



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 14.Juli 2011

ABLIM – Adaptive Battery Life Prediction Model

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Netze
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Kraftwerke Oberhasli AG
Grimselstrasse
CH-3860 Innertkirchen
www.kwo.ch

Berner Fachhochschule Technik und Informatik
Quellgasse 21
CH-2501 Biel-Bienne
www.ti.bfh.ch

Battery Consult Sagl
Villa Costa
CH-6839 Sagno
www.batteryconsult.ch

Autoren:

Max Ursin, KWO AG, max.ursin@kwo.ch
Stefan Schori, BFH, stefan.schori@bfh.ch
Cord Dustmann, BC, cord.dustmann@batteryconsult.ch

BFE-Bereichsleiter: Martin Pulfer

BFE-Programmleiter: Martin Pulfer

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153927 / 103023

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis (ALT+0)

(Die Verwendung eines Inhaltsverzeichnisses ist fakultativ)

Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt wird ein Lebensdauermodell für ZEBRA-Batterien entwickelt, das es erlaubt auf Grund eines Belastungsprofils (Zelltemperatur, Lade- und Entladestrom sowie Entladetiefe) die statistische Lebensdauer einer Batterie abzuschätzen. Das Lebensdauermodell wird auf Grund von Labordaten, von sogenannten Torkelmessungen an Elektroauto-Batterien und schliesslich mit einer statistischen Analyse von vielen Messdaten aus dem Betrieb von Elektroautos im Feld entwickelt. Eine detailliertere Beschreibung der Methodik findet sich im nächsten Kapitel.

Während der Dauer des Projektes vom 03. März 2009 bis zum heutigen Zeitpunkt stehen neun Zellmodulteststände für ZEBRA-Zellen in Betrieb, die neun Zellmodule à 10 ZEBRA-Zellen zeitlich parallel zyklieren. Trotz der langen Zeitdauer und den beschleunigten Tests im Labor ist es bis heute nur gelungen neun Zellmodule bis zur 90% und 80% Kapazitätsgrenze der Lebensdauer zu zyklieren. Eine erste Regressionsfunktion auf Basis der bisher vorliegenden Ergebnisse konnte berechnet werden. Mit weiteren Messpunkten im Laufe der Zeit wird die Regressionsfunktion präziser werden. Deshalb werden die Labortests auch nach dem Projektende weitergeführt.

Rund 45 Elektroautos (Twingo und Think) wurden mit CAN-Data Loggern ausgerüstet. Diese Autos fahren im Projekt „alpmobil“ und auch bei Unternehmen, die diese Autos in Dauermiete übernehmen. Die tatsächliche Alterung der Batterien wird einmal pro Jahr mit einer kontrollierten und gemessenen Komplettentladung „Torkeltest“ gemessen. Andererseits liefert jede Batterie pro Sekunde einmal einen gleichen Parametersatz wie im Labor. Damit wird ein Belastungsprofil jeder Batterie erstellt. Bisher konnte nur ein Bruchteil der Torkelmessungen durchgeführt werden. Bis August 2011 sollen dann alle 50 CAN-Data Logger eingebaut werden. Im Verlaufe des Sommers und Herbstes werden mit allen Autos Torkelmessungen durchgeführt.

Das Forschungsprojekt ist also noch nicht abgeschlossen, sondern braucht jetzt über Jahre regelmässige Messungen und Analysen der Daten. Die Resultate fliesen in die Berechnung der Mietpreise für die Batterievermietung ein und erlauben es der ese mobility management Genossenschaft mit einer statistisch korrekten Basis finanzielle Risiken der Batteriemiete zu managen.

Abstract

In this research project a mathematical life model for the ZEBRA battery is developed which allows predicting the statistical battery life based on load profiles (cell temperature, charge and discharge current and depth of discharge). The life model is developed using laboratory data, so called “torkel measurements” on vehicle batteries and the statistical analysis of real world operated electric vehicles in the field. A detailed description of the method is given in the next section.

Since the project was started March 03, 2009 until today the number of test benches was increased to 9 of which each has 10 ZEBRA cells connected in series. Until today 9 modules have reached their 90% and 80% capacity limit. A first regression function was developed using the data available up to now. The accuracy will be increased with the availability of more test points. For this reason the tests are continued after the end of this project.

About 45 electric vehicles (Twingo and Think) have been equipped with CAN data loggers. These vehicles are operated in the project “alpmobil” and by companies under a permanent rental agreement. The real aging of the batteries is checked once a year by a “torkel measurement”. In addition a battery data set equivalent to the one in the laboratory test is taken once per second and is used for the analysis of load profiles for each battery. Up to now only a few “torkel measurements” could be taken. Until August 2011 all 50 CAN data

Logger will be installed in the cars and the first round of “torkel measurements” will be finished by autumn.

This research project is not finished but need continuation of the measurement and analysis of the data. The results are used for the calculation of rental fees for the battery rental by ese mobility management Genossenschaft. They will allow to manage the financial risk of battery rental based on statistical correct data.

Resumé

Ausgangslage

Eine grosse Traktionsbatterie (>20 kWh) macht heute etwa die Hälfte des Preises eines Elektroautos aus, bei spezifischen Systemkosten von etwa CHF 650.- (ZEBRA Batterie) bis CHF 1'000.- pro kWh (Lithium-Batterie).

