Ladungsprädiktor und einem Spannungsprädiktor;

[0020] **Fig.** 2 ein Ersatzschaltbild für einen Bleiakkumulator;

[0021] **Fig.** 3a ein Flussdiagramm zur Darstellung der wesentlichen Verfahrensschritte bei der Berechnung der entnehmbaren Ladung durch einen Ladungsprädiktor;

[0022] **Fig.** 3b, c ein Flussdiagramm zur Darstellung der Überprüfung verschiedener Entladeschlusskriterien;

[0023] **Fig.** 3d ein Flussdiagramm zur Darstellung der wesentlichen Verfahrensschritte bei der Berechnung einer minimalen Batteriespannung durch einen Spannungsprädiktor; und

[0024] **Fig.** 4 eine Darstellung der Abhängigkeit der Elektrolytspannung von verschiedenen physikalischen Effekten.

1. Vorrichtung zur Ermittlung der entnehmbaren Ladung

[0025] **Fig.** 1 zeigt ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Berechnung der aus einer Batterie, insbesondere einer Fahrzeugbatterie, entnehmbaren Ladung. Diese umfasst einen Zustandsgrößen- und Parameterschätzer **1**, einen Ladungsprädiktor **2** und einen Spannungsprädiktor **3**. Die Vorrichtung ist in der Lage, die aus der Batterie (nicht gezeigt) entnehmbare Ladung, ausgehend von einem aktuellen Batteriezustand U_{Batt}, I_{Batt}, T_{Batt} und einem vorgegebenen Entladestromverlauf $I_{Batt,entl}$, bis zum Erreichen eines vorgegebenen Entladeschlusses zu berechnen. Der Entladestromverlauf $I_{Batt,entl}$ kann dabei ein beliebig vorgegebener Stromverlauf oder ein konstanter Strom (I_{Batt}) sein.

[0026] Der Ladungsprädiktor **2** und der Spannungsprädiktor **3** umfassen ein mathematisches Batteriemodell, welches die elektrischen Eigenschaften der Fahrzeugbatterie beschreibt. Bei Kenntnis der aktuellen Betriebsgrößen der Batterie, nämlich der aktuellen Batteriespannung U_{Batt}, des aktuellen Batteriestroms I_{Batt} und der aktuellen Batterietemperatur T_{Batt}, sowie unter Berücksichtigung eines vorgegebenen Entladestromverlaufs ^{I}Batt,entl und eines vorgegebenen Temperaturverlaufs $T_{Batt,entl}$ kann somit die aus der Batterie entnehmbare Ladung $Q_{e,Ukrit}$, $Q_{e,UBattmin}$, $Q_{e,ULastmin}$ bis zum Erreichen dreier unterschiedlicher Entladeschlusskriterien (die im vorliegenden Beispiel konjunktiv verknüpft sind) berechnet werden. Der Entladestromverlauf $I_{Batt,entl}$ und der Temperaturverlauf $T_{Batt,entl}$ während der Entladung können entweder von einem Steuergerät (nicht gezeigt) vorgegeben oder aus den aktuellen Betriebsgrößen der Batterie U_{Batt}, I_{Batt}, T_{Batt} ermittelt werden.

[0027] Der Ladungsprädiktor **2** und der Spannungsprädiktor **3** umfassen ein mathematisches Batteriemodell, das die elektrischen Eigenschaften der Fahrzeugbatterie mathematisch beschreibt und das auf dem in **Fig.** 2 gezeigten Ersatzschaltbild für einen Bleiakkumulator beruht.

2. Ersatzschaltbild eines Bleiakkumulators

[0028] **Fig.** 2 zeigt das Ersatzschaltbild eines Bleiakkumulators. Die Zählrichtung des Batteriestroms I_{Batt} wurde wie üblich positiv für Laden und negativ für Entladen gewählt. Die einzelnen Zustandsgrößen und Komponenten sind wie folgt, von links nach rechts:

R_i (U_{C0}, U_e, T_{Batt}) ohmscher Innenwiderstand, abhängig von der Ruhespannung U_{C0}, der Elektrolytspannung U_e und der Säuretemperatur T_{Batt}

U_{Ri} ohmscher Spannungsabfall

C_0 Säurekapazität

U_{C0} Ruhespannung

R_k (U_{c0}, T_{Batt}) Säurediffusionswiderstand, abhängig von der Ruhespannung U_{C0} (Entladegrad) und der Säuretemperatur T_{Batt}

$\tau_k = R_k \cdot C_k$ Zeitkonstante der Säurediffusion (wird als konstant in der Größenordnung von 10 min angenommen)

U_k Konzentrationspolarisation

$U_e = U_{c0} + U_k$ Elektrolytspannung

ΔU_{Nernst} (U_e, T_{Batt}) Spannungsdifferenz zwischen der Klemmenspannung und der Elektrolytspannung U_e, abhängig von der Elektrolytspannung U_e und der Säuretemperatur T_{Batt}

U_D (I_{Batt}, T_{Batt}) stationäre Durchtrittspolarisation, abhängig vom Batteriestrom I_{Batt} und der Säuretemperatur T_{Batt}

U_{Batt} Klemmenspannung der Batterie

[0029] Die einzelnen Größen sind zurückzuführen auf verschiedene physikalische Effekte der Batterie, die im folgenden kurz erläutert werden:

Die Spannung U_{Ri} ist der ohmsche Spannungsabfall am Innenwiderstand R_i der Batterie, der wiederum von der Ruhespannung U_{C0}, der Elektrolytspannung U_e und der Säuretemperatur T_{Batt} abhängt.

[0030] Die Ruhespannung U_{C0} ist proportional zur mittleren Säurekonzentration in der Batterie und ist gleich der Klemmenspannung der Batterie, wenn die Säurekonzentration nach einer Ruhephase der Batterie überall gleich groß ist.

[0031] Die Konzentrationspolarisation U_k berücksichtigt die Abweichung der Säurekonzentration am Reaktionsort, d.h. den Elektroden, vom Mittelwert in der Batterie. Bei der Batterieentladung besteht die niedrigste Säurekonzentration in den Poren der Elektroden, da die Säure dort verbraucht wird und neue Säure erst aus dem Elektrolyt nachfließen muss.

[0032] Die Elektrolytspannung U_e berücksichtigt die Abweichung der Ruhespannung U_{C0} durch die Konzentrationspolarisation in Abhängigkeit von der Säurekonzentration am Reaktionsort. Dabei gilt $U_e = U_{C0} + U_k$.

[0033] Der Term ΔU_{Nernst} (U_e, T_{Batt}) beschreibt die Spannungsdifferenz zwischen dem Elektrodenpotential und der Elektrolytspannung, die wiederum abhängig ist von der lokalen Säurekonzentration am Reaktionsort und von der Säuretemperatur $T_{Batt.}$ Die stationäre Durchtrittspolarisation U_D (I_{Batt}, T_{Batt}) berücksichtigt einen elektrischen Übergangswiderstand zwischen einer ersten Elektrode der Batterie und dem Elektrolyt und zwischen dem Elektrolyt und der zweiten Elektrode der Batterie und ist wiederum abhängig vom Batteriestrom I_{Batt} und der Säuretemperatur T_{Batt}.

[0034] Die Diffusion der Säure aus dem Elektrolyt zum Reaktionsort, d.h. zu den Elektroden, während der Entladung, wird durch den Säurediffusionswiderstand $R_k(U_{C0}, T_{Batt})$ beschrieben, der wiederum abhängig ist von der Ruhespannung U_{C0} und der Säuretemperatur T_{Batt}.

