

# Schätzung von Modellparameter einer Pb-Säure Batterie

Pramayuda Hidayah Saleh

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Modelle</b>	<b>3</b>
1.1	Standard Modell (Tran-Khan-Choi) . . . . .	3
1.2	Modell mit Kondensator . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Implementierung von EKF</b>	<b>5</b>
2.1	Einfacher EKF . . . . .	5
2.1.1	Verlaufsplan . . . . .	5
2.1.2	Gleichungen . . . . .	6
2.2	Einfacher EKF mit externem Kondensator . . . . .	7
2.2.1	Verlaufsplan . . . . .	7
2.2.2	Gleichungen . . . . .	7
2.3	EKF mit numerisch abgeleiteter Spannung . . . . .	8
2.3.1	Verlaufsplan . . . . .	8
2.3.2	Gleichungen . . . . .	9
2.4	Dualer EKF . . . . .	10
2.4.1	Verlaufsplan . . . . .	11
2.4.2	Gleichungen . . . . .	12

# 1 Modelle

## 1.1 Standard Modell (Tran-Khan-Choi)

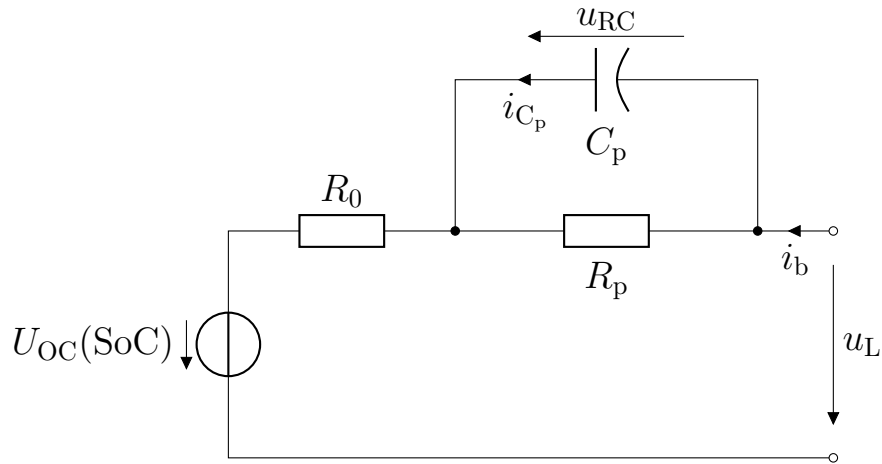


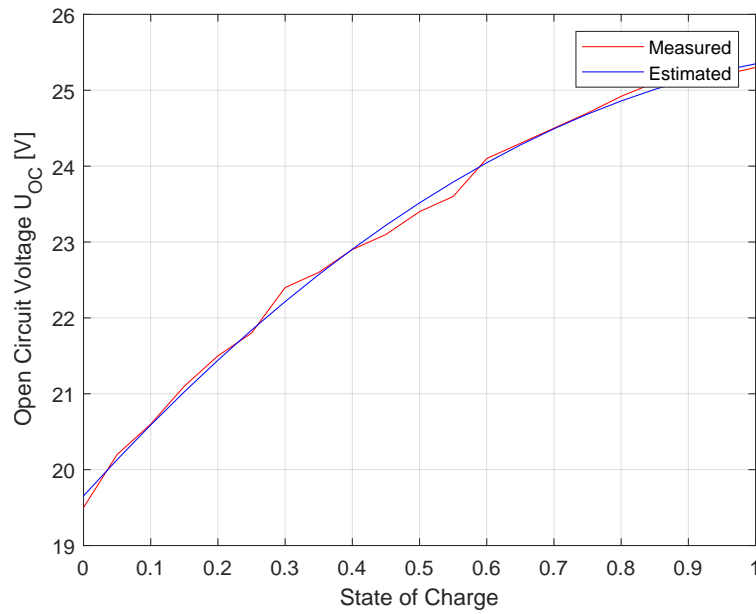
Abbildung 1: Schaltung des Standardmodells

Das Modell basiert sich aus einem Artikel[2]. Dieses Modell stimmt mit andere Literaturquellen und deswegen wird als Standardmodell einer Pb-Säure Batterie genommen. Die zu schätzende Größen sind sowohl die Parameter  $C_p$ ,  $R_p$  und  $R_0$  als auch die Zustände SoC (State of Charge) und  $u_{RC}$ . Mit der SoC kann die offene Klemmenspannung  $U_{OC}$  mithilfe einer SoC- $U_{OC}$ -Kurve einer typischen 12V Pb-Säure Batterie [1] berechnet werden. Die Gesamtkapazität der Batterie  $Q_e$  ist aus dem Datenblatt bekannt.

