

EKF Implementierung zur Batterie SOC-Schätzung 2. Version

Pramayuda H. Saleh

1 Batterie Modell

Aus dem Paper[2] wurde ein elektrisches Schaltungsmodell von der Batterie wie in Abb.1 genommen.

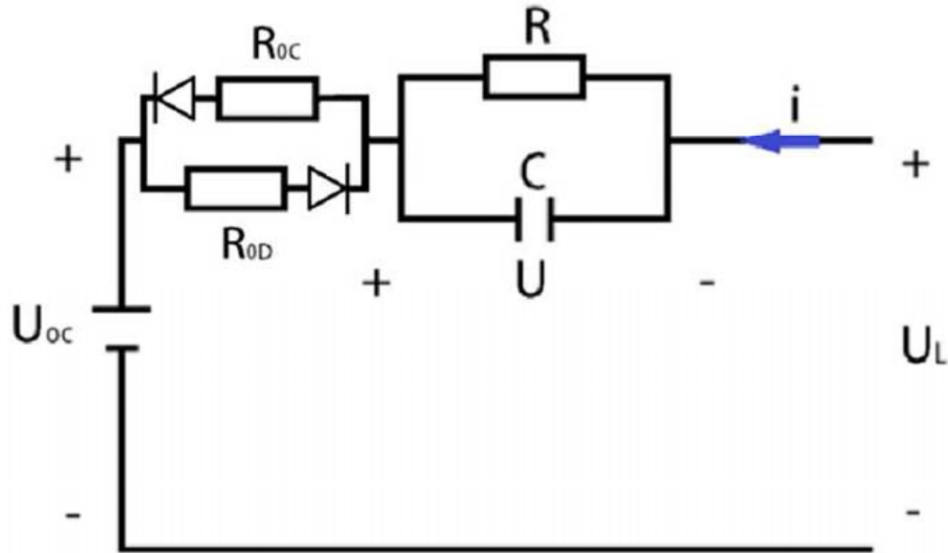


Abbildung 1: Batterie Modell

Ein ähnliches Modell ist auch bei anderer Literatur zu finden[1]. Hier wird nur 1 ohmscher Widerstand R_0 verwendet, das heißt, der ohmsche Widerstand sowohl beim Aufladen als auch beim Entladen eingesetzt wird.

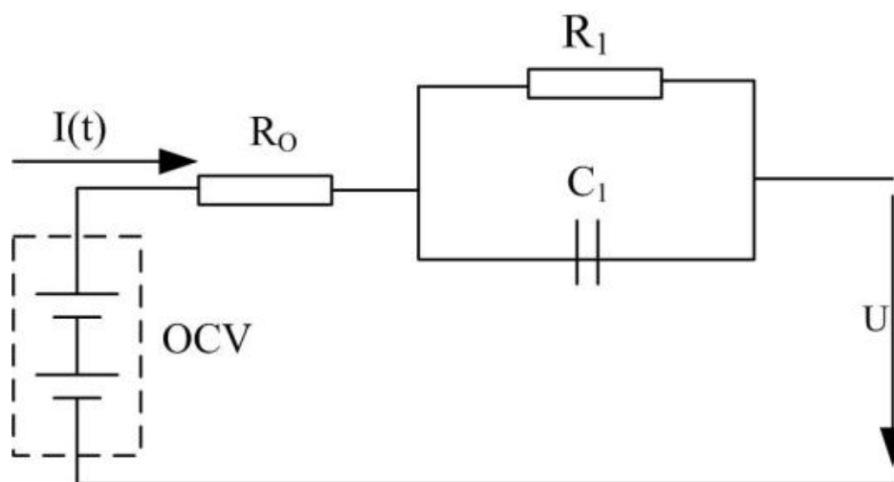


Abbildung 2: Batterie Modell von Piao et al

Das Batteriemodell muss aber noch modifiziert werden, da bei der Messungen die Batterie mit $i > 0$ aufgeladen wird (Andere Richtung als der Strom in Abbildung 1)

2 Zustandsraummodell

Da die Messung der Parameter C , R und R_0 nicht explizit gegeben ist, werden alle Parameter als Zustände des Kalman-Filters geschätzt. Außerdem werden 2 Zustände aus dem Modell in Abbildung 1 und Abbildung 2 geschätzt, nämlich die State-of-Charge (SoC) und die Spannung über den Kondensator bzw. elektrochemischen Widerstand R . Der Ein- und Ausgang des Modells sind jeweils $y(t) = U_L(t)$ und $u(t) = i(t)$. Die Zustände (und Parameter) werden in den Zustandsvektor $x(t)$ dargestellt:

$$x(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{C} & \frac{1}{R} & \frac{1}{R_0} & SoC(t) & U_{RC}(t) \end{pmatrix}$$

