

Erfassung der kalendarischen und zyklischen Alterung einer 50 Ah Lithium-  
Eisenphosphat-Batteriezelle (LFP-Batteriezelle)

Detection of calendrical and cyclic aging of a 50Ah lithium-iron-phosphate cell

Abdul Waheed M.Eng.

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen Abteilung Bocholt  
Fachbereich Maschinenbau  
Münsterstr. 265  
46397 Bocholt

[abdul.waheed@w-hs.de](mailto:abdul.waheed@w-hs.de)

## Kurzfassung

In dieser Arbeit geht es um die kalendarische und zyklische Alterung einer 50 Ah Lithium-Eisenphosphat-Batterie zelle (LFP-Batterie zelle). Dabei wird die Abnahme der Kapazität der LFP-Batterie zelle während der kalendarischen und zyklischen Alterung ermittelt. Die LFP-Batterie zellen werden an einem Batterieprüfstand kalendarisch und zyklisch belastet.

Die Stressfaktoren der kalendarischen Alterung sind drei verschiedene Temperaturen (0 °C, 25 °C, 40 °C) und Ladezustandsbereiche ( $\Delta\text{SOC}$ ) von 1-0,8/ 0,8-0,5 und 0,5-0,2. Zur Ermittlung der kalendarischen Alterung wird in regelmäßigen Zeitabständen das Verhältnis  $A_{\text{cal}}$  der irreversiblen Kapazität  $C_{\text{cal,irv}}$  aufgrund der kalendarischen Alterung und der Nennkapazität  $C$  gebildet. Zur Ermittlung der zyklischen Alterung wird die LFP-Batterie zelle ebenfalls bei Temperaturen von 0 °C, 25 °C und 40 °C gelagert und mit Entladeströmen von 25 A, 50 A und 100 A jeweils um 0,2/ 0,5 und 0,8 DOD<sup>1</sup> entladen. Anschließend wird das Verhältnis  $A_{\text{cyc}}$  der irreversiblen Kapazität  $C_{\text{cyc,irv}}$  aufgrund der zyklischen Alterung und der Nennkapazität  $C$  bestimmt.

---

<sup>1</sup> DOD = Depth of Discharge (Entladtiefe)

## Batterieprüfstand

Die Stressfaktoren zur Erfassung der kalendarischen Alterung der LFP-Batteriezelle sind drei Umgebungstemperaturen (0 °C, 25 °C, 40 °C) und drei Ladezustandsbereiche (1-0,8/ 0,8-0,5/ 0,5-0,2). Dadurch ergeben sich insgesamt neun verschiedene Testreihen, **Tabelle 1**.

Testreihe	Ladezustandsbereich ( $\Delta$ SOC) [-]	Temperatur [°C]	Nr. Prüfling
1	0,5-0,2	0	51A
2	0,8-0,5	0	52A
3	1-0,8	0	53A
4	0,5-0,2	25	54A
5	0,8-0,5	25	55A
6	1-0,8	25	56A
7	0,5-0,2	40	57A
8	0,8-0,5	40	58A
9	1-0,8	40	59A

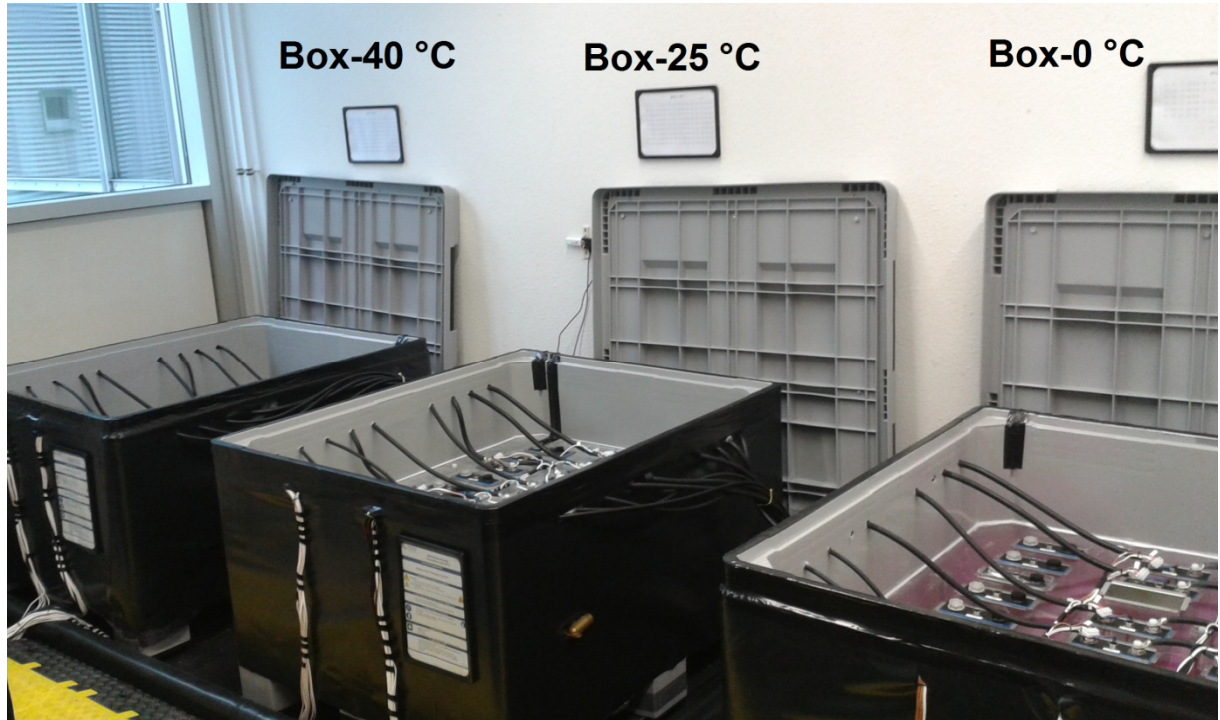
**Tabelle 1:** Testreihe kalendarischen Alterung LFP-Batteriezellen