3. Das mathematische Energiespeichermodell

[0035] Das mathematische Energiespeichermodell umfasst mehrere Modelle, die den ohmschen Innenwiderstand der Batterie $R_i(U_{C0}, U_e, T_{Batt})$, den Säurediffusionswiderstand $R_k(U_{C0}, T_{Batt})$, die Spannungsdifferenz $\Delta U_{Nernst}(U_e, T_{Batt})$ zwischen dem Elektrodenpotential und der Elektrolytspannung und die stationäre Durchtrittspolarisation $U_D(I_{Batt,} T_{Batt})$ beschreiben. Wahlweise können auch mehr oder weniger mathematische Modelle berücksichtigt werden. Für die einzelnen im folgenden aufgeführten Größen können auch andere mathematische Modelle angesetzt werden.

[0036] 3.1. Ohmscher Innenwiderstand:

$$R_i (U_{C0}, U_e, T_{Batt}) = R_{i0} (T_{Batt}) \cdot (1 + R_{i,fakt} \cdot (U_{C0max} - U_{C0})/(U_e - U_{e,grenz})),$$

mit

$$R_{io} (T_{Batt}) = R_{i025}/(1 + TK_{Lfakt} \cdot (T_{Batt} - 25\ °C))$$

[0037] Dabei sind:

R_{i025} ohmscher Innenwiderstand bei Vollladung und $T_{Batt} = 25$ °C

TK_{Lfakt} Temperaturkoeffizient des Batterieleitwerts

$R_{i,fakt}$ Kennfeldparameter

U_{C0max} Maximale Ruhespannung der vollgeladenen Batterie

$U_{e,grenz}$ Elektrolytspannung bei Entladeschluss (alterungsabhängig)

3.2. Säurediffusionswiderstand

[0038] Zur Approximation des Säurediffusionswiderstandes R_k kann z.B. folgendes Modell angesetzt werden:

$$R_k(U_{C0}, T_{Batt}) = R_{k0}(T_{Batt}) \cdot (1 + R_{k,fakt1} \cdot (U_{C0max} - U_{C0}) + R_{k,fakt2} \cdot (U_{C0max} - U_{C0})^2 + R_{k,fakt3} \cdot (U_{C0max} - U_{C0})^3)$$

mit

$R_{k0}(T_{Batt}) = R_{k025} \cdot \exp(-(E_{Rk0}/J)/8{,}314 \cdot (1/(273{,}15 + T_{Batt}/°C) - 1/298{,}15))$ (Arrhenius – Ansatz)

und
R_{k025} Säurediffusionswiderstand bei Vollladung und T_{Batt} = 25 °C
E_{rk0} Aktivierungsenergie
$R_{k,fakt1}$, $R_{k,fakt2}$,
$R_{k,fakt3}$ Polynom-Koeffizienten

3.3 Spannungsdifferenz ΔU_{Nernst} zwischen dem Elektrodenpotential und der Elektrolytspannung U_e

[0039] Für die Spannungsdifferenz zwischen dem Elektrodenpotential und der Elektrolytspannung kann beispielsweise folgendes Modell angesetzt werden:

$\Delta U_{Nernst}(U_e, T_{Batt}) = alpha \cdot \exp(-(U_e - U_{ekn})/beta) + TK_{U00} \cdot (T_{Batt} - 25\ °C)$;

mit
alpha, beta,
U_{ekn} Kennlinienparameter
T_{Ku00} Temperaturkoeffizient des Elektrodenpotentials

3.4. Stationäre Durchtrittspolarisation

[0040] Für die stationäre Durchtrittspolarisation U_D kann folgendes Modell angesetzt werden:

$U_D(I_{Batt}, T_{Batt}) = U_{D0}(T_{Batt}) \cdot 1n(I_{Batt}/I_{D0})$,

mit

$U_{D0}(T_{Batt}) = U_{D025} \cdot (1 + TK_{UD01} \cdot (T_{Batt} - 25\ °C) + TK_{UD02} \cdot (T_{Batt} - 25°C)^2 + TK_{UD03} \cdot (T_{Batt} - 25\ °C)^3)$

U_{D025} stationäre Durchtrittsspannung bei $I_{Batt} = e \cdot I_{D0}$ und T_{Batt} = 25 °C
I_{D0} Durchtrittsstrom für U_D = 0V
TK_{UD01}, TK_{UD02}
TK_{UD02} Temperaturkoeffizienten erster, zweiter und dritter Ordnung der Durchtrittspolarisation

3.5. Einfluss der Säureschichtung in der Batterie

[0041] Eine Säureschichtung wird insbesondere bei Bleibatterien mit flüssigem Elektrolyt aufgebaut, wenn die Batterie ausgehend von einem niedrigen Ladezustand, d.h. niedriger mittlerer Säurekonzentration, mit hohem Strom geladen wird. Durch den hohen Ladestrom bildet sich im Bereich der Elektroden (Reaktionsort) Säure hoher Konzentration, die wegen ihres höheren spezifischen Gewichts nach unten absinkt, so dass im oberen Bereich die Säure niedriger Konzentration zurückbleibt. Die Batterie verhält sich bei Säureschichtung dadurch wie eine Batterie mit verringerter Kapazität (und somit verringerter entnehmbarer Ladung), da nur noch der untere Batteriebereich mit hoher Säurekonzentration an der Reaktion teilnimmt. Außerdem wird das Elektrodenpotential durch die erhöhte Säurekonzentration im unteren Bereich über den Wert einer ungeschichteten Batterie angehoben. Da die Ruhespannung U_{C0} und Säurekapazität Co vom Zustandsgrößen- u. Parameterschätzer **1** ermittelt und adaptiert werden, wird auch die Auswirkung der Säureschichtung auf die entnehmbare Ladung bei der Ladungsprädiktion durch den Ladungsprädiktor **2** bereits implizit berücksichtigt. Das Verfahren berücksichtigt somit auch die Verringerung der entnehmbaren Ladung bei Batterien mit Säureschichtung.

4. Berechnung der aus dem Energiespeicher entnehmbaren Ladung

[0042] **Fig.** 3a zeigt die Berechnung der aus einer Fahrzeugbatterie entnehmbaren Ladung Q_e. Der Ladungsprädiktor **2** führt hierzu eine numerische Berechnung durch und ermittelt die ZustandsgrÖßen U_{C0}, U_k, U_e, ΔU_{Nernst}, U_{Ri} Und U_{Batt} des Batteriemodells von **Fig.** 2. Im einzelnen wird die Berechnung wie folgt durchgeführt:
In Block **10** wird die in einem Zeitschritt t_{sample} aus der Batterie entnommene Ladung q_k bei einem angenommenen Entladestromverlauf $I_{Batt,entl}$ berechnet und iterativ addiert. Der Entladestromverlauf $I_{Batt,entl}$ kann z.B. konstant sein und dem Batteriestrom I_{Batt} entsprechen oder ein beliebiger vorgegebener Stromverlauf sein. Es gilt:

$q_{k+1}' = q_k' + I_{Batt,entl} \cdot t_{sample}$

$t_{k+1}' = t_k' + t_{sample}$

[0043] Die Startwerte q_0' und t_0' für diese Berechnung sind dabei:

$q_0' = 0$, $t_0' = 0$

[0044] Diese iterative Berechnung wird solange durchgeführt, bis ein vorgegebenes Entladeschlusskriterium erfüllt ist. Die aus der Batterie entnehmbare Ladung ist dann $Q_e = q_{k+1}'$, und die noch verbleibende Zeit bis zum Erreichen des Entladeschlusskriteriums bei dem vorgegebenen Entladestrom $I_{Batt,entl}$ ist $t_e = t_{k+1}'$
[0045] In den Blöcken **11** bis **15** werden die stationäre Durchtrittspolarisation U_D ($I_{Batt,entl}$, $T_{Batt,en}t_l$), die Ruhespannung $U_{C0,k+1}'$, die Konzentrationspolarisation $U_{k,k+1}'$, die Elektrolytspannung $U_{e,k+1}'$, der Wert $\Delta U_{Nernst,k+1}'$, der ohmsche Spannungsabfall $U_{Ri,k+1}'$ und die Batteriespannung $U_{Batt,k+1}'$ berechnet. Die Gleichungen lauten dabei im einzelnen:

$U_{C0,k+1}' = U_{C0,0}' + q_{k+i}'/C_0'$

[0046] Startwerte : $U_{C0,0}' = U_{C0}$, $C0' = C_0$

$U_{k,k+1}' = U_{k,k}' + (I_{Batt,entl} \cdot R_k(U_{C0,k+1}', T_{Batt,entl}) - U_{k,k}') \cdot t_{sample}/tau_k$

$U_{e,k+1}' = U_{c0,k+1}' + U_{k,k+1}'$

$\Delta U_{Nernst,k+1}' = alpha \cdot exp(-(U_{e,k+1}' - U_{ekn})/epsilon) + TK_{U00} \cdot (T_{Batt,entl} - 25° C)$

[0047] Startwerte: $U_{k0}' = U_k$, $R_{k025}' = Rk_{025}$

$U_{Ri,k+1}' = R_i (U_{C0,k+1}', U_{C0,k+1}', T_{Batt,entl}) \cdot I_{Batt,entl}$

[0048] Startwerte: $R_{i025}' = R_{i025}$, $U_{e,grenz}' = U_{e,grenz}$

$U_{Batt,k+1}' = U_{Ri,k+1}' + U_{e,k+1}' +° U_{Nernst,k+1}' + U_D'$

[0049] Dabei ist $U_{Batt,k+1}'$ mit dem Index k+1 ein neuer Wert nach einer Iteration. Die Iteration wird solange durchgeführt, bis ein vorgegebenes Entladeschlusskriterium, im vorliegenden Beispiel drei unterschiedliche Entladeschlusskriterien gleichzeitig, erfüllt sind.

[0050] Der Vergleich der Zustandsgrößen mit den verschiedenen Entladeschlusskriterien ist in den **Fig.** 3b und 3c dargestellt. Das erste Entladeschlusskriterium ist das Erreichen einer kritischen Elektrolytspannung $U_{e,krit}$, die von der Säurekonzentration im Elektrolyt, der Batterietemperatur $T_{Batt,entl}$ und einer Spannungsbegrenzung durch Aktivmasseverlust der Batterieelektroden $\Delta U_{e,grenz}$ bestimmt ist. In Schritt 21 von **Fig.** 3b wird für jeden Iterationsschritt k überprüft, ob die Elektrolytspannung $U_{e,k+1}'$ kleiner oder gleich der kritischen Elektrolytspannung ist. Falls ja, wird in Schritt 22 ein entsprechendes Flag $flag_{Ue,krit}$ auf logisch „1" (TRUE) gesetzt. Die entnehmbare Ladung Q_e bei diesem Entladeschlusskriterium ist daher $Q_{e,Uekrit} = q_{k+1}'$ und die Zeitdauer bis zum Erreichen des Entladeschlusskriteriums ist $t_{e,Uekrit} = t_{k+1}'$.

[0051] In Schritt 24 wird, vorzugsweise parallel zu Schritt 21, überprüft, ob ein zweites Entladeschlusskriterium erreicht wurde. Dabei wird überprüft, ob die Batteriespannung $U_{Batt,k+1}'$ kleiner oder gleich einer vorgegebenen minimalen Batteriespannung $U_{Batt,min}$ ist. Falls ja, wird wiederum ein spezifisches Flag mit der Bezeichnung $flag_{UBattmin}$ auf TRUE gesetzt. Die entnehmbare Ladung $Q_{e,Ubattmin} = q_{k+1}'$, und die Zeit $t_{e,UBattmin}$ bis zum Erreichen dieses Entladeschlusskriteriums ist $t_{e,UBattmin} = t_{k+1}'$.

[0052] In Schritt 26 (siehe **Fig.** 3c) wird schließlich überprüft, ob das dritte Entladeschlusskriterium, nämlich eine erforderliche Mindestleistungsfähigkeit der Batterie, erreicht wurde. Hierbei wird überprüft, ob eine an einer vorgebbaren Last abfallende Lastspannung U_{Last} während eines vorgegebenen Laststromverlaufs I_{Last} kleiner oder gleich einer minimalen Lastspannung $U_{Last,min}$ werden würde, wenn die Last zu einem vorgebbaren Zeitpunkt eingeschaltet werden würde. Die Lastspannung U_{Last} ist also diejenige Spannung, die sich an der Last oder z.B. an der Batterie einstellt, wenn die Last mit einem vorgegebenen Laststromverlauf I_{Last} für eine vorgegebene Zeit t_{Last} eingeschaltet werden würde. Diese Berechnung hat den Hintergrund, dass für die Zeitdauer t_{Last} sichergestellt sein soll, dass die Netzspannung (oder Lastspannung) nicht unter einen vorgegebenen Mindestwert sinkt und die Last während ihrer Betriebsdauer t_{Last} ausreichend versorgt wird. Zur Berechnung der Lastspannung U_{Last}, die sich nach einer. vorgegebenen Einschaltzelt t_{Last} einstellt, ist der Spannungsprädiktor **3** vorgesehen. Dieser berechnet anhand der bekannten Modelle für die Zustandsgrößen U_{C0}, U_k, U_e, ΔU_{Nernst}, U_{Ri} und U_D die Batteriespannung U_{Batt} (Schritt 36) bei einem vorgegebenen Laststromverlauf I_{Last} und über eine vorgegebene Last-Einschaltdauer t_{Last}. Der minimale Wert der Batteriespannung U_{Batt} aus allen Iterationsschritten (Schritt 37) nach Ablauf der Last-Einschaltdauer t_{Last} (Schritt 38) ist gleich der Lastspannung U_{Last} (Schritt 39).

[0053] Der Spannungsprädiktor **3** nutzt in den Blocks **30** bis **36** die gleichen Berechnungsmodelle wie der Ladungsprädiktor für die Berechnung der Batterie-Zustandsgrößen, mit dem Unterschied, dass der Berechnung ein Laststromverlauf I_{Last} zugrunde gelegt wird. Der Laststromverlauf I_{Last} ist z.B. der Strom, den eine Last, wie z.B. der Startermotor in einem Kfz zum Betrieb benötigt. Laststromverlauf I_{Last} Einschaltdauer t_{Last} können z.B. von einer Steuereinheit vorgegeben werden. Es gilt:

$q_{k+1}'' = '' + I_{Last} \cdot t_{sample}$

$t_{k+1}'' = t_k'' + t_{sample}$

[0054] In Block **26** wird die bei der Lastsimulation auftretende minimale Batteriespannung U_{Last} mit einem Schwellenwert $U_{Last,min}$ verglichen und festgestellt, ob die minimale Lastspannung U_{Last} kleiner oder gleich der Spannung $U_{Last,min}$ ist.

