

# Entwicklung und Diskussion einer 12V-Pufferbatterie aus $\text{LiFePO}_4$ -Akkumulatoren

Martin Brand<sup>1</sup>, Peter Keil<sup>1</sup>, Stefan Grubwinkler<sup>2</sup>, Andreas Jossen<sup>1</sup>, Markus Lienkamp<sup>2</sup>

1: Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES)

2: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM)

TU München, Arcisstraße 21, 80333 München

[www.ees.ei.tum.de](http://www.ees.ei.tum.de), [martin.brand@tum.de](mailto:martin.brand@tum.de)

## 1. Motivation und Struktur dieses Beitrags

In Kraftfahrzeugen wird seit jeher die Bleibatterie als Pufferbatterie für das 12 V-Bordnetz verwendet. Der niedrige Preis, die hohe Sicherheit und die gute Kaltstartfähigkeit sind wesentliche Argumente für die Verwendung dieses Batterietyps in den sogenannten Starting-Lighting-Ignition-Anwendungen (SLI). Jedoch weist die Bleibatterie eine vergleichsweise niedrige spezifische Energie von ca. 35 Wh/kg auf, welche in gewichtsoptimierten Elektrofahrzeugen die Effizienz und damit auch die Reichweite reduziert. Die stetige Weiterentwicklung der Li-Ionen-Technologie erlaubt es, eine leichtere Alternative zur konventionellen Pb-Starterbatterie zu entwickeln. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Schritte bei der Entwicklung und Fertigung einer 12 V-Pufferbatterie aus Li-Ionen-Zellen. Die Pufferbatterie wird realisiert und später in das Elektrofahrzeug MUTE der TU München integriert (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Das Elektrofahrzeug MUTE der TU München [1]

Da die Sicherheit gerade bei der Verwendung von Li-Ionen-Zellen ein wichtiges Thema ist, wird zu Beginn auf die einzuhaltenden Sicherheitsbestimmungen der ISO 26262 eingegangen. Um den Sicherheitsanforderungen mit einem sinnvollen Maß an Aufwand gerecht zu werden, werden Zellen auf Basis der  $\text{LiFePO}_4$ -Technologie gewählt. Dieses Kathodenmaterial reagiert nicht exotherm und weist daher eine höhere intrinsische Sicherheit auf.

Anschließend wird die Dimensionierung der Pufferbatterie im Hinblick auf die minimal benötigte Energie und Leistung vorgenommen. Es zeigt sich, dass die notwendige Zellenzahl durch die Leistungsanforderungen bei niedrigen Temperaturen bestimmt wird.

Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen wird der Aufbau und die Fertigung der Li-Ionen-Batterie erörtert. Dabei wird näher auf die Zellkontaktierung und das Batteriemanagementsystem (BMS) eingegangen.

Der Beitrag schließt, indem die entwickelte 12 V-Batterie auf  $\text{LiFePO}_4$ -Basis mit ihrem konventionellem Äquivalent, der Pb-Starterbatterie, anhand der elektrischen Kenndaten, der Kosten und der Komplexität verglichen wird. Für die Entwicklung und Fertigung der  $\text{LiFePO}_4$ -Batterie muss ein wesentlich höherer Aufwand betrieben werden, um den Anforderungen genauso gut wie bisher zu genügen. Das führt zu einer höheren Komplexität und zu höheren Kosten. Andererseits ist die Zyklenstabilität der Li-Ionen-Batterie höher und das spezifische Gewicht kann auf die Hälfte gegenüber der Pb-Batterie reduziert werden.

## 2. Auswahl eines geeigneten Zelltyps

Gerade bei Li-Ionen-Batterien ist ein besonderes Augenmerk auf die Sicherheit zu legen. In diesem Abschnitt wird daher diskutiert, mit welchem Zelltyp eine sichere 12 V-Pufferbatterie mit vertretbarem Aufwand realisiert werden kann. Als Anhaltspunkt dienen hierzu die Forderungen der Norm ISO 26262.