Da die Kurve nicht genau bekannt ist, wird angenommen, dass die Kurve eine quadratische Funktion ist mit der Form:

$$U_{OC}(SoC) = a_1 SoC(t)^2 + a_2 SoC(t) + a_3 \quad (1.1.1)$$

Durch lineare Regression werden die Koeffizienten bekannt (Abb.2)

Abbildung 2: Soc- $U_{OC}$ -Kurve

## 1.2 Modell mit Kondensator

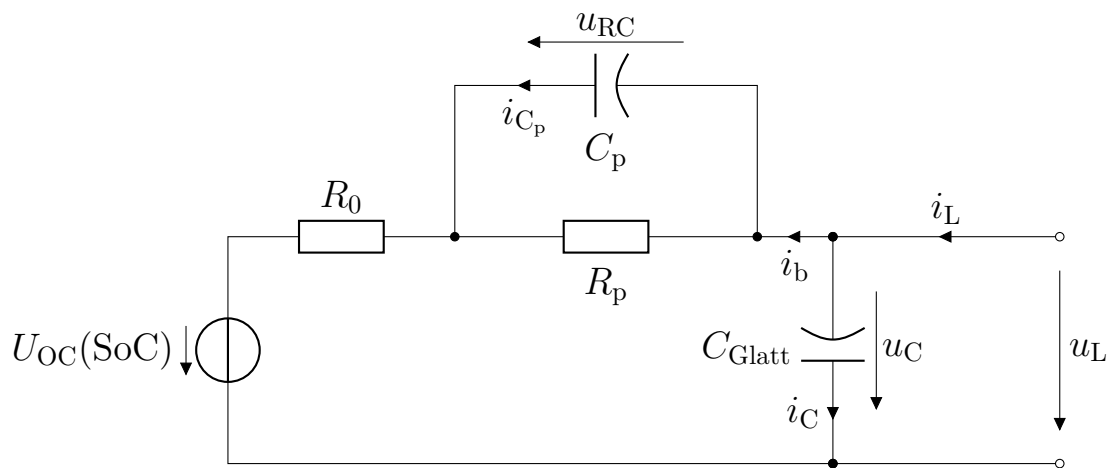


Abbildung 3: Schaltung des Modells mit Gleitkondensator

Der gemessenen Spannungsverlauf hat ein langsames Abklingverhalten, das durch Glättungskondensatoren vor dem Batterie (Teil der Buck-Boost-Converters) bei dem verwendeten Elektronik verursacht wird. Dazu wird das Standardmodell auf einem externen Kondensator erweitert, der die 2 Glättungskondensatoren umfasst. Hier sollte die Parameter für die SoC- $U_{OC}$ -Kurve gleich bleiben. Der Wert des Kondensators  $C_{Glatt}$  wird aus dem Paper vom Apostolos Vrontos bekannt.

## 2 Implementierung von EKFs

### 2.1 Einfacher EKF

Der erweitertes Kalman Filter, der die Parameter und Zustände des Standardmodells (Abb.1) schätzt, besitzt insgesamt 5 Zustände mit Eingang-  $i_b$  und Ausgangsgröße  $u_L$ .

#### 2.1.1 Verlaufsplan

Die zu schätzende Zustände sind folgendes:

$$x(t) = \left( \frac{1}{C_p} \quad \frac{1}{R_p} \quad \frac{1}{R_0} \quad \text{SoC}(t) \quad u_{RC}(t) \right)^T$$

Zu initialisieren sind  $\hat{x}[0| - 1]$  und  $P[0| - 1]$  Anfangswerte  $x_0$  der Zustände und die geschätzte Kovarianzmatrix  $P_0$ .  $\hat{x}[0| - 1]$  und  $P[0| - 1]$  sind die Einschrittsprädiktion von  $\hat{x}[k]$  und  $P[k]$ , die verwendet werden, um die aktuellen Zustände zu schätzen. Der restlichen Verlauf folgt den Verlauf von EKF wie bei Abb.4