Die Abschreibungsdauer und der Restwert einer Elektroauto-Batterie, die eine Funktion der erwarteten Lebensdauer ist, beruht auf Grund der noch jungen Technologie und der geringen Verbreitung der Elektroautos weniger auf einer systematischen statistischen Analyse, als vielmehr auf extrapolierten Labormessungen und Expertenschätzungen. Wer aber die Lebensdauer von Batterien im täglichen Gebrauch in guter Annäherung kennt, kann technische und finanzielle Risiken, wie sie im Zusammenhang mit dem Kauf, der Vermietung sowie der Versicherung der Batterie entstehen, besser managen.

Batterien in Elektroautos sind Extremsituationen ausgeliefert. Beschleunigung und abrupte Rekuperation wechseln sich ab mit hohen Dauerbelastungen auf Bergstrecken und mittleren Belastungen auf Landstrassen. Labortests können reelle Batteriebelastungen oder Fahrsituationen nur bedingt simulieren. Auf Grund der Nachvollziehbarkeit wird ein künstlicher Fahrzyklus definiert, der aber nicht der Verschiedenartigkeit der Fahrstile und Topografien in der Realität entspricht.

Mit dieser angewandten Forschungsarbeit soll auf Grund systematischer Laborversuche und der Auswertung von Batteriedaten aus dem täglichen Gebrauch der Elektroautos ein „Lebensdauermodell“ geschaffen werden. Das Lebensdauermodell ermöglicht das Erkennen und Nachvollziehen der Alterung einer Batterie (Vergangenheit) und die Schätzung der verbleibenden Lebensdauer auf Grund eines Belastungsprofils (Zukunft). Die statistische Analyse aller im Gebrauch stehenden Batterien wird Aufschluss über die mittlere statistische Lebensdauer einer ZEBRA Batterie-Population geben. Das Modell wird in diesem Fall nur auf ZEBRA Batterien der FZ Sonick im Tessin angewandt, die gleiche Methodik kann aber auch für andere Batterietypen benutzt werden.

Das Lebensdauermodell beruht auf drei Pfeilern

1. Labormessungen von 10er Paketen ZEBRA Zellen, deren Ergebnisse mit einer Regressionsfunktion zusammengefasst werden (Die Methodik nennt sich „Design of experiments“)
2. 1 mal jährliche Messung der verbleibenden Kapazität der Batterien, die im alltäglichen Gebrauch stehen und ein gewisses Alter erreicht haben („Torkelmessung“)
3. Statistische Analyse der fortlaufenden Messungen der Batterien, die im täglichen Gebrauch stehen („CAN-Data Logger“ (CDL) Messungen)

Ad 1.) Im Labor werden Zellmodule bestehend aus 10 ZEBRA Zellen bei konstanter Temperatur, konstantem Ladestrom und konstantem Entladestrom sowie fixierter Entladetiefe so lange zyklisiert, bis das Zellmodul „tot“ ist, das heisst weder Energie aufnehmen noch abgeben kann. Es werden 27 Messpunkte mit jeweils neuen Zellmodulen bei anderer Temperatur, Strom und Entladetiefe wiederholt. Die Zyklenlebensdauer der 27 Zellmodule bildet eine „Punktwolke“, durch die eine 5 dimensionale Regressionsfunktion oder Regressionsoberfläche (Fläche mit der geringsten Abweichung von allen Punkten) gelegt werden kann. Diese Regressionsfunktion fasst alle Zellmodultests zusammen und zeigt für jeden Parametersatz die Laborlebensdauer der Zellmodule.

Ad 2.) Der „Gesundheitszustand“ einer Batterie, gemeint ist die verbleibende Kapazität, die eine Batterie noch aufnehmen kann, wird mit einer „Torkelmessung“ ermittelt. Die Batterie wird dabei von 100% Ladung mit konstantem Strom entladen. So kann die verbleibende Kapazität der Batterie mit der Nennkapazität einer neuen Batterie verglichen werden. Eine immer geringer werdende Kapazität und die Entwicklung der Kapazität über die Jahre zeigt die Alterung der Batterie an. Mit dem Lebensdauermodell kann eine Aussage über die

Zukunft der Batterie bei gleichbleibender Belastung gemacht werden.

Ad 3.) 45 Elektroautos mit ZEBRA-Batterien sind mittlerweile ausgerüstet mit CAN-Data Loggern, die jede Sekunde die Parameter Temperatur, Ladestrom Entladestrom sowie Entladetiefe auslesen. Die Daten (etwa 2 GB pro Batterie und Jahr) werden sortiert in einem mehrdimensionalen Histogramm. Für einen bestimmten Parameterbereich für die Temperatur, den Ladestrom, Entladestrom und die Entladetiefe wird die Anzahl Ereignisse gezählt. Diese Anzahl wird mit der Regressionsfunktion aus dem Labor multipliziert in der Annahme, dass jedes Ereignis Temperatur, Ladestrom Entladestrom sowie Entladetiefe einen infinitesimal kleinen Alterungsprozess bewirkt. Die Summe aller dieser Teilalterungen ist dann der Lebensdauerkonsum einer Batterie über eine gewisse Zeit.

Zum Schluss eines Messjahres werden die Torkelmessungen und die Feldmessungen verglichen und in Übereinstimmung gebracht, d.h. beide Messmethoden müssen zum gleichen Gesundheitszustand (= Alter) einer Batterie führen. Diese rechnerische Übereinstimmung wird erreicht mit der Variation des „Beschleunigungsfaktors“, das heisst einem Faktor, der ausdrückt, wieviel Mal schneller eine Batterie im beschleunigten Labortest altert als in der Realität.