[0055] Die Berechnung der minimalen Spannung U_{min} bei vorgegebenem Laststrom I_{Last} durch den Spannungsprädiktor **3** wird in jedem Iterationsschritt des Ladungsprädiktors **2** durchgeführt. Wenn die Simulation ergibt, dass die Mindestleistungsfähigkeit erreicht ist ($U_{Last} <= U_{Last,min}$), so wird ein spezifisches Flag mit der Bezeichnung $flag_{ULastmin}$ auf TRUE gesetzt. Die entnehmbare Ladung Q_e bis zu diesem 3. Entladeschlusskriterium ist: $Q_{e,ULastmin} = q_{k+1}'$.

[0056] Bei dem vorgegebenen Entladestrom $I_{Batt,entl}$ wird die Mindestleistungsfähigkeit der Batterie in einer Zeit $t_{e,ULastmin} = t_{k+1}'$ erreicht (Block **27**).

[0057] Falls die Entladeschlusskriterien in den Schritten 21, 24 und 26 nicht erreicht worden sind, so wird, ebenso wie nach den Blöcken **22**, **25** und **27**, in Schritt 28 überprüft, ob alle drei Entladeschlusskrite-

rien gleichzeitig erfüllt sind. Falls ja, wird der minimale Wert der entnehmbaren Ladungen $Q_{e,Uekrit}$, $Q_{e,UBatt-min}$, $Q_{e,ULastmin}$ als maximal entnehmbare Ladung ausgegeben. Gleichzeitig kann auch die zugehörige Zeitdauer t_e ausgegeben werden. Falls Nein, wird die Berechnung fortgesetzt.

[0058] Bei konstantem Entladestrom $I_{Batt,entl}$ = konstant und konstanter Temperatur $T_{Batt,entl}$ = konstant können die Zustandsgrößen U_{C0}' und U_k' sowie die Batteriespannung U_{Batt}' auch analytisch berechnet werden, so dass die rechenzeitintensive iterative Berechnung nach **Fig.** 3a durch den Ladungsprädiktor **2** entfallen kann.

5. Festlegung des ersten Entladeschlusskriteriums

[0059] Die aus einer Batterie entnehmbare Ladung hängt im wesentlichen von der im Elektrolyt enthaltenen Säure ab.

[0060] Daneben ist das Entladeende zweitens auch abhängig von der beim Entladevorgang zugänglichen Aktivmasse (Pb, PbO_2 bei Bleiakkumulatoren) in den Elektroden der Batterie und drittens der Elektrolytvereisung bei niedrigen Temperaturen. Die Genauigkeit der entnehmbaren Ladung kann unter Berücksichtigung wenigstens eines der vorstehend genannten Effekte wesentlich verbessert werden.

5.1. Säurebegrenzung

[0061] Bei neuen Batterien und Batterien mit geringem Aktivmasseverlust ist die Entladung der Batterie im wesentlichen durch die im Elektrolyt enthaltene Säure begrenzt (Säurebegrenzung). Bei der Berechnung der entnehmbaren Ladung durch den Ladungsprädiktor wird für die Säurekonzentration am Reaktionsort (Elektroden) die hierzu proportionale Elektrolytspannung U_e verwendet. Typische Grenzwerte für neue Batterien sind z.B. $U_{e,krit}$, Säure = 11,5 V bei Entladeende (siehe Ast b in **Fig.** 4).

5.2. Aktivmassebegrenzung

[0062] Bei Batterien mit höherem Aktivmasseverlust tritt das Entladeende (die Batterie liefert keine Ladung mehr) durch Verarmung der für die Entladereaktion zur Verfügung stehenden Aktivmasse (Pb, PbO_2) bereits bei höheren Spannungen ein. **Fig.** 4 zeigt diese Verschiebung der kritischen Elektrolytspannung $U_{e,krit}$ um einen Wert $\Delta U_{e,grenz}$ hin zu höheren Spannungen (von 11,5 auf 12V; von Ast b nach Ast c). Unter Berücksichtigung der Aktivmassebegrenzung kann daher folgende Beziehung angesetzt werden: $U_{e,krit,\,Masse} = 11,\,5\ V + \Delta U_{e,grenz}$

5.3. Elektrolytvereisung

[0063] Bei Temperaturen von weniger als –10°C kann, insbesondere bei niedriger Säurekonzentration, eine Elektrolytvereisung auftreten. Dabei wird die Zufuhr von Säure zum Reaktionsort an den Elektroden gehemmt, so dass eine niedrigere Säurenkonzentration an den Elektroden vorliegt (siehe Ast a in **Fig.** 4). Für die kritische Elektrolytspannung kann dabei folgende temperaturabhängige Beziehung angesetzt werden:

$$U_{e,krit,Eis}\,(T_{Batt}) = 11{,}423V - 0{,}0558V\cdot(T_{Batt}/°C) - 0{,}0011V\cdot(T_{Batt}/°C)^2 - 1{,}0\cdot e - 5V\cdot(T_{Batt}/°C)^3$$

[0064] Unter Berücksichtigung aller drei Effekte kann für das erste Entladeschlusskriterium (Erreichen einer minimalen Elektrolytspannung Ue) folgende Beziehung verwendet werden: $U_e = U_{e,krit}$ = max ($U_{e,krit,Säure}$, $U_{e,krit,Masse,}$ $U_{e,krit,Eis}$

[0065] **Fig.** 4 zeigt nochmals den resultierenden Verlauf der kritischen Elektrolytspannung $U_{e,krit}$ in Abhängigkeit von der Batterietemperatur T_{Batt} und $\Delta U_{e,grenz}$.

Bezugszeichenliste

1	Zustandsgrößen- und Parameterschätzer
2	Ladungsprädiktor
3	Spannungsprädiktor
10–15	Berechnungsschritte des Ladungsprädiktors
20–28	Überprüfung des Entladeschlusses
30–39	Berechnungsschritte des Spannungsprädiktors
Z	Zustandsgrößen
P	Parameter
U_{Batt}	Batteriespannung
I_{Batt}	Batteriestrom
T_{Batt}	Batterietemperatur
$I_{Batt,entl}$	Entladestromverlauf
$T_{Batt,entl}$	Temperaturverlauf
$Q_{e,Ue,krit}$	entnehmbare Ladung bis zum Erreichen der Kritischen Elektrolytspannung
$Q_{e,UBattmin}$	entnehmbare Ladung bis zum Erreichen der Minimalen Batteriespannung
$Q_{e,ULastmin}$	entnehmbare Ladung bis zum Erreichen der Mindestleistungsfähigkeit
t_e	Zeitdauer bis zum Erreichen des Entladeschlusses
I_{Last}	Laststrom
U_{Last}	Lastspannung
R_i	ohmscher Innenwiderstand
U_{C0}	Ruhespannung
U_k	Konzentrationspolarisation
U_{Ri}	Spannungsabfall am ohmschen Widerstand
R_k	Säurediffusionswiderstand
ΔU_{Nernst}	Spannungsdifferenz zwischen Elektrodenpotential und Elektrolytspannung
U_e	Elektrolytspannung
U_D	Durchtrittspolarisation
$U_{e,krit}$	kritische Elektrolytspannung
$U_{Batt,min}$	minimale Batteriespannung
$U_{Last,min}$	minimale Lastspannung