Seit November 2011 gilt für sicherheitsrelevante elektrische/elektronische Systeme im Kraftfahrzeug die Norm ISO 26262 („Road vehicles – Functional safety“). Sie ist auch bei der Entwicklung einer neuen Li-Ionen-Pufferbatterie zu berücksichtigen. Zu Beginn der Entwicklung empfiehlt diese Norm, eine Gefahren- und Risikoanalyse (G&R) durchzuführen. Dabei werden potentielle sicherheitsrelevante Fehler der Komponente ermittelt. Diese Fehler werden in Bezug auf die von ihnen ausgehenden Gefahren für Personen innerhalb und in der Umgebung des Fahrzeugs (Severity, S), die Wahrscheinlichkeit der Fahrsituation in der der Fehler auftritt (Exposure, E) sowie dessen Kontrollierbarkeit (Controllability, C) betrachtet. Jedem potentiellen Fehler wird anhand der Bewertungskriterien S, E und C mithilfe von Tabelle 1 ein Automotiv-Safety-Integrity-Level (ASIL) zugeordnet. [2] [3]

		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	ASIL A
	E4	QM	ASIL A	ASIL B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	ASIL A
	E3	QM	ASIL A	ASIL B
	E4	ASIL A	ASIL B	ASIL C
S3	E1	QM	QM	ASIL A
	E2	QM	ASIL A	ASIL B
	E3	ASIL A	ASIL B	ASIL C
	E4	ASIL B	ASIL C	ASIL D

Tabelle 1: Zuordnung eines ASIL zu einem funktionalen Fehler [2]

Die ASIL-Zuordnung wird beispielhaft für eine 12 V-Pufferbatterie auf Basis von Lithiumcobalt-oxid (LCO) für die Fahrsituation „Stand mit Laden“ verdeutlicht. In diesem Beispiel soll nur ein Fehler in der Spannungsüberwachung des BMS betrachtet werden. Da die Fahrsituation mehrmals wöchentlich und damit per Definition sehr häufig auftritt, ist ihr die Wahrscheinlichkeit E4 zuzuordnen. Die Folgen einer fehlerhaften Spannungsüberwachung während des Ladevorgangs können zur Überladung der LCO-Batterie führen. Ein möglicher Batteriebrand kann von der Garage aus auf das Gebäude übergreifen und ist daher als sehr gefährlich (S3) einzustufen. Die Beherrschbarkeit dieser Situation wird mit C3, also als schwer kontrollierbar, bewertet. Tabelle 1 zeigt, dass in Folge die Spannungsüberwachung einer 12 V-Pufferbatterie auf LCO-Basis mit ASIL D eingestuft werden würde. Die G&R muss für jeden potentiellen Fehler durchgeführt werden. Bei einer 12 V-Pufferbatterie auf LCO-Basis würde dann ein Großteil der Maßnahmen mit ASIL D bewertet werden. Damit verbunden sind Forderungen nach homogener bzw. diverser Redundanz, nach sehr niedrigen Ausfallwahrscheinlichkeiten und nach umfangreichen Tests.

Um den Entwicklungsaufwand und die Komplexität und damit auch das Gewicht und die Kosten der 12 V-Batterie niedrig zu halten, ist es unabdingbar, dass die verwendeten Li-Ionen-Zellen bereits eine intrinsische Sicherheit aufweisen. Die Sicherheit die nicht im Zelltyp vorhanden ist, muss nämlich in der Verschaltung der Zellen, dem Batteriegehäuse, dem BMS und der Peripherie vorgesehen werden.

Da bei  $\text{LiFePO}_4$ -Kathoden die Sauerstoffatome in der Olivinstruktur fest gebunden sind, weisen Akkumulatoren mit dieser Technologie eine höhere intrinsische Sicherheit als Li-Ionen-Zellen mit anderen Kathodenmaterialien auf. Dies wird bei einer dynamischen Differenzkalorimetrie (engl.: Differential Scanning Calorimetry, DSC) sichtbar. Bei dieser Methode wird untersucht, welche Wärmemenge dem Prüfling zugeführt werden muss, um seine Temperatur zu erhöhen. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer DSC für verschiedene Kathodenmaterialien. Dass  $\text{LiFePO}_4$  auch bei Erhöhung der Temperatur nicht exotherm reagiert, wird klar ersichtlich. [8] [9]