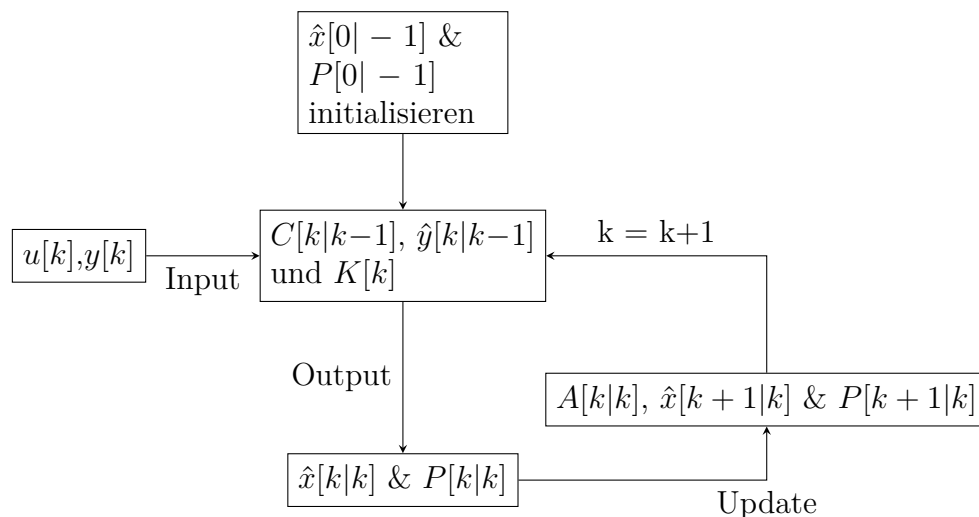


Abbildung 4: Identifikationsverlauf für das Standardmodell

Bei der Simulation ist nur der Eingang verfügbar aber Parameterwerte ist schon "bekannt" aus der EKF-Schätzung, somit werden die Zustände  $u_{RC}[k]$  sowie  $\text{SoC}[k]$  und der Ausgang  $y[k]$  ( $u_L[k]$ ) simuliert. Hier sind die Anfangswerte der Zustände auch aus dem EKF genommen.

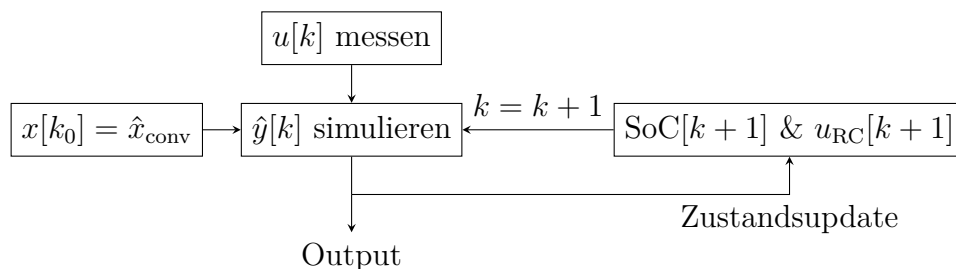


Abbildung 5: Simulationsverlauf für das Standardmodell

### 2.1.2 Gleichungen

Gleichungen zur Beschreibung der Ableitung aller Zustände werden unten aufgeschrieben.

$$\frac{d}{dt}x_i(t) = 0, i \in \{1, 2, 3\} \quad (2.1.1)$$

$$\frac{d}{dt}\text{SoC}(t) = \frac{i_b(t)}{Q_e} \quad (2.1.2)$$

$$\frac{d}{dt}u_{\text{RC}}(t) = \frac{1}{C_p} \left( i_b(t) - \frac{u_{\text{RC}}(t)}{R_p} \right) \quad (2.1.3)$$

Die Ausgangsgröße  $u_L$  ist definiert als:

$$u_L(t) = u_{R_0}(t) + u_{\text{RC}}(t) + U_{\text{OC}}(\text{SoC}(t)) \quad (2.1.4)$$

$$u_L(t) = i_b(t)R_0 + u_{\text{RC}}(t) + a_1\text{SoC}(t)^2 + a_2\text{SoC}(t) + a_3 \quad (2.1.5)$$

$f(x(t), u(t))$  und  $h(x(t), u(t))$  für das Standardmodell werden jeweils wie folgendes formuliert.

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{u(t)}{Q_e} \\ x_1(t)(u(t) - x_2(t)x_5(t)) \end{pmatrix}$$

$$y(t) = \frac{u(t)}{x_3(t)} + x_5(t) + a_1x_4(t)^2 + a_2x_4(t) + a_3$$

Die Matrizen  $C[k|k-1]$ ,  $A[k|k]$  und  $\hat{x}[k+1|k]$  bei der Schätzung werden definiert als:

$$C[k|k-1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{u_k}{\hat{x}_{3,k|k-1}^2} & 2a_1\hat{x}_{4,k|k-1} + a_2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1.6)$$

$$A[k|k] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta(u_k - \hat{x}_{2,k|k}\hat{x}_{5,k|k}) & -\Delta\hat{x}_{1,k|k}\hat{x}_{5,k|k} & 0 & 0 & -\Delta\hat{x}_{1,k|k}\hat{x}_{2,k|k} \end{pmatrix} \quad (2.1.7)$$

$$\hat{x}[k+1|k] = \begin{pmatrix} \hat{x}_{1,k|k} \\ \hat{x}_{2,k|k} \\ \hat{x}_{3,k|k} \\ \hat{x}_{4,k|k} + \Delta\frac{u_k}{Q_e} \\ \hat{x}_{5,k|k} + \Delta\hat{x}_{1,k|k}(u_k - \hat{x}_{2,k|k}\hat{x}_{5,k|k}) \end{pmatrix} \quad (2.1.8)$$