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Ermitteln der aus einem Energiespeicher, insbesondere einer Batterie, bis zu einem vorgegebenen Entladeschluss entnehmbaren Ladung (Q_e), gekennzeichnet durch
– einen Ladungsprädiktor (**2**), der die bei einem vorgegebenen Entladestromverlauf ($I_{Batt,entl}$) aus dem Energiespeicher entnehmbare Ladung (Q_e) auf der Grundlage eines mathematischen Energiespeichermodells berechnet, das die elektrischen Eigenschaften des Energiespeichers mathematisch darstellt, und
– einen Zustandsgrößen- und Parameterschätzer (**1**), der aus aktuellen Betriebsgrößen (U_{Batt}, I_{Batt}, T_{Batt}) des Energiespeichers Zustandsgrößen (Z) und/oder Parameter (P) für das mathematische Energiespeichermodell ermittelt.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Energiespeichermodell ein Batteriemodell ist, das wenigstens ein mathematisches Modell für den Innenwiderstand (Ri), einen Säurediffusionswiderstand (R_k) und eine Durchtrittspolarisation (U_D) umfasst.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Zustandsgrößen- und Parameterschätzer (**1**) als Zustandsgrößen (Z) wenigstens eine Ruhespannung (U_{C0}) und eine Konzentrationspolarisation (U_k) ermittelt.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Zustandsgrößen- und Parameterschätzer (**1**) ferner eine Durchtrittspolarisation (U_D) ermittelt.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass der Ladungsprädiktor (**2**) die entnehmbare Ladung (Q_e) bis zum Erreichen einer vorgegebenen minimalen Elektrolytspannung (U_{emin}) ermittelt, die ein erstes Entladeschlusskriterium darstellt.

6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass der Ladungsprädiktor (**2**) die entnehmbare Ladung (Q_e) bis zum Erreichen einer minimalen Spannung ($U_{Battmin}$) des Energiespeichers ermittelt, die ein zweites Entladeschlusskriterium darstellt.

7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass der Ladungsprädiktor (**2**) die entnehmbare Ladung (Q_e) bis zum Erreichen einer vorgegebenen Mindestleistungsfähigkeit ($U_{Lastmin}$) ermittelt, die ein drittes Entladeschlusskriterium darstellt.

8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, dass ein Spannungsprädiktor vorgesehen ist, dem ein Laststromverlauf (I_{Last}) vorgebbar ist und der in Abhängigkeit. vom Laststrom (I_{Last}) eine zugehörige Lastspannung (U_{Last}) ermittelt, die sich aufgrund des vorgegebenen Laststromverlaufs (I_{Last}) einstellen würde.

9. Verfahren zum Ermitteln der aus einem Energiespeicher, insbesondere einer Batterie, bis zu einem vorgegebenen Entladeschluss entnehmbaren Ladung (Q_e), gekennzeichnet durch folgende Schritte:
– Berechnen der bei einem vorgegebenen Entladestromverlauf ($I_{Batt,Entlade}$) aus dem Energiespeicher

entnehmbaren Ladung (Q_e) mit Hilfe eines Ladungsprädiktors (**2**) auf der Grundlage eines mathematischen Energiespeichermodells, das die elektrischen Eigenschaften des Energiespeichers mathematisch darstellt, und

– Ermitteln von Zustandsgrößen (Z) und/oder Parametern (P) für das mathematische Energiespeichermodell aus aktuellen Betriebsgrößen (U_{Batt}, I_{Batt}, T_{Batt}) des Energiespeichers mit Hilfe eines Zustandsgrößen- und Parameterschätzers (**1**).

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Ladungsprädiktor (**2**) eine bis zum Erreichen einer vorgegebenen Mindestleistungsfähigkeit ($U_{Lastmin}$) entnehmbare Ladung (Q_e) berechnet, wobei eine Lastspannung (U_{Last}) berücksichtigt wird, die dem Ladungsprädiktor (**2**) von einem Spannungsprädiktor (**1**) zugeführt wird, der die Lastspannung (U_{Last}) in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Laststromverlauf (I_{Last}) ermittelt.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