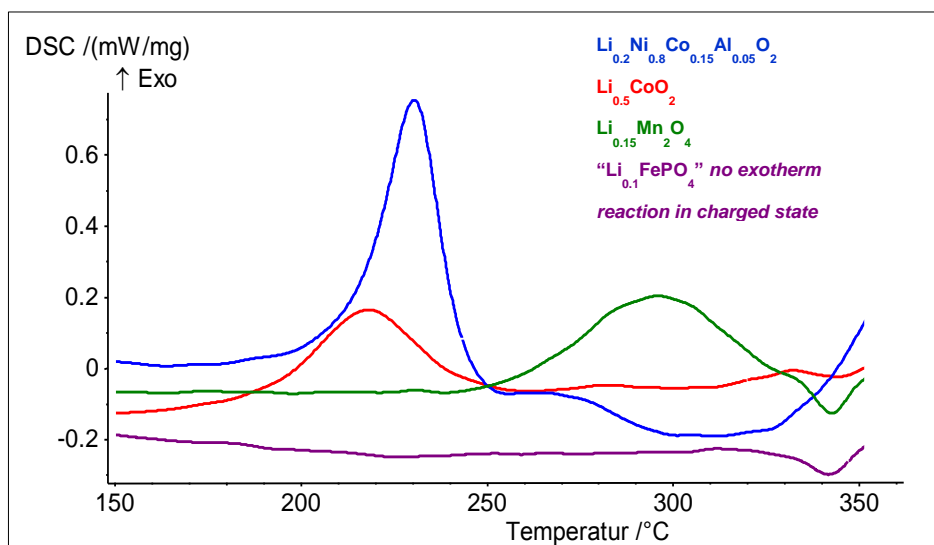


Abbildung 2: Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) an unterschiedlichen Kathodenmaterialien [9]

Aufgrund der höheren intrinsischen Sicherheit im Gegensatz zu anderen Li-Ionen-Technologien wurden LiFePO<sub>4</sub>-Zellen für den Aufbau der 12 V-Batterie gewählt. Das höhere Maß an Sicherheit, erlaubt einen einfacheren und kostengünstigeren Aufbau. So müssen beispielsweise viele Batteriekomponenten nicht zwingend redundant ausgeführt werden.

### 3. Dimensionierung der Pufferbatterie

Nach der Wahl des Zelltyps wird im Folgenden die Dimensionierung der Pufferbatterie im Hinblick auf die minimal notwendige Energie und Leistung diskutiert.

Die minimal notwendige Energie ist durch den Notzustand mit Warnblinklicht bei Ausfall der Hochvolt-Batterie (HV) gegeben. Dieser Fahrzeugzustand soll mindestens 3 h aufrecht erhalten werden können. Das Elektrofahrzeug MUTE verfügt über LED-Warnblinkleuchten, sodass inklusive der noch aktiven Steuergeräte für das beschriebene Szenario eine mittlere Leistung von ca. 30 W benötigt werden. Die Pufferbatterie wird bis zum Ausfall der HV-Batterie stets auf einem Ladezustand (engl. State of Charge, SOC) von 80 % gehalten. Fällt das HV-Netz aus, muss die Pufferbatterie die für den Notzustand mit Warnblinklicht geforderte Energie von 90 Wh alleine erbringen können. [5] [7]

Die Batterie wird aus 26650-Rundzellen aufgebaut, da eine breite Auswahl an Herstellern LiFePO<sub>4</sub>-Zellen mit diesem Standardmaß anbieten. Eine Zelle mit diesem Maß weist für gewöhnlich einen Energieinhalt von mehr als 7,5 Wh auf, sodass mit einer 4s4p-Verschaltung bei 80 % SOC ein Energieinhalt von mindestens 96 Wh verfügbar ist. Die geforderte Dauer für den Notzustand mit Warnblinklicht ist damit erfüllt.