Bei der Simulation aber werden Gl.2.1.2 und Gl.2.1.3 sowie Gl.2.1.5 jeweils für die Zu-

standsupdate und Simulation der Klemmenspannung  $u_L$  verwendet. Nochmal in diskret formuliert:

$$u_L[k] = i_b[k]R_0 + u_{RC}[k] + a_1\text{SoC}[k]^2[k] + a_2\text{SoC}[k][k] + a_3$$

$$\begin{pmatrix} \text{SoC}[k+1] \\ u_{RC}[k+1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{SoC}[k] + \Delta \frac{i_b[k]}{Q_e} \\ u_{RC}[k] + \frac{\Delta}{C_p} \left( i_b[k] - \frac{u_{RC}[k]}{R_p} \right) \end{pmatrix}$$

## 2.2 Einfacher EKF mit externem Kondensator

Da das Standardmodell (Abb. 1) den Messdaten nicht passt, wird als Probe die estimierten Zustände des einfachen EKFs genommen und bei der Simulation wird ein Glättungskondensator vor der Batterie wie beim kompletten Modell (Abb. 3) verschaltet. Das heißt, dass der Verlauf bis zu der Simulation nicht geändert wird. Leider ist der Eingangsstrom  $i_L$  nicht bekannt, deswegen wird der gemessene Strom  $i_b$  anstelle von  $i_L$  verwendet.

### 2.2.1 Verlaufsplan

Die Zustände werden per EKF wie Abb. 4 geschätzt. Beim Simulationsteil aber sind zusätzliche Zustände benötigt.

$$x_{\text{sim}}[k] = \left( \text{SoC}[k] \quad u_{RC}[k] \quad i'_b[k] \quad \hat{u}_L[k] \right)^T$$

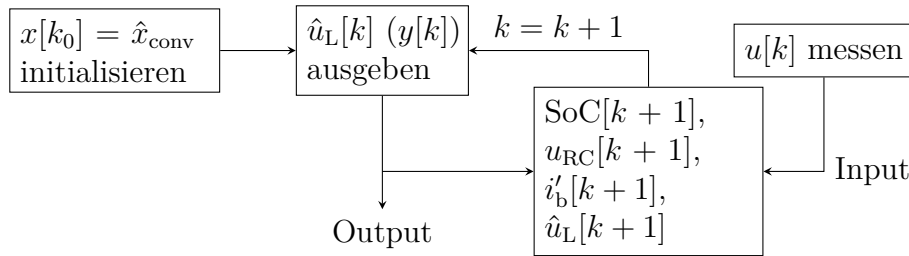


Abbildung 6: Simulationsverlauf für das Standard + C - Modell

### 2.2.2 Gleichungen

Neue Gleichungen werden zur Beschreibung der Glättung bei dem Spannungsverlauf benötigt. Wie vorher schon erwähnt, wird  $i_b(t) = i_L(t)$  angenommen. Dazu gibt's eine neue Knotengleichung:

$$i_b(t) = i_C(t) + i'_b(t) \quad (2.2.1)$$

Andere neue Gleichungen werden zur Simulation notwendig

$$u_L(t) = i'_b(t)R_0 + u_{RC}(t) + a_1\text{SoC}(t)^2 + a_2\text{SoC}(t) + a_3 \quad (2.2.2)$$

$$i_C(t) = \frac{d}{dt}u_L(t)C_{\text{Glatt}} \quad (2.2.3)$$

Aus (2.2.2) und (2.2.3):

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} i_C(t) &= \frac{d}{dt} i'_b(t) R_0 + \frac{d}{dt} u_{\text{RC}}(t) + \frac{d}{dt} \text{SoC}(t) (2a_1 \text{SoC}(t) + a_2) \\
 \frac{d}{dt} i'_b(t) &= \frac{1}{R_0} \left( \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} (i_b(t) - i'_b(t)) - \frac{1}{C_P} \left( i'_b(t) - \frac{u_{\text{RC}}(t)}{R_P} \right) - \frac{i'_b(t)}{Q_e} (2a_1 \text{SoC}(t) + a_2) \right) \\
 \frac{d}{dt} i'_b(t) &= \frac{1}{R_0} \left( \frac{u_{\text{RC}}(t)}{R_P C_P} - i'_b(t) \left( \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{1}{C_P} + \frac{2a_1 \text{SoC}(t) + a_2}{Q_e} \right) \right) + \frac{i_b(t)}{C_{\text{Glatt}} R_0} \quad (2.2.4)
 \end{aligned}$$