Wenn der Beschleunigungsfaktor und die Regressionsfunktion bekannt sind, kann auf Grund der Feldmessungen (Batteriedaten und Torkelmessung) die Alterung jeder Batterie gleichen Typs eruiert werden. Die statistische Auswertung aller Batterien sollte dann zu einer mittleren statistischen Lebensdauer führen (Anzahl Vollzyklen, die eine Batterie im Schnitt aushält).

Damit wäre eine solide statistische Basis gelegt um für die Batterievermietung, Batteriefinanzierung und auch für weitere Nutzen wie „vehicle-to grid“ die Ausfallrisiken und den Alterungsverlauf der Batterien bei bestimmten Belastungsprofilen vorherzusagen. Im Falle eines second use der Batteriezellen, wie zum Beispiel für eine stationäre Anwendung, kann ein adäquates Belastungsprofil gewählt werden, das eine lange Lebensdauer verspricht und damit günstiges Speichervolumen für erneuerbare Energien zur Verfügung stellt.

Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Erstellung eines mathematischen Lebensdauer Modells, das die Vorhersage einer zu erwartenden Batterie Lebensdauer für beliebige Betriebszyklen erlaubt.

Methode

Es wird die Methode des „Design of Experiments“ (DOE) angewendet, bei der die für die Batterielebensdauer hauptsächlich relevanten Parameter im relevanten Bereich definiert und sinnvoll ausgewählt werden. Der Parameter „Lebensdauer“ wird als die messbare Groesse „Kapazitätsverlust je NPC“ und für die ausgewählten Parameterkombinationen gemessen, indem jeweils ein Modul bis zum Lebensdauerende mit nur und genau diesem Parametersatz betrieben wird. Das Verfahren ist weiter unten detailliert beschrieben für die Anwendung bei der Entwicklung eines Batterielebensdauermodells.

Ergebnisse

1 Modultests

1.1 Anforderungen

Während der Planungsphase wurde ein Anforderungsprofil (Tabelle 1) für die Testeinrichtung ausgearbeitet, das definiert, in welchem Rahmen die ZEBRA-Zellen (Abb.1) getestet werden sollen.

Anzahl ZEBRA-Zellen pro Modul	10 in Serie
Nennkapazität	38 Ah
Leerlaufspannung pro Zelle	2.58 V
Maximale Ladespannung	30.5 V
Maximaler Dauer-Ladestrom	50 A
Maximale Entladespannung	26 V
Maximaler Dauer-Entladestrom	100 A
Temperaturbereich	260 - 350 °C
Individuell steuerbare Heizkreise pro Modul	3
Kühlkreise pro Modul	1
Zellspannungsmessungen pro Modul	10 (differentiell)
Temperatursensoren (Pt100) pro Modul	8



Tabelle 1: Anforderungen an die Teststände

Abbildung 1: ZEBRA Zelle

1.2 Definitionen

Um dem Leser das Verständnis der Ergebnisse zu erleichtern, sind in der untenstehenden Tabelle 2 die wichtigsten Begriffe erklärt.

Begriff	Erklärung
Nennzyklen, NPC	38 Ah umgesetzte Kapazität entsprechen einem Nennzyklus
U_{bat} [V]	Batteriespannung (Modulspannung)
I_{bat} [A]	Batteriestrom (Modulstrom)
$I_c = I_{ch}$ [A]	Ladestrom des Moduls
R_{i_mean} [mΩ]	Mittelwert der Zell-Innenwiderstände eines Moduls
T_m [°C]	Mittelwert der Temperaturmessungen in einem Modul
DOD (Depth of Discharge) [%]	Entladetiefe des Moduls
CAN (Controller Area Network)	Seriellles Bussystem

Tabelle 2: Definitionen

1.3 Standorte / Zusammenarbeit BFH-TI, BC, KWO und ABB

Die Prüfstände sind eine Eigenentwicklung der BFH-TI und von Battery Consult. Das in Battery Consult verfügbare Fachwissen über die ZEBRA-Technologie führte an der Berner Fachhochschule zur Entwicklung des ersten Prüfstands (Abb.2). Sowohl Hardware wie auch Software für den Test von zehn in Serie geschalteten ZEBRA-Zellen (Abb.3) sind eine Eigenentwicklung, womit ein optimaler Betrieb der Testmodule ermöglicht wird. Änderungswünsche im Testablauf können innert kürzester Zeit realisiert werden.

Auf der Basis des Prüfstands an der BFH-TI und durch die Förderung durch das BFE war es möglich, vier weitere Testeinrichtungen gemeinsam mit KWO zu realisieren (Abb.4). Unter der Organisation von Max Ursin haben Mitarbeitende der BFH-TI und KWO gemeinsam diese Prüfstände aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Betreuung der Prüfstände geschieht mit Hilfe der eingerichteten Fernwartung von Biel (BFH-TI) aus, was ein zentrales Sammeln und Analysieren der Daten erlaubt.



Abbildung 2: Prüfstand an der BFH-TI, der auch als Prototyp diente



Abbildung 3: Zehn in Serie geschaltete ZEBRA-Zellen mit Potentialabgriffen



Abbildung 4: Die vier Prüfstände bei KWO sind seit Februar 2010 in Betrieb

Mit der Bestellung von vier weiteren Prüfständen trat im Januar 2010 auch ABB dem Projekt bei. Innerhalb von fünf Monaten wurden diese vier neuen Testeinheiten an der BFH-TI analog der bereits bestehenden geplant, aufgebaut und schliesslich an das ABB Forschungszentrum in Dättwil ausgeliefert (Abb. 5).