Voraussetzung für einen sicheren und fehlerfreien Betrieb des Fahrzeugs ist, dass die verschalteten LiFePO<sub>4</sub>-Zellen eine stabile Spannungslage garantieren. Um die Kompatibilität des Bordnetzes mit bisherigen 12 V-Bordnetzen zu gewährleisten, soll die Spannung der Li-Ionen-Pufferbatterie im Bereich 8 V – 15 V liegen. LiFePO<sub>4</sub>-Zellen weisen im vollgeladenen Zustand eine Spannung von ca. 3,65 V und im entladenen Zustand eine Spannung von ca. 2,0 V auf. Vier Zellen in Serie führen also zu der gewünschten Spannungslage. [4] [5]

Da Elektrofahrzeuge dem Klima ausgesetzt sind, wird gefordert, dass die Spannungslage auch für niedrige Temperaturen und bei hohen Strompulsen stabil ist, woraus sich die Anforderungen für die Leistungsfähigkeit der Batterie ableiten lassen. Beim Elektrofahrzeug MUTE treten im 12 V-Bordnetz Stromspitzen von maximal 150 A für eine Dauer von maximal 50 ms auf. Liegt gleichzeitig eine Temperatur von –20 °C an, soll die Bordnetzspannung trotzdem nicht unter 8 V absinken, um den Ausfall eines Steuergerätes sicher zu verhindern. Die Zellauswahl für diese Anforderungen, stellt eine wesentliche Herausforderung dar. Hierfür wurden die Zellen von drei unterschiedlichen Herstellern bei variierenden Temperaturen mit Strompulsen von 25 A Stärke und 50 ms Dauer beaufschlagt.

Der elektrische Widerstand einer Zelle steigt mit sinkenden Temperaturen stark an. In Abbildung 3 ist der ohmsche Innenwiderstandes  $R_{\Omega}$  der drei Fabrikate in Abhängigkeit der Tempera-

tur angegeben. Hierzu wurde der Spannungsabfall der jeweiligen Zelle 1 ms nach Beginn des Strompulses gemessen.

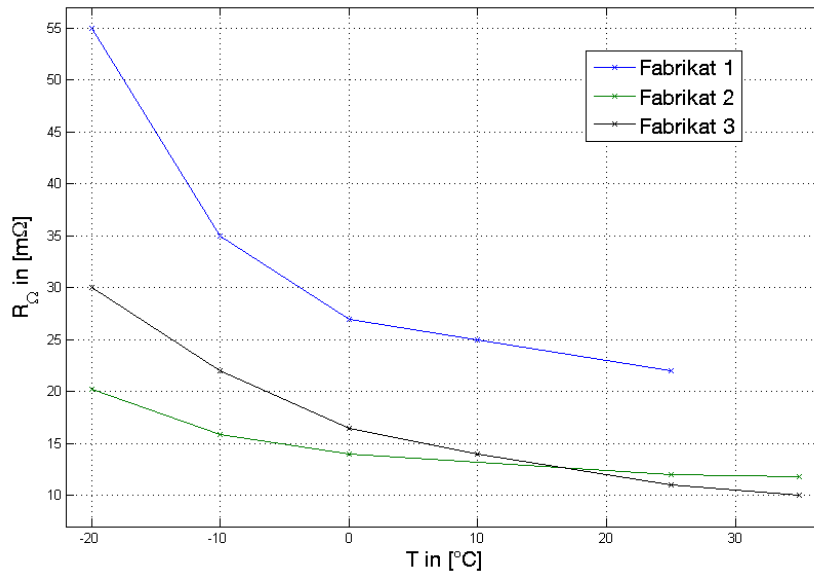


Abbildung 3: Vergleich der Temperaturabhängigkeit der ohmschen Innenwiderstände  $R_{\Omega}$  von drei LiFePO<sub>4</sub>-Zellen unterschiedlicher Hersteller

Fabrikat 1 weist mit Abstand den höchsten ohmschen Innenwiderstand auf. Bei Fabrikat 3 ist im Gegensatz zu Fabrikat 2 eine höhere Temperaturabhängigkeit des  $R_{\Omega}$  festzustellen. So weist Zelle 3 bei tiefen Temperaturen einen höheren und bei Raumtemperatur einen geringeren ohmschen Innenwiderstand als Zelle 2 auf.

Bei niedrigen Temperaturen erhöht sich vor allem der Widerstand der Zellen, der aufgrund des Ladungsdurchtritts an der Grenze von Elektrode und Elektrolyt auftritt [6]. In Abbildung 4 ist daher der Widerstand  $R_{DC,50ms}$ , welcher den Ladungsdurchtritt berücksichtigt, aufgetragen. Um den  $R_{DC,50ms}$  zu ermitteln, wurde der Spannungsabfall an den Klemmen der Zellen 50 ms nach Beginn des 25 A-Pulses gemessen.