Mit (2.1.2), (2.1.3), (2.2.4) und (2.2.3) können die Zustände berechnet werden und als Ausgang ausgegeben. Nochmal in diskret:

$$\begin{pmatrix} \text{SoC}[k+1] \\ u_{\text{RC}}[k+1] \\ i'_b[k+1] \\ \hat{u}_L[k+1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{SoC}[k] + \Delta \frac{i'_b[k]}{Q_e} \\ u_{\text{RC}}[k] + \frac{\Delta}{C_P} \left( i'_b[k] - \frac{u_{\text{RC}}[k]}{R_P} \right) \\ i'_b[k] + \frac{\Delta}{R_0} \left( \frac{i_b[k]}{C_{\text{Glatt}} R_0} + \frac{u_{\text{RC}}[k]}{R_P C_P} - i'_b[k] \left( \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{1}{C_P} + \frac{2a_1 \text{SoC}[k] + a_2}{Q_e} \right) \right) \\ \hat{u}_L[k+1] = \hat{u}_L[k] + \frac{\Delta}{Q_e} (i_b[k] - i'_b[k]) \end{pmatrix}$$

## 2.3 EKF mit numerisch abgeleiteter Spannung

Von Anfang an wird das kompletten Modell (Abb. 3) als Basis dieses Ansatzes genommen. Da die geschätzten Zustände anders sind, sind die EKF Implementierung und Simulation, neu zu schreiben. Grundansatz ist den Strom  $i_C[k]$  aus der numerischen Ableitung der Klemmenspannung  $u_L$  nach Gl.2.2.3 zu berechnen.

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} u_L(t) &\approx \frac{u_L[k+1] - u_L[k]}{\Delta} \\
 i_C[k] &\approx C_{\text{Glatt}} \frac{u_L[k+1] - u_L[k]}{\Delta} \quad (2.3.1)
 \end{aligned}$$

Bei der Berechnung vom Kondensatorstrom  $i_C[k]$  benötigt wird die zukünftige Klemmenspannung, die von den gemessenen Datensatz genommen wird.

### 2.3.1 Verlaufsplan

Die geschätzte Zustände bzw. Parameter sind

$$x[k] = \left( \frac{1}{C_P} \quad \frac{1}{R_P} \quad \frac{1}{R_0} \quad \text{SoC}[k] \quad u_{\text{RC}}[k] \quad \hat{u}_L[k] \right)^T$$

$x_6[k]$  ( $\hat{u}_L[k]$ ) ist laut Gl.2.2.3 nach  $i_C[k]$  abhängig ist, die sich kompliziert berechnen lässt. Deswegen ist der Verlauf der Parameteridentifikation auch anders als Abb.4