Abbildung 5: Vier zusätzliche Prüfstände bei ABB beschleunigten die Datenerfassung markant

Jeden Monat findet unter den Projektpartnern eine Konferenz zur Analyse der aktuellsten Resultate statt. Dies hat im Laufe des Projekts stets zu fruchtbaren Gesprächen und zahlreichen Erkenntnissen und wichtigen Verbesserungen des Testablaufs geführt.

Die Prüfstände wurden gemäss folgender zeitlichen Reihenfolge in Betrieb genommen und testen seither die Module automatisch 24/7 :

- BFH-Prüfstand: Juli 2009
- KWO-Prüfstände: Februar 2010
- ABB-Prüfstände: Mai 2010

1.4 Entwicklung der Prüfstände

In diesem Abschnitt sind die wichtigsten der bis heute andauernden Weiterentwicklungen der Prüfstände chronologisch aufgeführt:

Januar bis Dezember 2008

BFH-Prüfstand

- Entwicklung des Teststands.
- Auswahl und Bestellung der Elemente.
- Aufbau der Mess- und Steuerhardware.
- Zusammenbau Batteriebox mit 10 ZEBRA-Zellen. Die Box beinhaltet Anschlüsse zur Messung aller Zellspannungen und acht Temperaturen sowie Stecker für zwei Heizelemente und einen Lüfter.
- Verkabelung aller Elemente (Batteriebox, Mess- und Steuerhardware, Last, Speisung, PC).
- Erstes Laden der Zellen. Der Versuch zeigt, dass die Temperaturverteilung in der Box zu heterogen ist. Deshalb muss ein neues Heizkonzept entwickelt werden.
- Entwicklung des neuen Heizkonzepts: Zusätzlich zu den bereits vorhandenen Heizflächen, die oberhalb der Zellen und den Zuleitungen platziert sind, werden zwei weitere Heizflächen integriert, welche die Zellen auch von den Seiten heizen.

Software-Entwicklung

- Erstellen der Software in LabView vorerst ohne automatischen Betrieb.
- Gestaltung einer benutzerfreundlichen Bedienoberfläche in LabView (Abb. 6).

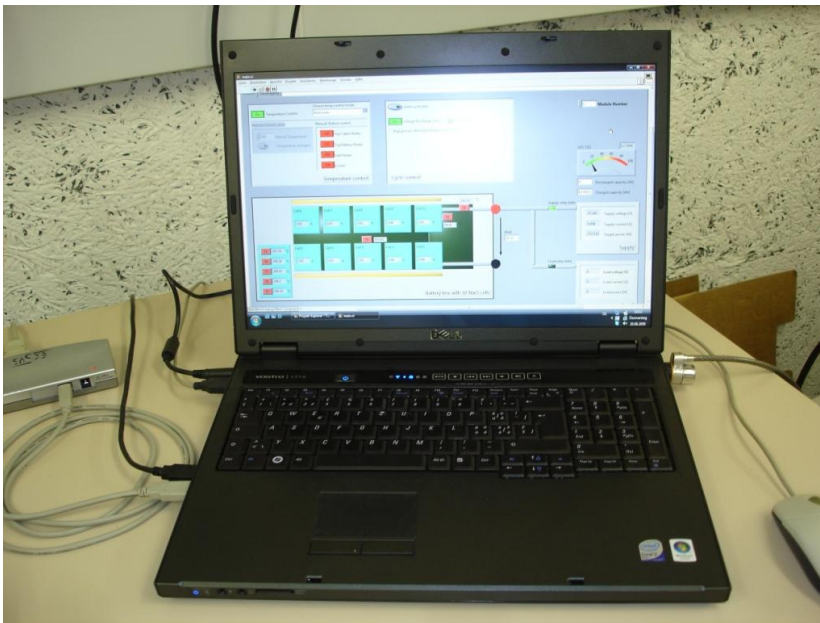


Abbildung 6: Die Steuerung über die selbst entwickelte Benutzeroberfläche ist kinderleicht

Januar bis Dezember 2009

BFH-Prüfstand

- Umbau der Batteriebox entsprechend dem neuen Heizkonzept. Darin enthalten ist auch ein neues Konzept zur Platzierung der Temperatursensoren.
- Für das neue Heizkonzept wird die Ansteuerung der Heizer komplett neu gestaltet, was den Bau eines Ansteuerprints mit MOSFETs zur Folge hat. Das Schalten der MOSFETs geschieht über Digitalausgänge.
- Test des neuen Heizkonzepts mit dem Resultat, dass sich die Temperaturverteilung innerhalb der Batteriebox stark verbessert hat und die Homogenität der Temperatur von besser $\pm 1\text{K}$ für unsere Zyklientests mehr als ausreichend ist.

- Aufbau eines Relaisprints, mit dem die Sensorleitungen der Spannungsmessung unterbrochen werden können. Dies ist nötig, weil bereits eine kleine Belastung die ZEBRA-Zellen im kalten Zustand ($T < \text{ca. } 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$) beschädigen kann. Der Print unterbricht die Sensorleitungen bei einer zu tiefen Batterietemperatur, damit diese nicht mehr mit dem Messmodul verbunden und somit unbelastet sind.