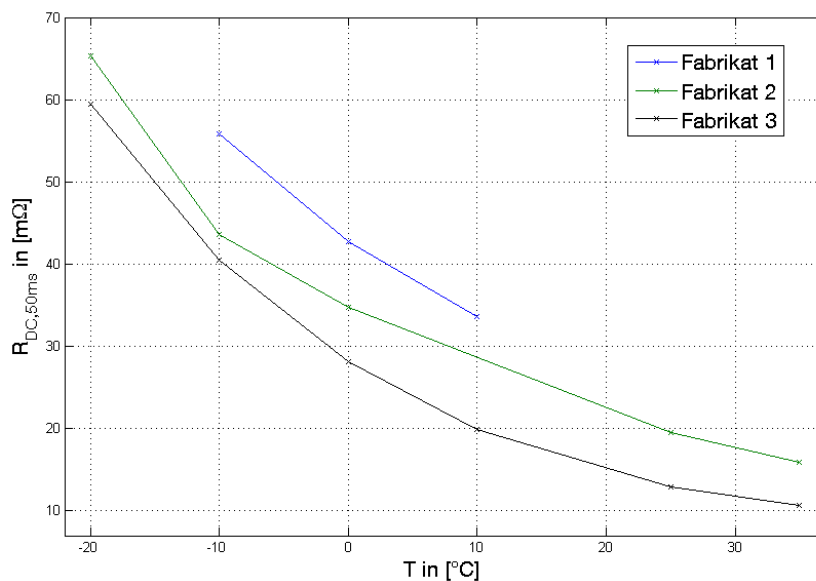


Abbildung 4: Vergleich der Temperaturabhängigkeit der DC-Widerstände  $R_{DC,50ms}$  von drei LiFePO<sub>4</sub>-Zellen unterschiedlicher Hersteller

Bei allen drei Fabrikaten handelt sich um ausgewiesene Hochleistungszellen (engl.: High Power, HP), weshalb der Innenwiderstand bei Raumtemperatur relativ niedrig ist. Bei Belastung der Zelle mit Strompulsen nimmt mit zunehmendem Innenwiderstand auch der Spannungsabfall über diesem zu bzw. die Klemmenspannung ab. Aus der in Abbildung 4 dargestellten Messung der DC-Widerstände kann erschlossen werden, dass 50 ms nach Beginn des Strompulses die Spannung an der Zelle 1 am tiefsten und an der Zelle 3 am wenigsten einbricht.

Die kleinste zulässige Klemmenspannung liegt laut den Datenblättern der drei Zellen bei 2 V. Zelle 1 unterschreitet dieses Minimum früher, da sie einen deutlich höheren  $R_{\Omega}$  und  $R_{DC,50ms}$  aufweist. Sie ist daher den Leistungsanforderungen der 12 V-Batterie am wenigsten gewachsen. Zelle 3 weist den niedrigsten  $R_{DC,50ms}$  auf und kann damit die Spannung des 12 V-Bordnetzes am besten stabilisieren. Daher wird sie für den Aufbau der Pufferbatterie verwendet. Bei dynamischeren Belastungen, also Strompulsen mit einer Dauer von nur wenigen ms, würde jedoch Zelle 2 die bessere Wahl darstellen.

Aus der minimalen Warnblinkdauer wurden der minimal nötige Energieinhalt und daraus die Notwendigkeit von vier parallelen Zellen abgeleitet. Bei vier parallelen Zellen und dem 150 A-Puls würde jede Zelle 37,5 A leisten können müssen. In Abbildung 5 ist für die Zelle 3 der Einbruch der Klemmenspannung nach 50 ms bei Belastung mit unterschiedlichen Stromstärken dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass bei einer Temperatur von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und bereits bei einer Belastung von 25 A die Klemmenspannung der Zelle die zulässige Entladeschlussspannung von 2 V unterschreitet. Gleichzeitig würde auch die Bordnetzspannung unter die geforderte Grenze von 8 V fallen. Werden jedoch acht Zellen parallel geschaltet, reduziert sich der Stromsprung auf 18,75 A pro Zelle. Laut Abbildung 5 wird damit die 8 V-Grenze bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  nicht unterschritten. Die Pufferbatterie wird aufgrund der Leistungsanforderungen bei niedrigen Temperaturen in 4s8p-Verschaltung realisiert.