Dazu braucht man die folgende Gleichungen zur Bestimmung der nichtlinearen Funktionen $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ und $y(t) = g(x(t), u(t))$:

$$\dot{U}_{RC}(t) = \frac{1}{C} (i(t) - i_R(t)) = \frac{1}{C} \left(i(t) - \frac{U_{RC}(t)}{R} \right) \quad (2.0.1)$$

$$U_{OC}(SoC) = a_1 SoC^2 + a_2 SoC + a_3 \quad (2.0.2)$$

$$\dot{SoC} = \frac{\eta}{Q_e} i(t), \eta = \begin{cases} 1 & , i < 0 \\ 0.95 & , sonst \end{cases} \quad (2.0.3)$$

$$U_L(t) = U_{OC}(SoC) + U_{RC}(t) + R_0 i(t) \quad (2.0.4)$$

Die Funktion $g(x(t), u(t))$ ist genau die rechte Seite der Gleichung 2.0.4. Die Funktionsmatrix $f(x(t), u(t))$ ist dann:

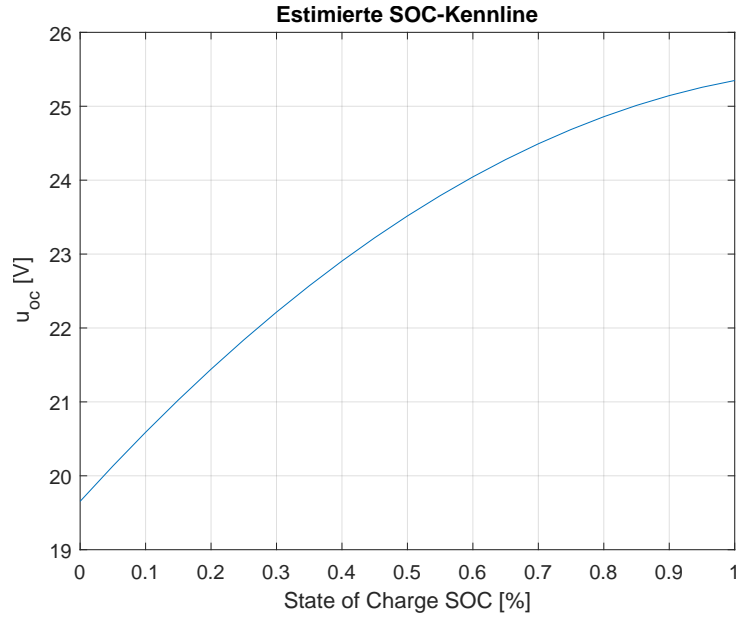
$$f = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2a_1 SoC + a_2 \\ \frac{1}{C} \left(i(t) - \frac{U_{RC}(t)}{R} \right) \end{pmatrix}$$

Die Parameter a_1 , a_2 und a_3 beschreibt das quadratische Verhalten zwischen U_{OC} und SoC . Genommen ist eine U_{OC}/SoC Kurve aus dem Internet für dieselbe Batterytyp (Pb-Säure, AGM, 12 Volt). Aus dieser Kurve werden "Messpunkten" erzeugt und die Parameter mit Least Squares geschätzt. Das Ergebnis von der Schätzung ist:

a_1	a_2	a_3
-4.0568	9.7508	19.6545

Tabelle 1: Parameter für die Funktion $U_{OC}(SoC)$

Die geschätzte Kurve ist wie in Abbildung 3 zu sehen.

Abbildung 3: U_{OC} in Abhängigkeit von der SoC

Die Spannung auf der y-Achse ist doppelt so groß als die originale Kurve, da bei dem praktischen Anwendung dieser Arbeit 2 Batterien in Reihe verwendet werden, statt nur eine.

3 EKF Implementierung

Aus dem nichtlinearen Modell werden die Matrizen $A[k]$ und $C[k+1]$ aus der diskretisierten Funktion $f(x_k, u_k)$ hergeleitet.

$$f(x_k, u_k) = \begin{pmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \\ x_{3k} \\ x_{4k} + \Delta u_k \frac{\eta}{Q_e} \\ x_{5k} + \Delta x_{1k} (u_k - x_{5k} x_{2k}) \end{pmatrix}$$

$$A[k] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta(u_k - x_{5k} x_{3k}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\Delta x_{1k} x_{5k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \Delta x_{1k} x_{3k} \end{pmatrix} \Big|_{x=x_k|_k, u=u_k}$$

$$C[k+1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{u_k}{x_{3k}^2} & 2a_1 SoC + a_2 & 1 \end{pmatrix} \Big|_{x=\hat{x}_{k+1}|_k, u=u_k}$$