Software-Entwicklung

- Programmierung des automatischen (unbewachten) Betriebs. Dies beinhaltet im Wesentlichen drei verschiedene Zyklen:
 - 1) Konditionierungszyklus, der nur zu Beginn zehnmal durchgearbeitet wird.
 - 2) Beschleunigter Zyklus: Mit diesem Zyklus werden die Zellen bis zu ihrem Lebensende betrieben.
 - 3) Charakterisierungszyklus, um den aktuellen Zustand der Zellen zu eruieren. Durchführung jeweils nach hundert Nennzyklen.
- Anpassung der Bedienoberfläche in LabView zur sauberen Bedienung des automatischen Betriebs.
- Beginn des automatischen Betriebs mit paralleler Kontrolle und Anpassung der drei verschiedenen Zykrentypen.

KWO-Prüfstände

- Planung und Start des Aufbaus von vier Prüfständen für KWO (Abb. 7)



Abbildung 7: Aufbau der Prüfstände bei KWO (Reto Zesiger, BFH und Heinz Heim, KWO)

Januar bis Dezember 2010

KWO-Prüfstände

- Abschluss des Aufbaus und Inbetriebnahme der vier KWO-Prüfstände.
- Einrichten einer Fernüberwachung der KWO-Prüfstände und auch des BFH-Prüfstands.

ABB-Prüfstände

- Planung und Aufbau der vier ABB-Prüfstände (Abb.5+8)
- Inbetriebnahme der ABB-Prüfstände mit anschliessendem Transport nach Dättwil.

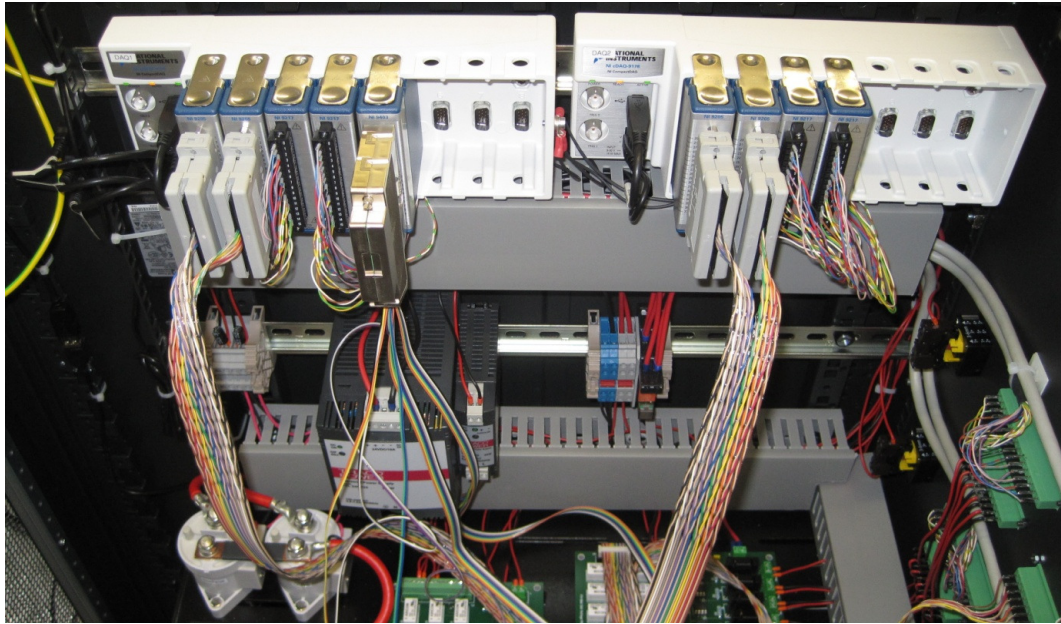


Abbildung 8: Blick in den ABB-Prüfstand

Software-Entwicklung

- Erstes grosses Software-Update: Geladen wird nun im CC-CV-Modus (**C**onstant **C**urrent, **C**onstant **V**oltage), zuvor nur mit CC. Dadurch kann mehr Kapazität geladen und die gewünschte Entladetiefe (DOD) erreicht werden, was zuvor teilweise nicht möglich war.
- Zweites grosses Software-Update: Ein Modul kann jetzt auch betrieben werden, wenn einzelne Zellen ausfallen. Somit könnte das Modul theoretisch solange getestet werden, bis überhaupt keine Zelle mehr funktioniert. Bei Modul 1 war wegen einer defekten Zelle noch ein kompletter Modulwechsel nötig, was in Zukunft nicht mehr der Fall sein wird.

Januar bis April 2011

Modultests

- Module in Betrieb: 8 (4 bei ABB, 3 bei KWO, 1 bei BFH). Zusätzlich ein Testmodul bei KWO, das für diverse Tests sowie zur Kontrolle von neuer Software verwendet wird.
- 8 Module haben die 80 % Kapazitätsgrenze (Grenze für Fahrzeugbetrieb) unterschritten. Somit war es möglich, ein erstes Lebensdauermodell zu entwickeln.
- 3 sich im Test befindende Module besitzen noch eine Kapazität, die höher als 80 % ist.

1.5 Erklärung Testprozedur

Zyklen-Übersicht

Um möglichst viele Resultate in kürzester Zeit zu erhalten, werden die Testmodule ununterbrochen geladen und entladen. Die folgenden vier Zyklentypen sind zu unterscheiden:

- 1) Erste Ladung: Die neuere Generation von Modulen wurde von FZ SONICK ungeladen versandt. Dadurch war es nötig, die erste Ladung auf den Prüfständen vorzunehmen. Entsprechend den Anweisungen von FZ SONICK ist nun ein solcher Ladevorgang in die Software integriert worden.
- 2) Konditionierungszyklus, der nur zu Beginn zehnmal durchgeführt wird, um die Zellen zu konditionieren.
- 3) Beschleunigter Zyklus: Mit diesem Zyklus werden die Zellen bis zu ihrem Lebensende betrieben.
- 4) Charakterisierungszyklus, um den aktuellen Zustand der Zellen zu eruieren. Durchführung jeweils nach hundert Nennzyklen.