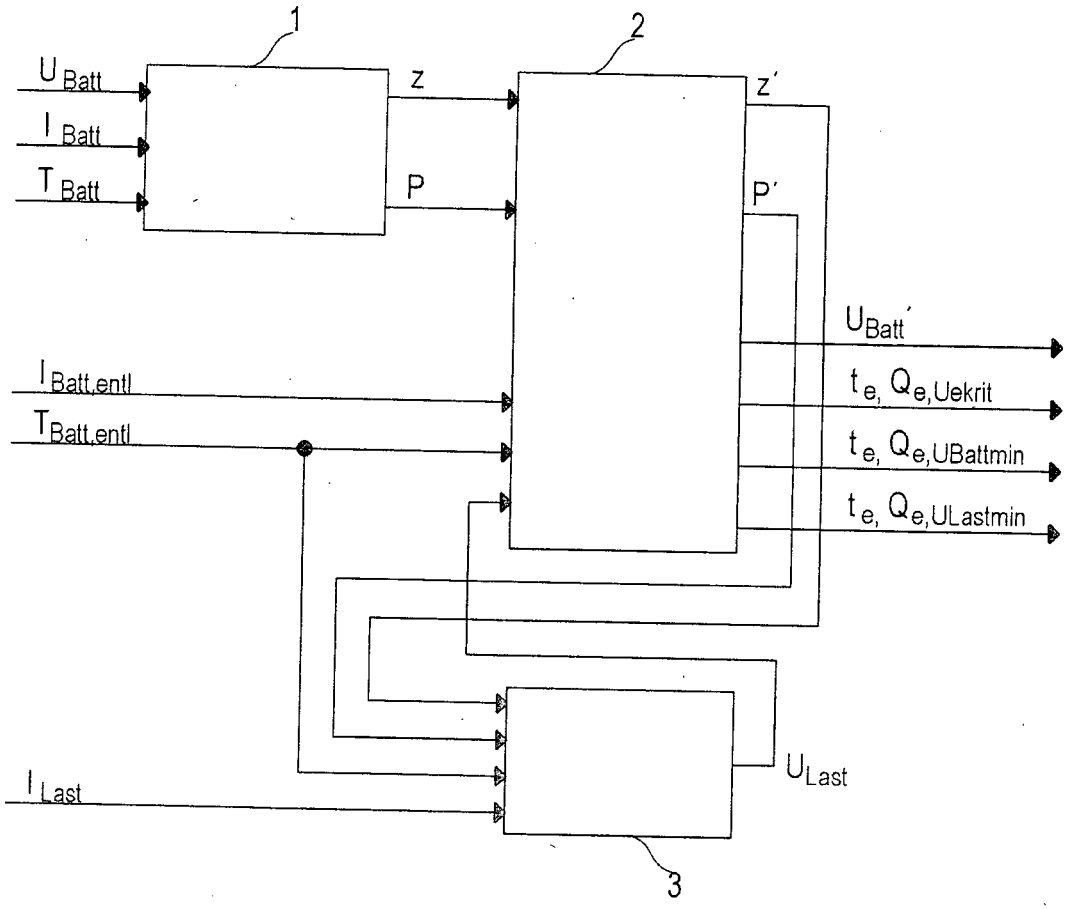


Fig. 1

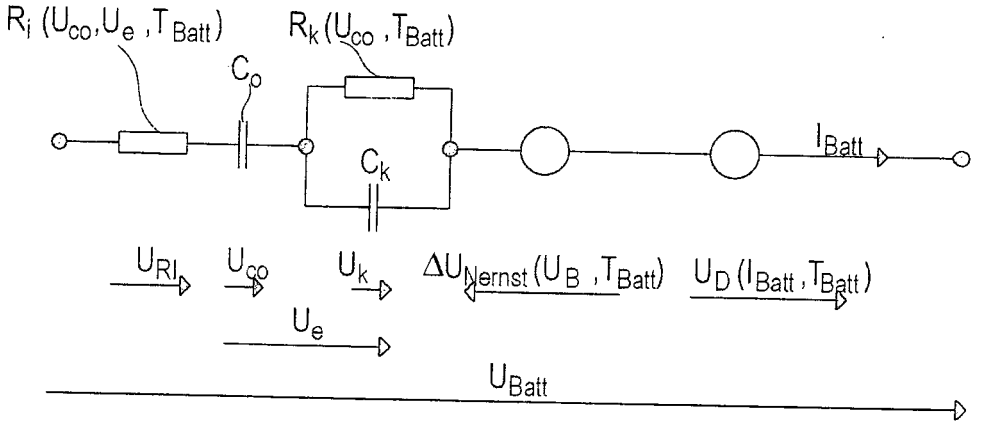


Fig. 2

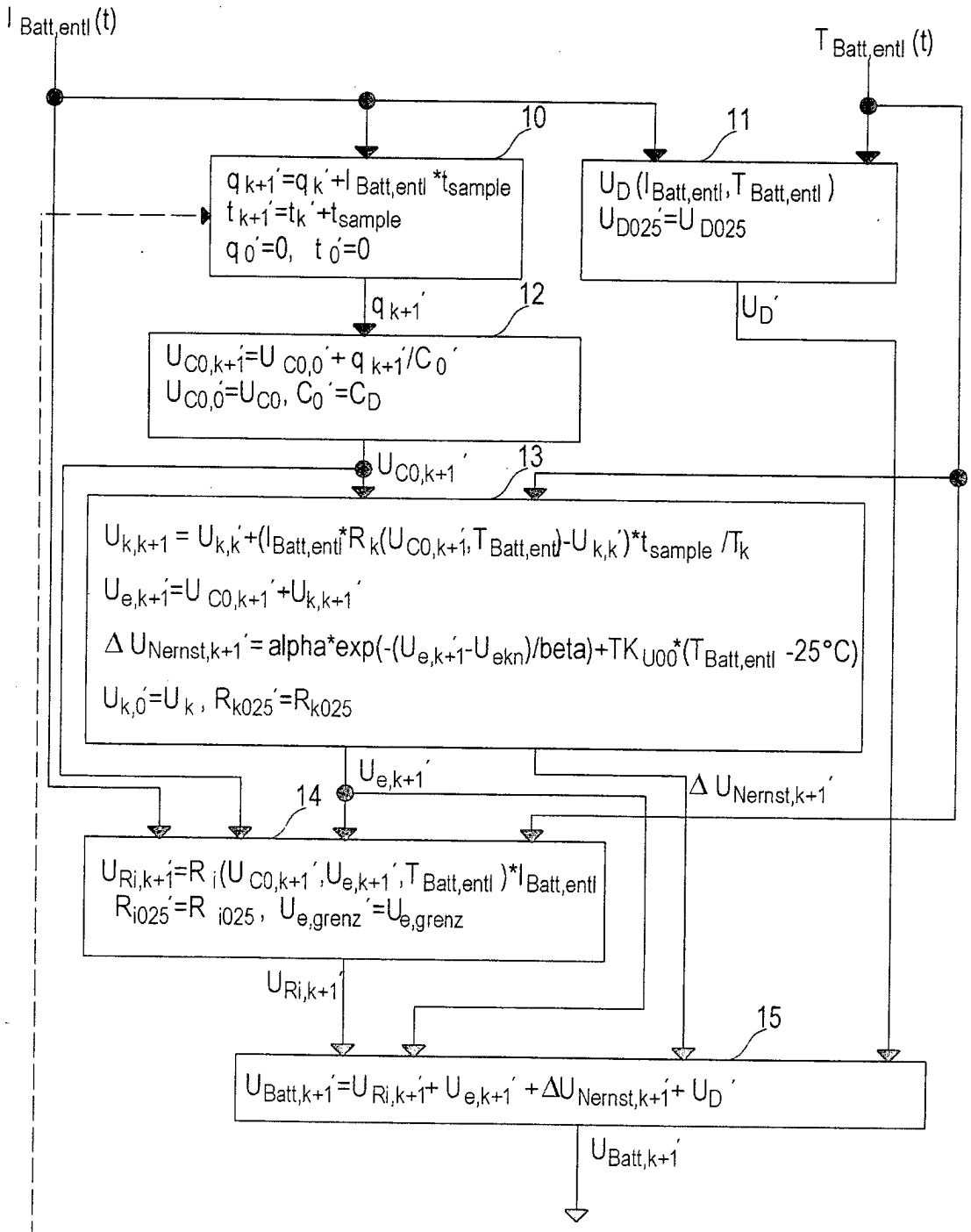

I Batt,entl (t)
T Batt,entl (t)
10
11
q k+1´=q k´+I Batt,entl *tsample
t k+1´=t k´+tsample
q 0´=0, t 0´=0
U D (I Batt,entl, T Batt,entl)
U D025´=U D025
q k+1´
U D´
12
U C0,k+1´=U C0,0´+ q k+1´/C 0´
U C0,0´=U C0, C 0´=C D
U C0,k+1´
13
U k,k+1 = U k,k´+(I Batt,entl*R k(U C0,k+1´, T Batt,entl)-U k,k´)*t sample /T k
U e,k+1´=U C0,k+1´+U k,k+1´
Δ U Nernst,k+1´= alpha*exp(-(U e,k+1´-U ekn)/beta)+TK U00*(T Batt,entl -25°C)
U k,0´=U k , R k025´=R k025
U e,k+1´
Δ U Nernst,k+1´
14
U Ri,k+1´=R i(U C0,k+1´, U e,k+1´, T Batt,entl)*I Batt,entl
R i025´=R i025 , U e,grenz´=U e,grenz
U Ri,k+1´
15
U Batt,k+1´=U Ri,k+1´+ U e,k+1´ +ΔU Nernst,k+1´+ U D´
U Batt,k+1´