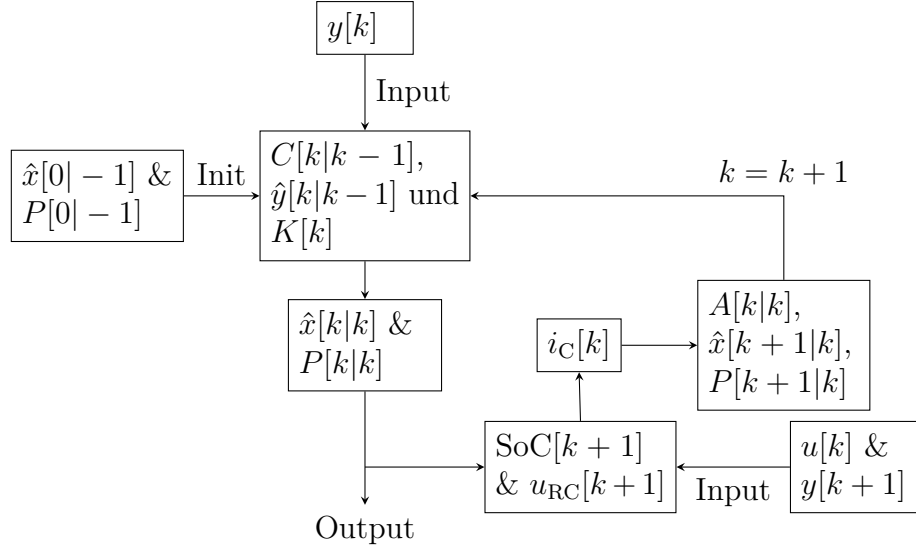


Abbildung 7: Identifikationsverlauf für Ansatz mit numerischer Ableitung

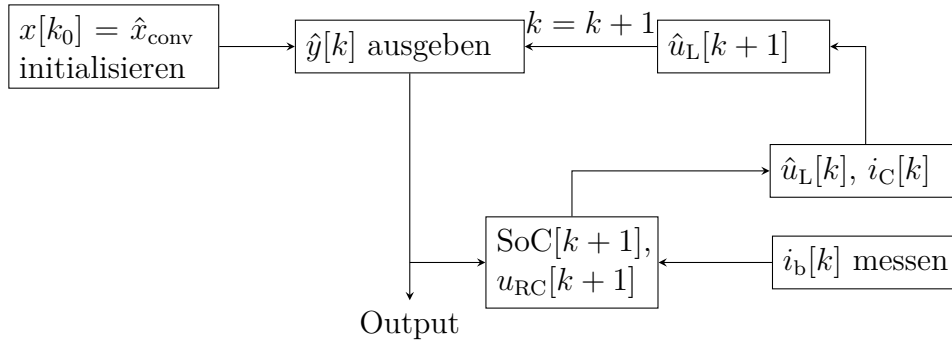


Abbildung 8: Simulationsverlauf mit numerischer Ableitung

Die Spannung  $\hat{u}_L[k]$ , die als Simulationsergebnis ausgegeben wird, und  $u_L[k]$  zur Berechnung von  $i_C[k]$  sind anders. Für die Berechnung von  $i_C[k]$  werden die alte ausgegebene Spannung  $u_L[k - 1]$  und die Klemmenspannung, die abhängig von  $SoC[k]$  und  $u_{RC}[k]$  ist und nach Gl.2.1.5 berechnet wird, benötigt.

### 2.3.2 Gleichungen

Bei der Simulation wird die zukünftige Klemmenspannung genommen, um den Strom  $i_C[k]$  numerisch zu berechnen. Um Verwirrung zu vermeiden, wird der Zustand, die estimierte Klemmenspannung, als  $\hat{u}_L[k]$  bezeichnet und  $u_L[k + 1]$  ist die zukünftige, gemessene Klemmenspannung.

$$i_C[k] = \frac{C_{\text{Glatt}}}{\Delta} (u_L[k + 1] - i_b[k]R_0 - u_{RC}[k] - a_1SoC[k]^2 - a_2SoC[k] - a_3) \quad (2.3.2)$$

$$\hat{u}_L[k + 1] = \hat{u}_L[k] + (u_L[k + 1] - i_b[k]R_0 - u_{RC}[k] - a_1SoC[k]^2 - a_2SoC[k] - a_3) \quad (2.3.3)$$

Die Zustands- und Ausgangsgleichung sind dann definiert als:

$$x[k+1] = \begin{pmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ x_3[k] \\ x_4[k] + \Delta \frac{u[k]}{Q_e} \\ x_5[k] + \Delta x_1[k] (u[k] - x_2[k] x_5[k]) \\ x_6[k] + (y[k+1] - \frac{u[k]}{x_3[k]} - x_5[k] - a_1 x_4[k]^2 - a_2 x_4[k] - a_3) \end{pmatrix}$$

$$\hat{y}[k] = x_6[k] \quad (2.3.4)$$

Für den EKF sind die folgende Matrizen wichtig:

$$C[k|k-1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3.5)$$

$$A[k|k] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \Delta (u_k - x_{2,k} x_{5,k}) & -\Delta x_{1,k} x_{5,k} & 0 & 0 & 1 - \Delta x_{1,k} x_{2,k} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u_k}{x_{3,k}^2} & -(2a_1 x_{4,k} - a_2) & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3.6)$$

Für die Simulation hat das Modell kein Zugriff auf die gemessene Spannung bzw. zukünftige Werte, deswegen wird  $i_C[k]$  anders definiert:

$$\frac{d}{dt} u_L(t) \approx \frac{u_L[k] - u_L[k-1]}{\Delta}$$

$$i_C[k] = \frac{C_{\text{Glatt}}}{\Delta} (i_b[k] R_0 + u_{\text{RC}}[k] + a_1 \text{SoC}[k]^2 + a_2 \text{SoC}[k] + a_3 - \hat{u}_L[k-1]) \quad (2.3.7)$$

Somit sind die Zustand- und. Ausgangsgleichung für die Modellsimulation wie folgende:

$$\begin{pmatrix} \text{SoC}[k+1] \\ u_{\text{RC}}[k+1] \\ \hat{u}_L[k+1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{SoC}[k] + \frac{\Delta}{Q_e} i_k \\ u_{\text{RC}}[k] + \frac{\Delta}{C_p} \left( i_b[k] - \frac{u_{\text{RC}}[k]}{R_p} \right) \\ \hat{u}_L[k+1] + (i_b[k] R_0 + u_{\text{RC}}[k] + a_1 \text{SoC}[k]^2 + a_2 \text{SoC}[k] + a_3 - \hat{u}_L[k-1]) \end{pmatrix}$$

## 2.4 Dualer EKF

Da nur der Batterienstrom  $i_b(t)$  gemessen wird, ist die Glätterung, die durch den äußeren Kondensator verursacht wird, schwer zu beschreiben. Deswegen wird der Strom  $i_L(t)$  von einem EKF geschätzt wird, was dann für die Schätzung anderer Parameter bzw. Zuständen

bei dem anderen EKF verwendet wird.