Beschleunigter Zyklus

Das Testmodul wird ein Batterieleben lang mit immer mit den gleichen Parametern betrieben, die da sind:

- Temperatur
- Entladetiefe
- Ladestrom
- Entladestrom

Dieser Zyklus heisst «Beschleunigter Zyklus» und funktioniert folgendermassen:

Nachdem zu Beginn des Projektes die Ladung nur aus einer Konstantstromphase bestand, um Zeit zu sparen, so wurde dies nach diversen Analysen geändert. Nun wird ein Modul zuerst mittels eines konstanten Stroms geladen, bis eine bestimmte Spannungsgrenze erreicht ist (Punkt A in Abb. 9). Die Spannung wird ab diesem Zeitpunkt konstant gehalten, worauf in der Folge der Strom sinkt. Das Ende der Ladung (Punkt B in Abb. 9) ist entweder beim Unterschreiten eines definierten Stromwerts oder beim Erreichen des gewünschten Ladezustands erreicht.

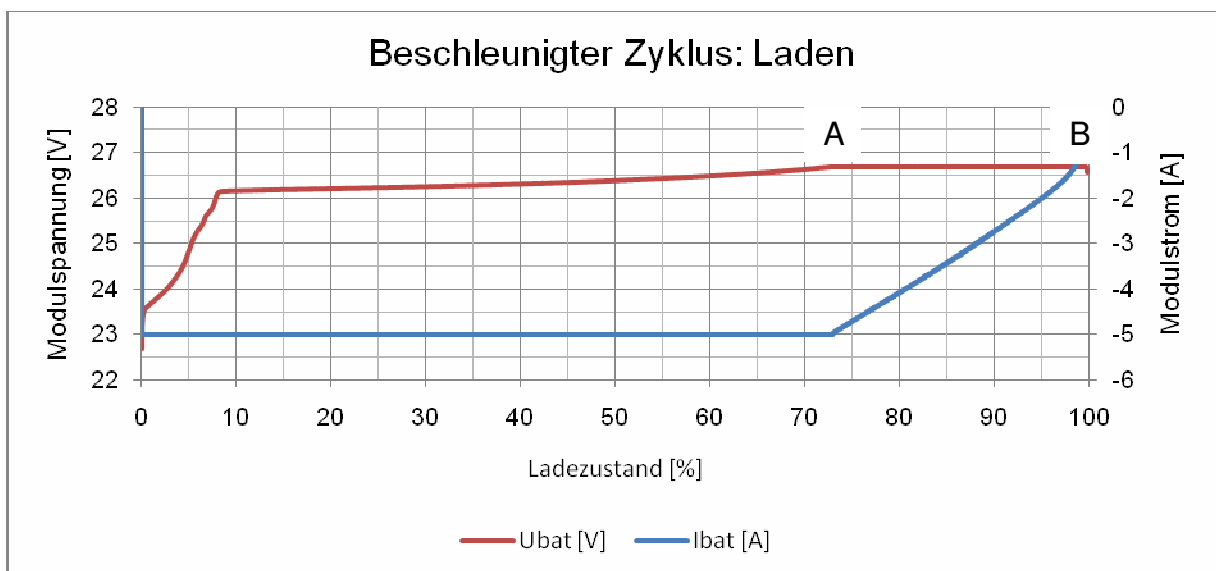


Abbildung 9: Ladekurven mit 5 A maximalem Ladestrom und 26.7 V maximaler Ladespannung

Beim Entladen (Abb. 10) fließt über die gesamte Dauer ein konstanter Strom. Falls die Spannung zu tief ist oder die erforderte Entladetiefe erreicht ist, stoppt die Entladung.