4 Ergebnis

Als initiale Zustände werden $x_{k_0+1|k_0} = \left(\frac{2}{790.27F} \quad \frac{1}{2 \cdot 0.0126\Omega} \quad \frac{1}{2 \cdot 8,6m\Omega} \quad 0.5 \quad 0V \right)^T$. Angenommen ist die Kapazität C am Anfang nicht geladen und die Batterie ist halbwegs geladen ($SoC = 50\%$). Die Initialwerte für $\frac{1}{C}$, $\frac{1}{R}$ und $\frac{1}{R_0}$ wurde schon für bestimmten SoC -Punkte gemessen[1]

Diagonalelementen von P_0 sind das Quadrat des maximalen Fehler. $W[k]$ ist zurzeit 0 und $Z[k]$ wurde ungefähr aus dem Varianz des nah zu konstanten Verlaufs der gemessenen Spannung U_L berechnet.

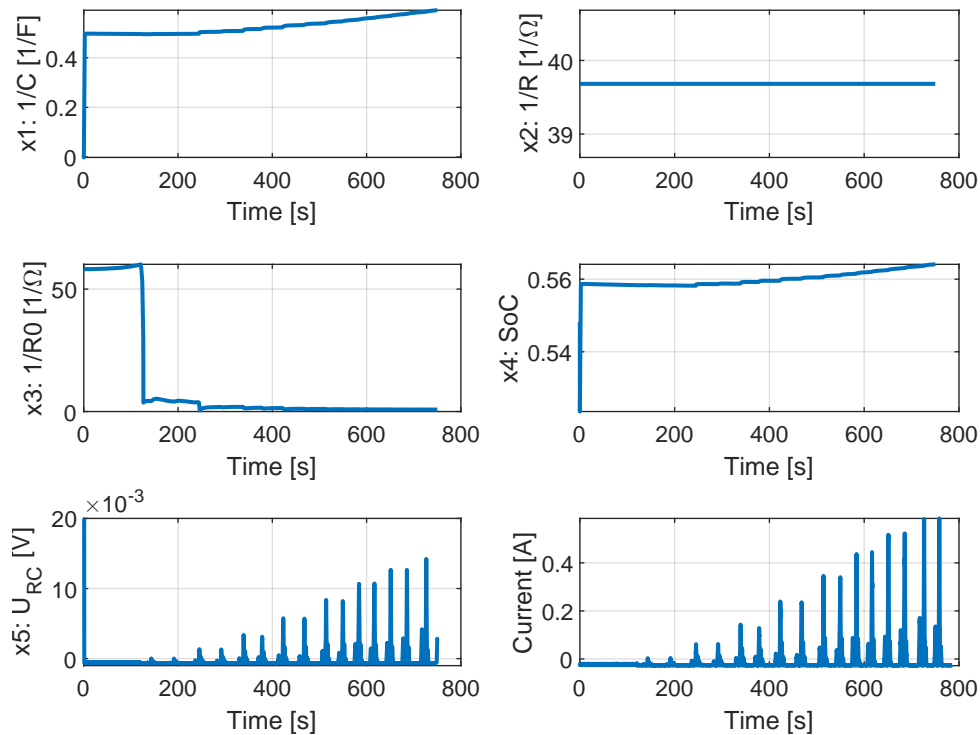


Abbildung 4: Schätzung von Zuständen

Die Resultat in Abb.4 ist sinnvoll und noch erklärbar. Die Umkehrung des Kapazität steigt mit der Zeit, das heißt der imaginäre Teil der Batterie Impedanz sinkt mit der Zeit. R bleibt konstant und ab einem Zeitpunkt fängt der ohmsche Widerstand R_0 an, stark zu steigen.

Die SoC fängt bei 0.5 an und geht bis zum ca. 0.565. Die Aufladung ist schwächer als vorher erwartet, aber ist noch sinnvoll, da die Aufladung im Form von Peaks, was nicht lange dauert und deswegen wird die Batterie nur wenig aufgeladen. Im folgenden Bild werden die Spannungen geplottet:

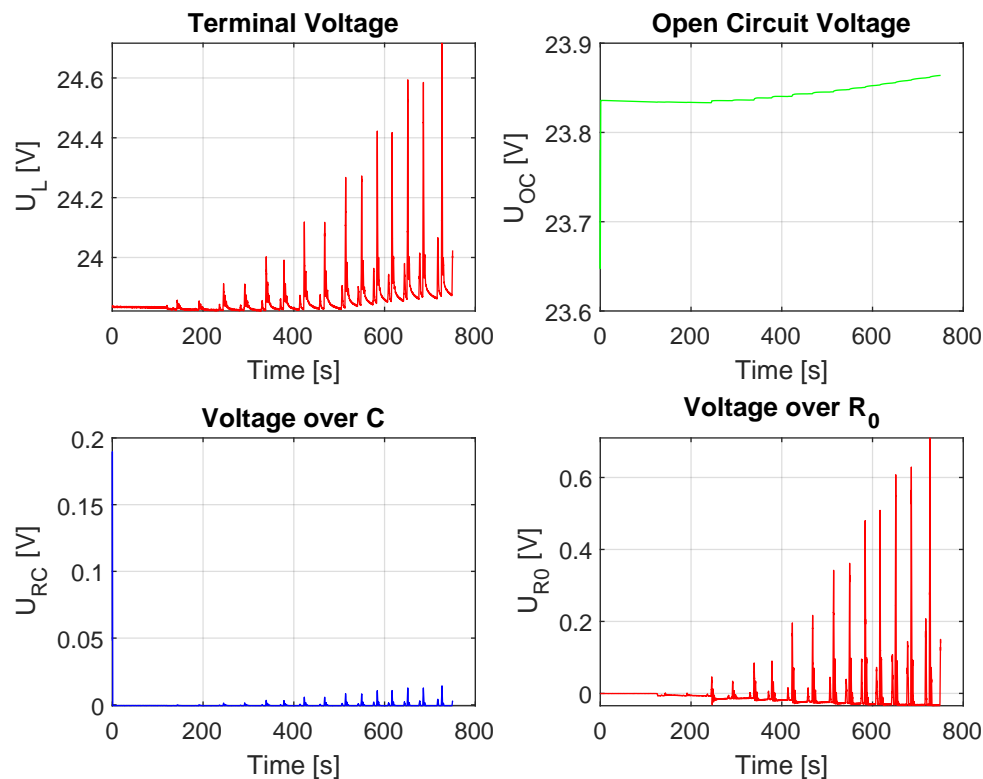


Abbildung 5: Spannungen in einer Batterie

5 EKF Implementierung in Matlab R2021a

```

1 function x_k = ekf_2(u_k, y_k, x0, P0, W_k, Z_k, Delta, a1, a2,
2   Q_e, a3)
3     persistent P_pk x_pk
4     if isempty(x_pk)
5         x_pk = x0; %x[k|k-1]
6     end
7     if isempty(P_pk)
8         P_pk = P0;
9     end
10
11     if(u_k<0)
12         eta = 1;
13     else
14         eta = 0.95;
15     end
16
17     % Kalman-Gain and real Covariance Matrix
18     % States (1/C, 1/R, 1/R0, SOC, Uc)
19     y_hat_k = a1*x_pk(4)^2+a2*x_pk(4)+a3+x_pk(5)+u_k/x_pk(3);
20     C_k = [0, 0, -u_k/x_pk(3)^2, 2*a1*x_pk(4)+a2, 1];
21     K_k = P_pk*C_k'/(Z_k + C_k*P_pk*C_k');

```

```

22     x_k = x_pk + K_k*(y_k - y_hat_k);
23     P_k = P_pk - K_k*C_k*P_pk;
24
25     % Calculate A, prediction of x and P
26     A_k = [[eye(4); zeros(1,4)], [Delta*(u_k-x_k(5)*x_k(3));0;...
27         -Delta*x_k(1)*x_k(5);0;1-Delta*x_k(1)*x_k(3)]];
28     x_pkp1 = [x_k(1);x_k(2);x_k(3);x_k(4)+Delta*u_k/Q_e;...
29         x_k(5)-Delta*x_k(1)*(x_k(5)*x_k(2)-u_k)];
30
31     P_pkp1 = A_k*P_k*A_k' + W_k;
32
33     % Update persistent variable
34     x_pk = x_pkp1;
35     P_pk = P_pkp1;
36 end

```

Literatur

- [1] Changhao Piao u. a. “Study on Stable Estimation Method for Lead-acid Battery SOC by Extended Kalman Filter”. In: International Journal of Control and Automation 7.4 (Apr. 2014), S. 429–438. ISSN: 20054297. DOI: 10.14257/ijca.2014.7.4.39.
- [2] R. Yamin und A. Rachid. “Modeling and Simulation of a Lead-Acid Battery Packs in MATLAB/Simulink: Parameters Identification Using Extended Kalman Filter Algorithm”. In: 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference. IEEE, März 2014. ISBN: 978-1-4799-4922-9.