### 2.4.1 Verlaufsplan

Der erste EKF hat den gleichen Verlaufsplan wie bei Abb.4 aber keine Eingangsgröße. Die Zustände sind

$$x_L[k] = \begin{pmatrix} i_L[k] & i_b[k] \end{pmatrix}^T$$

mit dem Batterienstrom  $i_b[k]$  als Ausgangsgröße.  $i_b[k]$  ist aber noch der Eingang  $u[k]$ , wenn die 2 EKFs als ein ganzes System betrachtet wird.

Nachdem der Strom  $i_L[k]$  geschätzt wird, sind die andere Zustände bzw. Parameter zu schätzen.

$$x[k] = \left( \frac{1}{C_P} \quad \frac{1}{R_P} \quad \frac{1}{R_0} \quad \text{SoC}[k] \quad u_{RC}[k] \quad \hat{u}_L[k] \right)^T$$

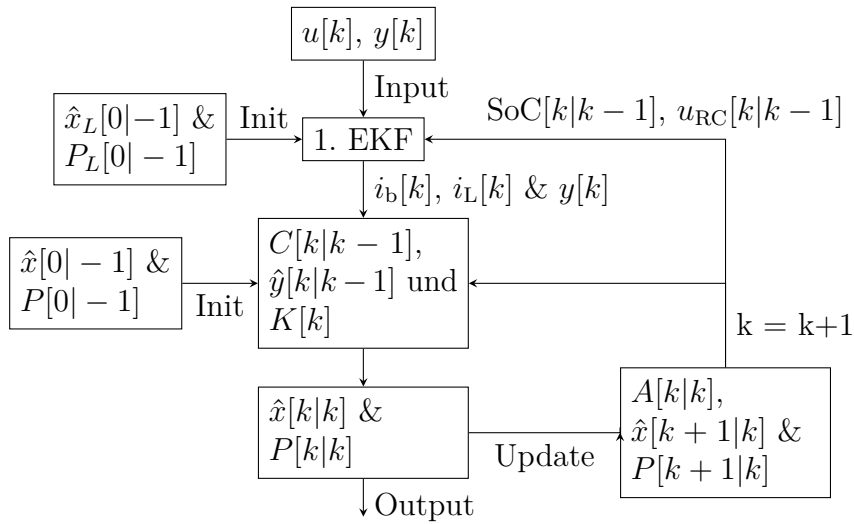


Abbildung 9: Identifikationsverlauf mit DEKF

Nachdem die Zustände fertig geschätzt, bleibt der 1. EKF noch bei der Simulation, um  $i_L[k]$  weiter zu schätzen.

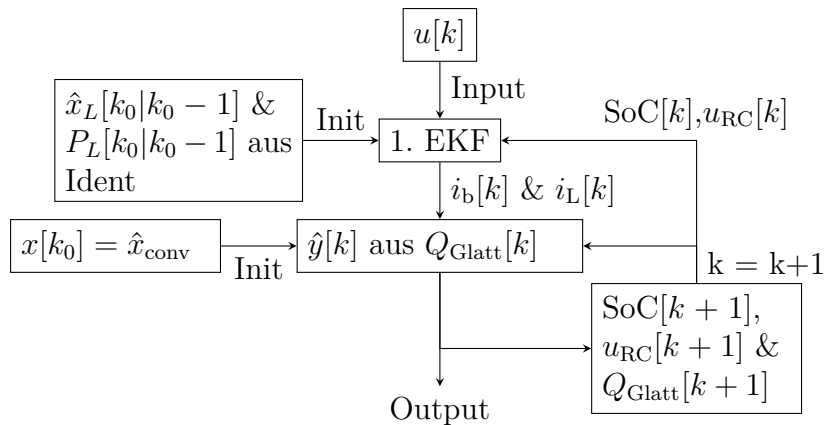


Abbildung 10: Simulationsverlauf mit DEKF

### 2.4.2 Gleichungen

Für den ersten EKF, ist es sehr wichtig,  $i_b[k]$  mit  $i_L[k]$  zu verknüpfen.  $i_L[k]$  wird als ein konstante Größe, was durch Rauschen  $w_1[k]$  geändert wird.