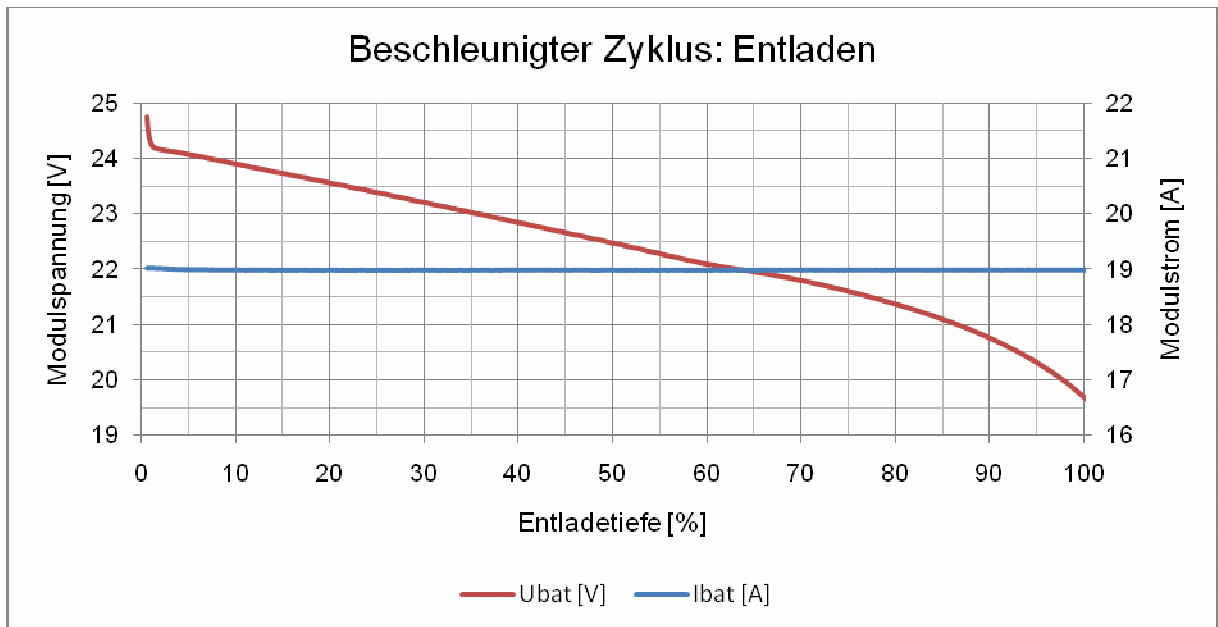


Abbildung 10: Strom- und Spannungskurven bei 19 A Entladestrom

Während der beschleunigten Zyklen wird fortlaufend die umgesetzte Kapazität integriert, damit die Software erkennen kann, wann wieder ein Charakterisierungszyklus durchgeführt werden muss.

Charakterisierungszyklus

Um die noch verbleibende Kapazität eines Moduls zu messen, wird dieses periodisch nach 100 Nennzyklen charakterisiert. Dazu wird das Modul zuerst vollgeladen und danach mit einem konstanten Strom entladen sowie zwischendurch mit Leistungsspitzen belastet (Abb.11). Die dabei entladene Kapazität und der Widerstandsverlauf geben Rückschlüsse auf die Alterung der ZEBRA-Zellen.

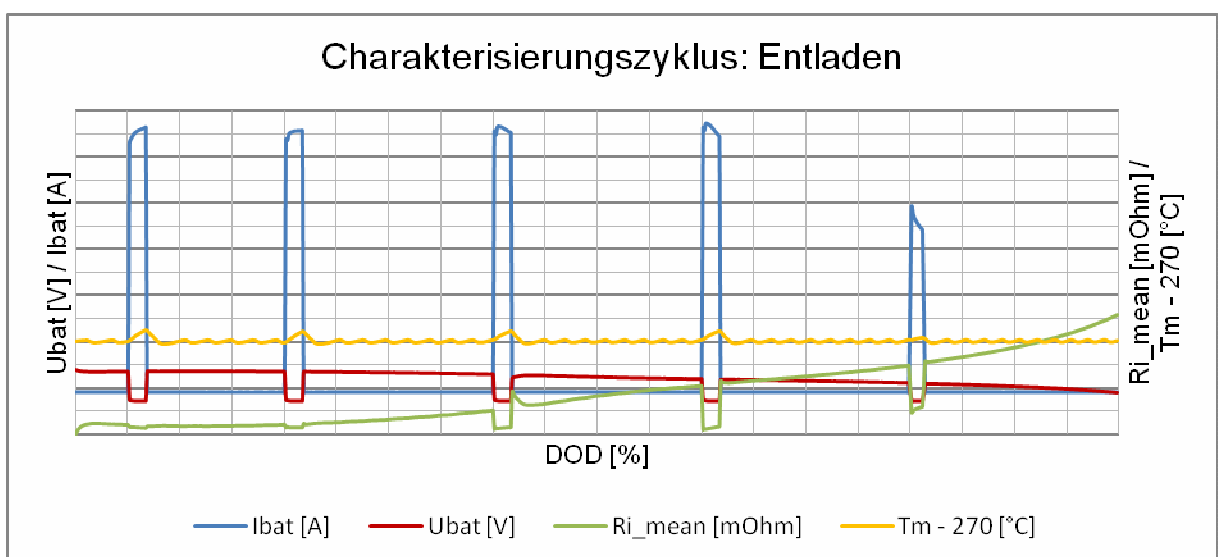


Abbildung 11: Entladen des Charakterisierungszyklus mit Leistungsspitzen

Durch den Vergleich der Innenwiderstandskurven von aufeinanderfolgenden Charakterisierungen kann die Alterung des Moduls beobachtet werden (Abb. 12). Je höher der Innenwiderstand, desto weniger leistungsfähig ist die Batterie.