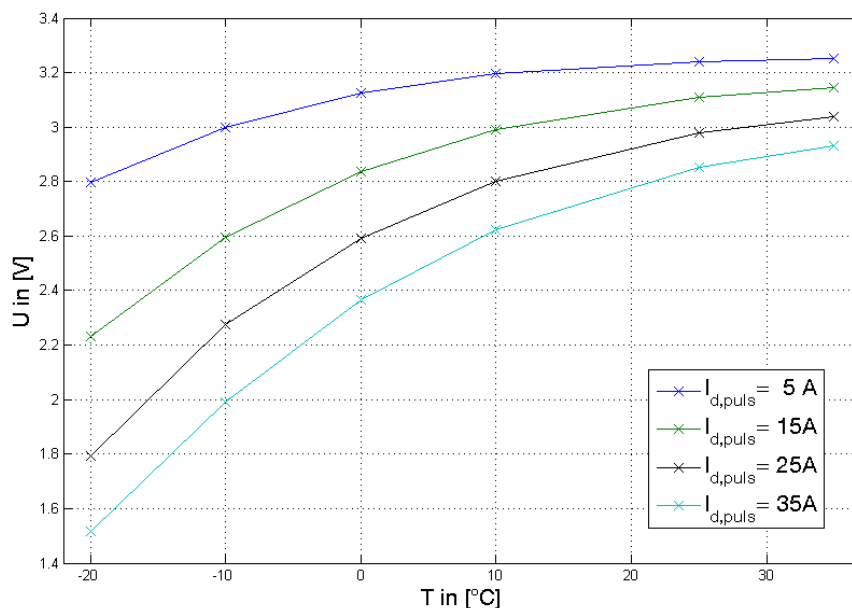


Abbildung 5: Klemmenspannungen der Zelle 3 für unterschiedlich starke Entladepulse mit einer Pulsdauer von 50 ms

### 3. Fertigung und Aufbau der Batterie

Nachdem die Zelle 3 ausgewählt und eine 4s8p-Verschaltung als sinnvoll eruiert wurde, werden nun die Fertigung und der Aufbau der Pufferbatterie beschrieben. Aus Gründen des beschränkten Bauraums wird eine separate Akkubox (s. Abbildung 6) mit den 32 LiFePO<sub>4</sub>-Zellen aufgebaut.

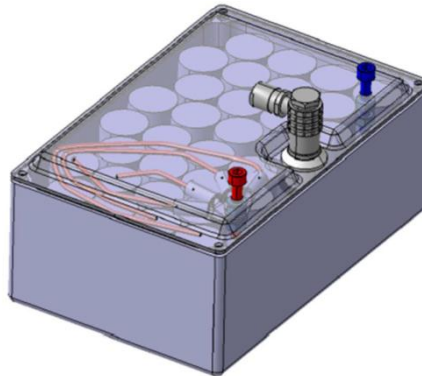


Abbildung 6: Anordnung der 32 Einzelzellen in der Akkubox

Die Zellen werden mittels 0,5 mm dicken vernickelten Stahlbändern kontaktiert. Dieses Material ist relativ einfach zu verarbeiten und kann unter anderem geschweißt oder gelötet werden. Der Nachteil einer Lötverbindung ist im Vergleich zum Punktschweißverfahren ihr deutlich höherer Wärmeeintrag in die Zelle. Abbildung 7 zeigt die Temperaturverteilung einer 26650-Zelle direkt nach der Kontaktierung mittels Lötens und nach der Kontaktierung durch das Punktschweißverfahren. In die Aufnahmen wurden auch die aufgetretenen Maximaltemperaturen eingetragen. Das Punktschweißen führt zu einer lokalen Erwärmung des kontaktierten Pols auf weniger als 30 °C, wohingegen das Anlöten eines Kontaktfähnchens zu einer Temperatur des Pols von über 90 °C führt. Im Datenblatt ist die maximal zulässige Temperatur der Zelle mit 60 °C angegeben.