$$i_L[k] = 0 \quad (2.4.1)$$

Die Ableitung von  $i_b[k]$  wird ähnlich wie Gl.2.2.4 aussehen. Benötigt werden  $\text{SoC}[k]$  und  $u_{\text{RC}}[k]$ , die aus der Einschriftsprädiktion des 2. EKF genommen werden.

$$i_b[k+1] = i_b[k] + \frac{\Delta}{R_0} \left( \frac{i_L(t)}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{u_{\text{RC}}(t)}{R_{\text{P}}C_{\text{P}}} - i_b(t) \left( \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{1}{C_{\text{P}}} + \frac{2a_1\text{SoC}(t) + a_2}{Q_e} \right) \right) \quad (2.4.2)$$

Demzufolge werden die Matrizen  $C_L[k|k-1]$  und  $A_L[k|k]$  bzw.  $\hat{x}_L[k+1|k]$  definiert als:

$$C[k|k-1] = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4.3)$$

$$A[k|k] = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\Delta}{R_0 C_{\text{Glatt}}} & 1 - \frac{\Delta}{R_0} \left( \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{1}{C_{\text{P}}} + \frac{2a_1\text{SoC}(t) + a_2}{Q_e} \right) \end{pmatrix} \quad (2.4.4)$$

$$\hat{x}_L[k+1|k] = \begin{pmatrix} \hat{x}_{L1,k} \\ \hat{x}_{L2,k} + \frac{\Delta}{R_0} \left( \frac{\hat{x}_{L1,k}}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{u_{\text{RC}}(t)}{R_{\text{P}}C_{\text{P}}} - \hat{x}_{L2,k} \left( \frac{1}{C_{\text{Glatt}}} + \frac{1}{C_{\text{P}}} + \frac{2a_1\text{SoC}(t) + a_2}{Q_e} \right) \right) \end{pmatrix} \quad (2.4.5)$$

Für den 2. EKF werden Gl.2.1.1, Gl.2.1.2, Gl.2.1.3 und Gl.2.2.3 verwendet. Der Kondensatorstrom  $i_C[k]$  kann direkt aus  $i_b[k]$  und  $i_L[k]$  berechnet werden und deswegen wird als ein bekannter Eingang  $u_2[k]$  betrachtet.

Die wichtige Matrizen bzw.  $\hat{x}[k+1|k]$  sind:

$$C[k|k-1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4.6)$$

$$A[k|k] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \Delta(u_k - \hat{x}_{2,k}\hat{x}_{5,k}) & -\Delta\hat{x}_{1,k}\hat{x}_{5,k} & 0 & 0 & 1 - \Delta\hat{x}_{1,k}\hat{x}_{2,k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4.7)$$

$$\hat{x}[k+1|k] = \begin{pmatrix} \hat{x}_{1,k} \\ \hat{x}_{2,k} \\ \hat{x}_{3,k} \\ \hat{x}_{4,k} + \frac{\Delta}{Q_e} u_k \\ \hat{x}_{5,k} + \Delta \hat{x}_{1,k} (u_k - \hat{x}_{2,k} \hat{x}_{5,k}) \\ \hat{x}_{6,k} + \frac{\Delta}{C_{\text{Glatt}}} u_{2,k} \end{pmatrix} \quad (2.4.8)$$

Bei der Simulation werden für jede Iterationen die Zustände bzw. Ausgangsgröße wie folgende berechnet:

$$\begin{pmatrix} \text{SoC}[k+1] \\ u_{\text{RC}}[k+1] \\ Q_{\text{Glatt}}[k+1] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{SoC}[k] + \frac{\Delta}{Q_e} i_k \\ u_{\text{RC}}[k] + \frac{\Delta}{C_p} \left( i_b[k] - \frac{u_{\text{RC}}[k]}{R_p} \right) \\ Q_{\text{Glatt}}[k] + \Delta (i_L[k] - i_b[k]) \end{pmatrix}$$

$$\hat{u}_L[k] = \frac{Q_{\text{Glatt}}[k]}{C_{\text{Glatt}}}$$

## Literatur

- [1] A. Muh. Rifqa Al Hadi, Cahyantari Ekaputri und Muhamad Reza. “Estimating the state of charge on lead acid battery using the open circuit voltage method”. In: Journal of Physics: Conference Series 1367 (Nov. 2019), S. 12077. DOI: 10.1088/1742-6596/1367/1/012077. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1367/1/012077>.
- [2] Ngoc-Tham Tran, Abdul Khan und Woojin Choi. “State of Charge and State of Health Estimation of AGM VRLA Batteries by Employing a Dual Extended Kalman Filter and an ARX Model for Online Parameter Estimation”. In: Energies 10.1 (Jan. 2017), S. 137. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10010137.