Fig. 3a

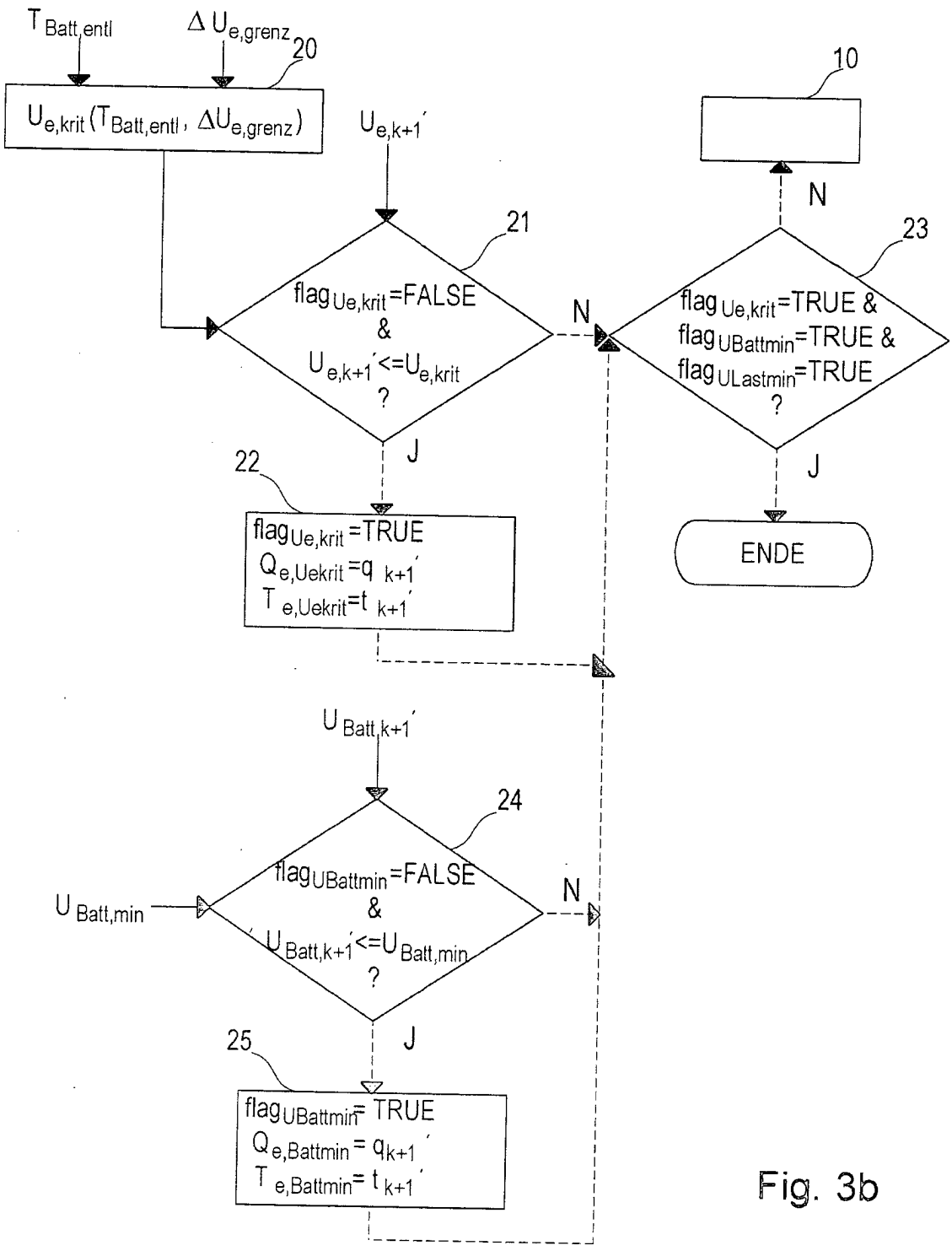

T Batt,entl
Δ U e,grenz
20
U e,krit (T Batt,entl , ΔU e,grenz)
U e,k+1´
21
flag Ue,krit=FALSE & U e,k+1´<=U e,krit ?
N
J
22
flag Ue,krit=TRUE
Q e,Uekrit=q k+1´
T e,Uekrit=t k+1´
10
N
23
flag Ue,krit=TRUE & flag UBattmin=TRUE & flag ULastmin=TRUE ?
J
ENDE
U Batt,k+1´
24
U Batt,min
flag UBattmin=FALSE & U Batt,k+1´<=U Batt,min ?
N
J
25
flag UBattmin= TRUE
Q e,Battmin= q k+1´
T e,Battmin= t k+1´

Fig. 3b

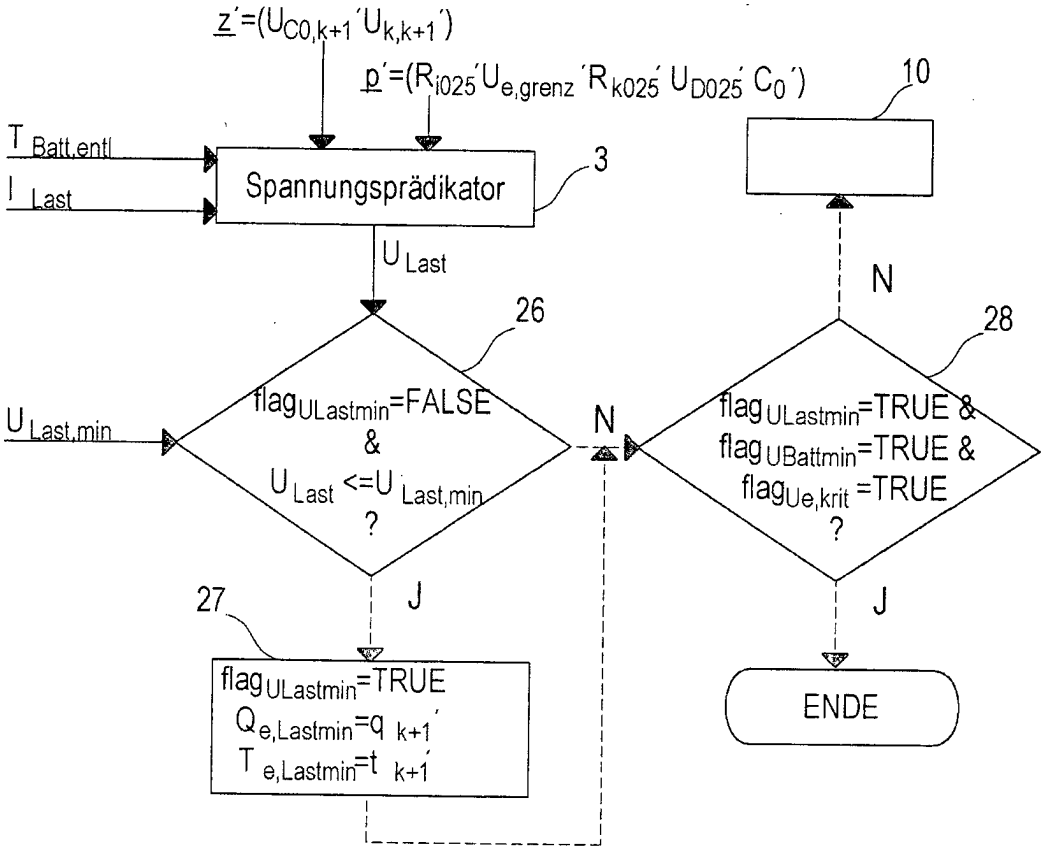

z´=(U C0,k+1´U k,k+1´)
p´=(R i025´U e,grenz´R k025´U D025´C 0´)
10
T Batt,entl
I Last
Spannungsprädikator
3
U Last
N
26
28
U Last,min
flag ULastmin=FALSE & U Last <=U Last,min ?
N
flag ULastmin=TRUE & flag UBattmin=TRUE & flag Ue,krit =TRUE ?
J
J
27
flag ULastmin=TRUE
Q e,Lastmin=q k+1´
T e,Lastmin=t k+1´
ENDE