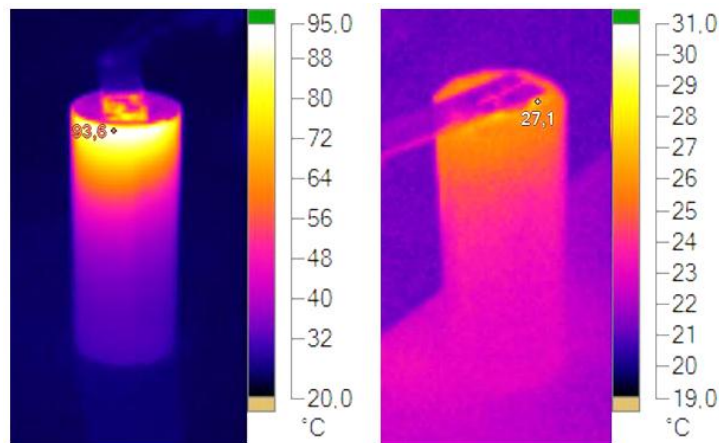


Abbildung 7: Erwärmung einer 26650-Zelle durch Anlöten (links) und Anschweißen (rechts) einer Kontaktfahne

Der Übergangswiderstand der durch die Schweißpunkte entsteht liegt im Bereich von unter 1 mΩ. Dadurch kann, auch bei Belastung der Zelle mit höheren Stromstärken, keine nennenswerte lokale Erwärmung des kontaktierten Pols beobachtet werden.

Wie bereits in Abschnitt 2 erörtert, weisen die verwendeten  $\text{LiFePO}_4$ -Zellen ein gewisses Maß an intrinsischer Sicherheit auf. Für den fehlerfreien und stabilen Betrieb ist es aber trotzdem notwendig, die Li-Ionen-Batterie mit einem BMS zu überwachen. Für die Pufferbatterie wurde ein digitales BMS mit dissipativem Ladungsausgleich entwickelt. Herzstück der BMS-Platine ist ein Mikrocontroller, auf welchem unter anderem die Sicherheitsfunktionen implementiert sind. Diese überwachen die Einzelzellspannungen, den Batteriestrom und die Temperatur. Für die Überwachung der Einzelzellspannungen wird je paralleler Verschaltung der Zellen eine Messleitung zur BMS-Platine geführt. Für die Überwachung von Strom und Temperatur werden ein Hallsensor und ein NTC-Sensor eingesetzt, welche ebenfalls ihre Werte an das BMS weiterleiten. Auf der BMS-Platine ist dem Mikrocontroller ein hochauflösender A/D-Wandler mit Multiplexer vorgeschaltet, welcher die analogen Spannungs-, Strom- und Temperaturwerte digitalisiert. Die Sicherheitsfunktionen basieren auf diesen Messgrößen.

Da das unbeabsichtigte Abschalten der 12 V-Batterie eine erhebliche Gefährdung des Fahrers und anderer Verkehrsteilnehmer darstellen kann, tolerieren die Sicherheitsfunktionen auftretende Fehler für eine gewisse Zeit und versuchen durch Abschalten nicht sicherheitskritischer Verbraucher die Pufferbatterie in einen sicheren Betriebszustand zurückzuführen

#### 4. Vergleich der Pb- mit der $\text{LiFePO}_4$ -Pufferbatterie

In den vorangehenden Abschnitten wurden die Entwicklung und der Aufbau der Pufferbatterie dargestellt. Diese Abschnitte haben bereits gezeigt, dass gerade durch die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen sowohl die Entwicklung als auch der Aufbau einer 12 V-Batterie auf Li-Ionen-Basis ein gewisses Mehr an Aufwand darstellen. Abschließend wird nun die entwickelte  $\text{LiFePO}_4$ -Batterie mit der konventionellen SLI-Batterie verglichen.