Die zyklische Alterung der LFP-Batteriezelle wird bei den Stressfaktoren Temperatur (0 °C, 25 °C, 40 °C), Entladestrom (25 A, 50 A, 100 A) und Entladetiefe (0,2/ 0,5/ 0,8) durchgeführt. Daraus resultieren insgesamt 27 Testreihen, **Tabelle 2**.

Testreihe	Stromstärke in C [A]	Entladetiefe (DOD) [-]	Temperatur [°C]	Nr. Prüfling
1	0,5	0,2	0	3A
2	1	0,2	0	6A
3	2	0,2	0	9A
4	0,5	0,5	0	2A
5	1	0,5	0	5A
6	2	0,5	0	8A
7	0,5	0,8	0	1A
8	1	0,8	0	4A
9	2	0,8	0	7A
10	0,5	0,2	25	12A
11	1	0,2	25	15A
12	2	0,2	25	18A
13	0,5	0,5	25	11A
14	1	0,5	25	14A
15	2	0,5	25	17A
16	0,5	0,8	25	10A
17	1	0,8	25	13A
18	2	0,8	25	16A
19	0,5	0,2	40	21A
20	1	0,2	40	24A
21	2	0,2	40	27A
22	0,5	0,5	40	20A
23	1	0,5	40	23A
24	2	0,5	40	26A
25	0,5	0,8	40	19A
26	1	0,8	40	22A
27	2	0,8	40	25A

**Tabelle 2:** Testreihe zyklischen Alterung der LFP-Batteriezellen

Zur Durchführung der kalendarischen und zyklischen Alterung der LFP-Batteriezellen wird ein Batterieprüfstand erstellt. Dieser Batterieprüfstand besteht aus einer Wasser-Temperierung (**Bild 1**) sowie einer Überwachung und Steuerung der LFP-Batteriezellen, **Bild 2**.



**Bild 1:** Wasser-Temperierung auf 0 °C, 25 °C und 40 °C

Zur Temperierung der LFP-Batteriezellen werden insgesamt drei Boxen mit jeweils einer Temperatur von 0 °C, 25 °C und 40 °C verwendet. Dazu wird für die Box-0 °C ein Gemisch aus Glykol und destilliertem Wasser verwendet. In der Box-25 °C und -40 °C wird ausschließlich destilliertes Wasser benutzt.

Außerdem werden alle Lade- und Entladevorgänge zur Erfassung der zyklischen Alterung überwacht und gesteuert, **Bild 2**.

Die Spannung (1), die Temperatur (2) und der Strom (3) von LFP-Batteriezellen werden mittels Labview (4) überwacht sowie geladen und entladen, Bild 2. Alle LFP-Batteriezellen werden durch die Ladegeräte mit 30 A geladen und mit 25 A (5), 50 A (6) und 100 A (7) durch elektronische Leistungswiderstände entladen.



Bild 2: Überwachung und Steuerung der LFP-Batteriezellen

## Batterietestsystem

An dem XCTS-Batterietestsystem wird in regelmäßigen Abständen die kalendarische Alterung  $A_{cal}$  und die zyklische Alterung  $A_{cyc}$  der LFP-Batteriezellen bestimmt, **Bild 3**.