Fig. 3c

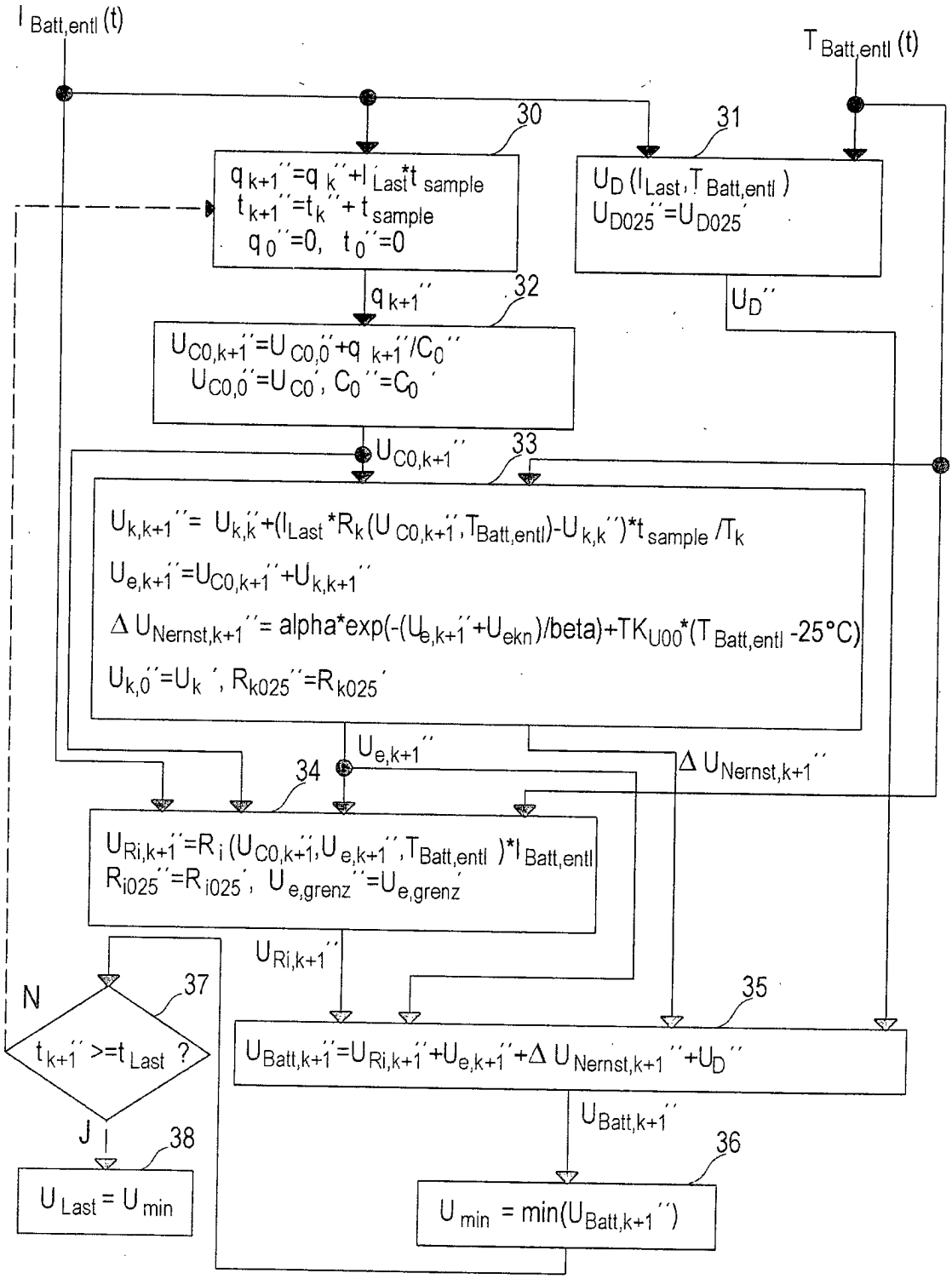

I Batt,entl (t)
T Batt,entl (t)
30
31
q k+1'' = q k'' + I Last * t sample
t k+1'' = t k'' + t sample
q 0'' = 0, t 0'' = 0
U D (I Last, T Batt,entl)
U D025'' = U D025'
q k+1''
U D''
32
U C0,k+1'' = U C0,0'' + q k+1''/C 0''
U C0,0'' = U C0', C 0'' = C 0'
U C0,k+1''
33
U k,k+1'' = U k,k'' + (I Last * R k (U C0,k+1'', T Batt,entl) - U k,k'') * t sample / T k
U e,k+1'' = U C0,k+1'' + U k,k+1''
Δ U Nernst,k+1'' = alpha * exp(-(U e,k+1'' + U ekn)/beta) + TK U00 * (T Batt,entl - 25°C)
U k,0'' = U k', R k025'' = R k025'
U e,k+1''
Δ U Nernst,k+1''
34
U Ri,k+1'' = R i (U C0,k+1'', U e,k+1'', T Batt,entl) * I Batt,entl
R i025'' = R i025', U e,grenz'' = U e,grenz'
U Ri,k+1''
N
37
t k+1'' >= t Last ?
35
U Batt,k+1'' = U Ri,k+1'' + U e,k+1'' + Δ U Nernst,k+1'' + U D''
J
38
U Batt,k+1''
36
U Last = U min
U min = min(U Batt,k+1'')

Fig. 3d

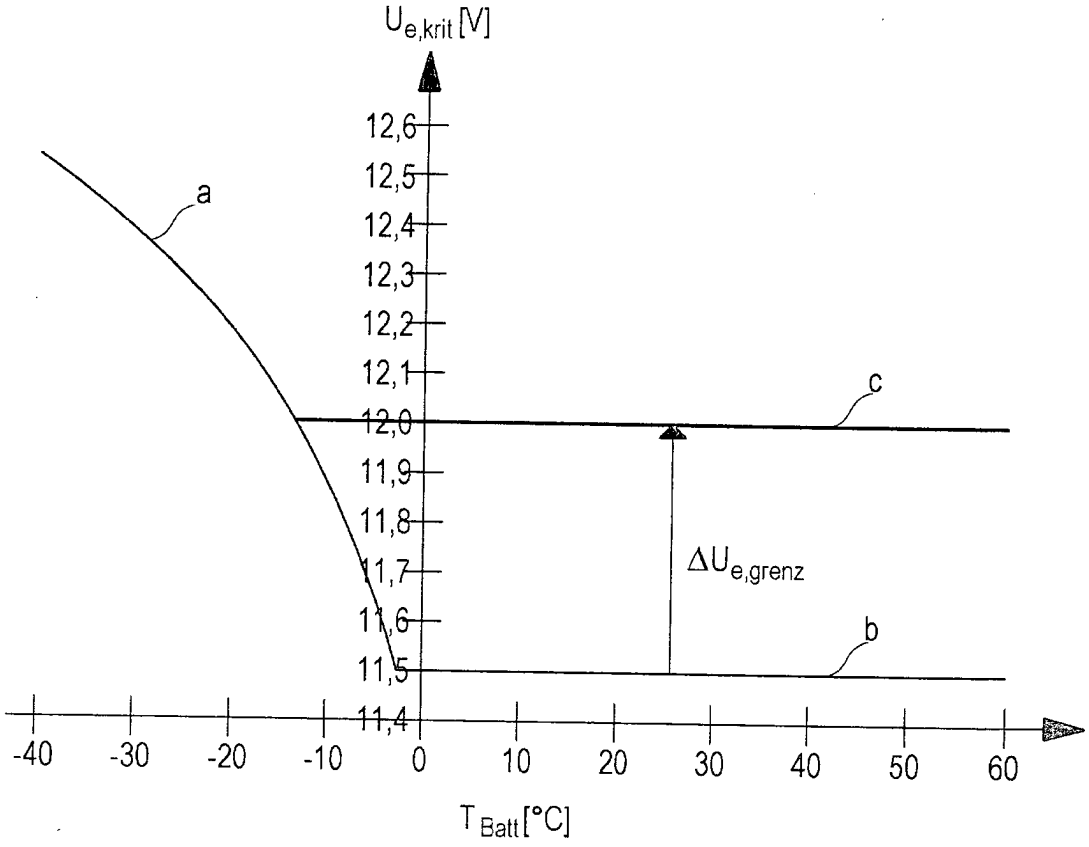

$U_{e,krit}$ [V]
12,6
12,5
12,4
12,3
12,2
12,1
12,0
11,9
11,8
11,7
11,6
11,5
11,4
a
b
c
$\Delta U_{e,grenz}$
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
60
T_{Batt} [°C]

Fig. 4