Im Gegensatz zur klassischen Pb-Starterbatterie benötigt eine Batterie aus Li-Ionen-Zellen eine wesentlich aufwendigere Peripherie, da das BMS die intelligente Überwachung der Einzelzellen garantieren soll. Damit steigt sowohl die Anzahl der Komponenten als auch ihre Komplexität. Die höhere Anzahl an Einzelteilen, aus denen die 12 V-Batterie aufgebaut ist, veranschaulicht Abbildung 8, in der alle notwendigen Einzelteile der  $\text{LiFePO}_4$ -Batterie der Bleibatterie gegenübergestellt werden. Komponenten die von beiden Batterietypen benötigt werden, sind nicht dargestellt. Alleine die 32 Einzelzellen elektrisch und mechanisch zu verbinden, bedarf vieler verschiedener Komponenten und eines gewissen Knowhows. Es sei darauf hingewiesen, dass die Abbildung die Komponenten lediglich in der Draufsicht darstellt. Da die Bleibatterie mit einer Höhe von 175 mm etwa 2,7 mal so hoch ist wie die 26650-Zellen, relativiert sich das Volumen.

Die höhere Komplexität der  $\text{LiFePO}_4$ -Batterie führt zum einen zu einer potentiell höheren Fehleranfälligkeit und zum anderen zu deutlich höheren Kosten. Alleine die 32 Li-Ionen-Zellen kosten mehr als doppelt so viel, wie die gesamte Bleibatterie. Der höhere Entwicklungs- und Fertigungsaufwand der  $\text{LiFePO}_4$ -Batterie führt zu einer weiteren Vergrößerung dieses Kostenunterschieds. Wird jedoch die gesamte Lebensdauer der Anwendung betrachtet, kann die höhere



Zyklusstabilität der  $\text{LiFePO}_4$ -Zellen gegenüber der Bleibatterie die höheren Anschaffungskosten wieder etwas wettmachen. Da gerade bei Elektrofahrzeugen aufgrund des fehlenden Startergenerators die 12 V-Batterie kleiner dimensioniert wird, ist die Zyklusstabilität im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ein wichtigeres Kriterium.



Abbildung 8: Vergleich der Komplexität einer Pb- mit einer  $\text{LiFePO}_4$ -Pufferbatterie

Die 32  $\text{LiFePO}_4$ -Zellen weisen zusammen ein Gewicht von 2,25 kg und eine spezifische Energie von 108 Wh/kg auf. Zählt man zur 12 V-Batterie auch die notwendige Peripherie, reduziert sich die spezifische Energie auf 57,13 Wh/kg. Nichtsdestotrotz konnte durch die Realisierung der Alternative auf Li-Ionen-Basis auf Systemebene eine Verdoppelung der spezifischen Energie gegenüber der Bleibatterie (32,6 Wh/kg) erreicht werden. Insgesamt ist dadurch im MUTE eine Gewichtseinsparung von 2,4 kg möglich, was bei einem Leergewicht des gesamten Fahrzeugs von 400 kg ein nicht zu vernachlässigender Anteil ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] MUTE - TUM ELECTRIC MOBILITY: Design. <http://www.mute-automobile.de/design.html>.  
- Aktualisierungsdatum: 27.11.2011
- [2] Norm ISO 26262: *Road vehicles - Functional safety*. International Organization for Standardization, Internationaler Standard, 2010.
- [3] Löw, P.; Pabst, R.; Petry, E.: *Funktionale Sicherheit in der Praxis: Anwendung von DIN EN 61508 und ISO/DIS 26262 bei der Entwicklung von Serienprodukten*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt Verlag, 2010.
- [4] Ceraolo, M.; Huria, T.; Pede, G.; Vellucci, F.: *Lithium-ion Starting-Lighting-Ignition Batteries: Examining the feasibility*. IEEE, 2011.
- [5] Weber, R.; Knobel, C.; Schneider, C.; Kohler, T.; Herzog, H.-G.: *Auslegung des 12V-Energiebordnetzes in batterie-elektrischen Fahrzeugen*. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen II*, 1. Aufl. Essen: expert Verlag, 2010.
- [6] Zhang, S.S.; Xu, K.; Jow, T.R.: *The low temperature performance of Li-ion batteries*. Journal of Power Sources, 2002.
- [7] Bäker, B.: *Energie- und Informationsmanagement für zukünftige Kfz-Bordnetze*. 4. Band. Aachen: Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag Aachen, 1998.
- [8] Roscher, M.: *Zustandserkennung von LiFePO<sub>4</sub>-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Aachen: Dissertation RWTH, 2010.
- [9] Jossen, A.: *Batteriespeichersysteme*. München: Vorlesungsunterlagen TUM, 2011.