Bild 3: XCTS-Batterietestsystem

Dazu wird das Verhältnis von irreversiblen Kapazitätsverlust  $C_{cal,irv}$  zur

Nennkapazität  $C$  gebildet.

$$A_{\text{cal}} = \frac{C_{\text{cal,irv}}}{C} \quad (1)$$

Bei der zyklischen Alterung  $A_{\text{cyc}}$  wird ebenfalls das Verhältnis von irreversiblen Kapazitätsverlust  $C_{\text{cyc,irv}}$  zur Nennkapazität  $C$  gebildet.

$$A_{\text{cyc}} = \frac{C_{\text{cyc,irv}}}{C} \quad (2)$$

Die genaue Vorgehensweise zur Erfassung der Kapazität der LFP-Batteriezelle ist in (Waheed 2014) beschrieben.

### Ergebnisse kalendarische Alterung

Nachfolgend sind für alle Prüflinge die Werte von  $A_{\text{cal}}$  nach 365 Tagen dargestellt,

**Tabelle 3.**

	$\Delta\text{SOC } 1-0,8$	$\Delta\text{SOC } 0,8-0,5$	$\Delta\text{SOC } 0,5-0,2$	Prüfling nach 365 Tage
25 °C (0 °C)	0,036	0,041	0,015	53A, 52A, 51A
	$\Delta\text{SOC } 1-0,8$	$\Delta\text{SOC } 0,8-0,5$	$\Delta\text{SOC } 0,5-0,2$	Prüfling nach 365 Tage
25 °C	0,043	0,0418	0,032	56A , 55A, 54A
	$\Delta\text{SOC } 1-0,8$	$\Delta\text{SOC } 0,8-0,5$	$\Delta\text{SOC } 0,5-0,2$	Prüfling nach 365 Tage
25 °C (40 °C)	0,066	0,056	0,034	59A, 58A, 57A

**Tabelle 3:**  $A_{\text{cal}}$  nach 365 Tagen

Alle Messungen zur Ermittlung von  $A_{\text{cal}}$  wurden bei 25 °C Umgebungstemperatur mittels des erweiterten Arrhenius-Gesetz angenähert. Genaueres zum erweiterten Arrhenius-Gesetz kann aus (Popp H. *et al.* 2014) entnommen werden.

Durch die Temperierung der Prüflinge auf 25 °C kann ein direkter Vergleich zwischen allen  $A_{\text{cal}}$  durchgeführt werden.

Auffallend ist, dass die  $A_{\text{cal}}$  der Prüflinge mit steigender Temperatur und steigendem Ladezustandsbereich zunehmen. Der Prüfling 59A hat die höchste  $A_{\text{cal}}$  von 0,066 nach 365 Tagen. Die geringste  $A_{\text{cal}}$  zeigt der Prüfling 51A.

## Ergebnisse zyklische Alterung

In **Tabelle 4** werden alle  $A_{cyc}$  der Prüflinge für jeweils 1000 Lade- und Entladezyklen dargestellt. Alle  $A_{cyc}$  wurden ebenfalls bei 25 °C durch eine Geradengleichung angenähert. Weiteres dazu kann aus den Abbildungen in (Popp H. *et al.* 2014) und (Wang *et al.* 2011) entnommen werden.

25 °C (0 °C)	DOD 0,2	DOD 0,5	DOD 0,8	Prüfling
25 A	0,010	0,027	--	3A, 2A, --
50 A	0,036	0,085	--	6A, 5A, --
100 A	0,055	--	--	9A, --, --
25 °C	DOD 0,2	DOD 0,5	DOD 0,8	Prüfling
25 A	0,007	0,002	0,020	12A, 11A, 10A
50 A	0,010	0,030	0,041	15A, 14A, 13A
100 A	0,031	0,035	0,068	18A, 17A, 16A
25 °C (40 °C)	DOD 0,2	DOD 0,5	DOD 0,8	Prüfling
25 A	0,045	0,007	0,002	21A, 20A, 19A
50 A	0,001	0,012	0,033	24A, 23A, 22A
100 A	0,019	0,043	0,063	27A, 26A, 25A

**Tabelle 4:**  $A_{cyc}$  der Prüflinge nach jeweils 1000 Lade- und Entladezyklen

Zusammenfassend kann für die meisten Prüflinge festgehalten werden, dass die  $A_{cyc}$  mit abnehmender Temperatur, steigender Entladetiefe sowie mit steigendem Laststrom steigt. Die Messwerte des Prüflings 21A bilden hierbei eine Ausnahme.



## Literatur

Popp, H; Dvorak, D; Niklas, C. (2014): *Lifetime Simulation of Different Lithium-Ion Batteries for Vehicle-to-Grid Application*, Vienna, Austria.

Waheed, A; Koppers, M; (2014): *Development and Verification of a Three-Dimensional and Real-Time Thermoelectric Model of a Lithium-Iron-Phosphate Battery*, Dresden.

Wang, J; Liu, P; Hicks-Garner (2011): Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 196 No. 8, pp. 3942–3948.