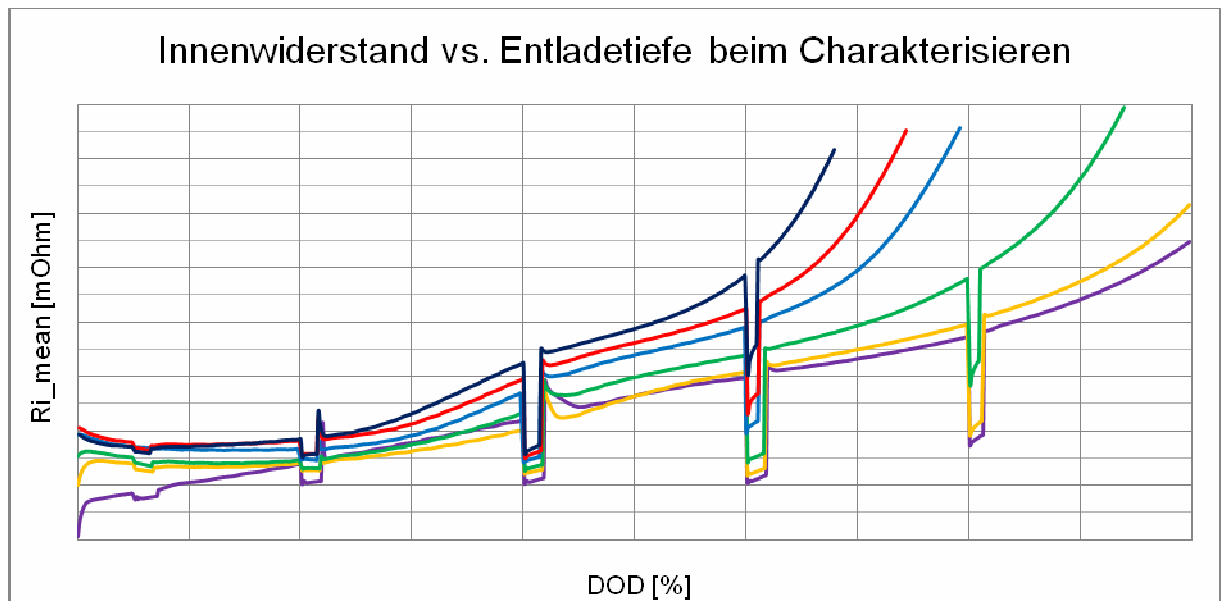


Abbildung 12: Vergleich von Charakterisierungszyklen

Mit steigender Zyklenzahl sinkt die verfügbare Kapazität des Moduls. Dieser Verlauf lässt sich darstellen indem die gemessenen Kapazitäten von jedem Charakterisierungszyklus über der Zyklenzahl aufgetragen werden (Abb.13).

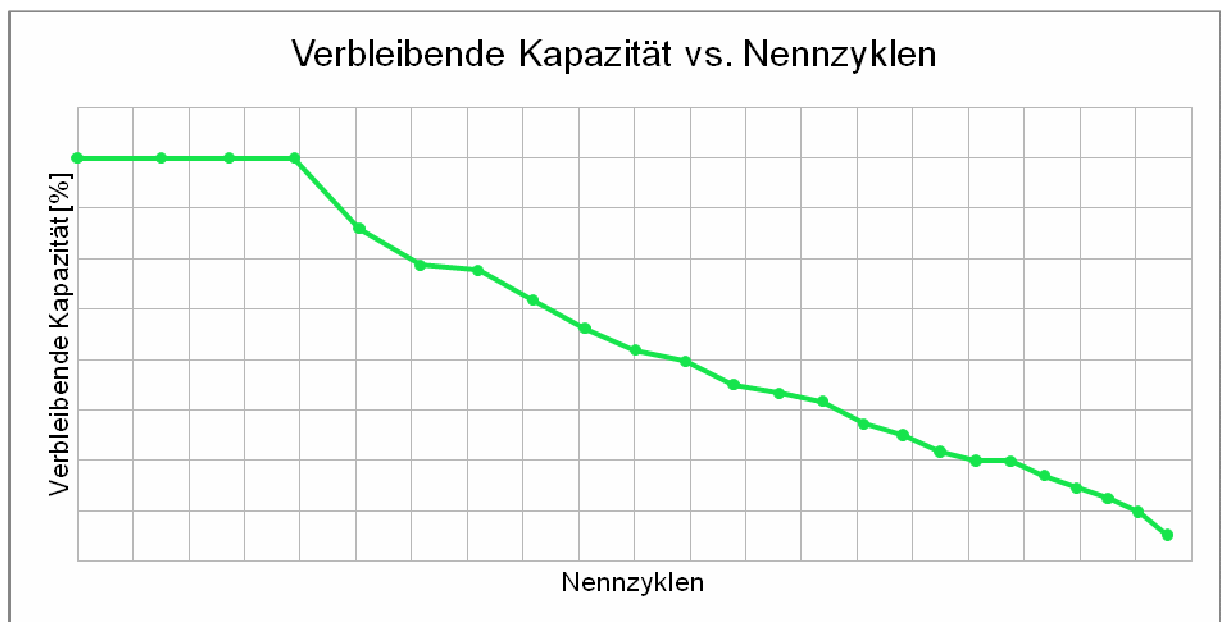


Abbildung 13: Kapazitätsverlust eines Moduls mit zunehmender Anzahl Nennzyklen

Betrieb mit Ausfall von ZEBRA-Zellen

Nachdem beim ersten Testmodul eine Zelle ausfiel und aufgrund dessen alle Zellen gewechselt werden mussten, entschlossen sich die Projektpartner, die Software so anzupassen, dass auch ein Betrieb mit ausgefallenen ZEBRA-Zellen möglich ist. Das Diagramm Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt beim Laden eines Moduls mit einem sehr strengen Testprogramm. Nur noch vier Zellen funktionieren, sechs haben bereits einen Keramikriss erlitten. Hier zeigt sich der Vorteil dieser Technologie, dass die ZEBRA-Zellen in diesem Fall niederohmig (hier: ca. 13 mOhm) ausfallen. Somit kann die Batterie weiter eingesetzt werden.

Alle defekten Zellen weisen eine Spannung im Bereich von 0.2 bis 0.4 V auf, wogegen die Spannungen der intakten Zellen im für diesen Test eingestellten Bereich von 2.9 bis 3 V liegen.

Mit dieser Software ist es also nicht nötig, wegen einer ausgefallenen Zelle das gesamte Modul zu wechseln. Dies verbessert die Testmöglichkeiten enorm und verhindert, dass ein Test wegen eines Defekts komplett wiederholt werden muss.

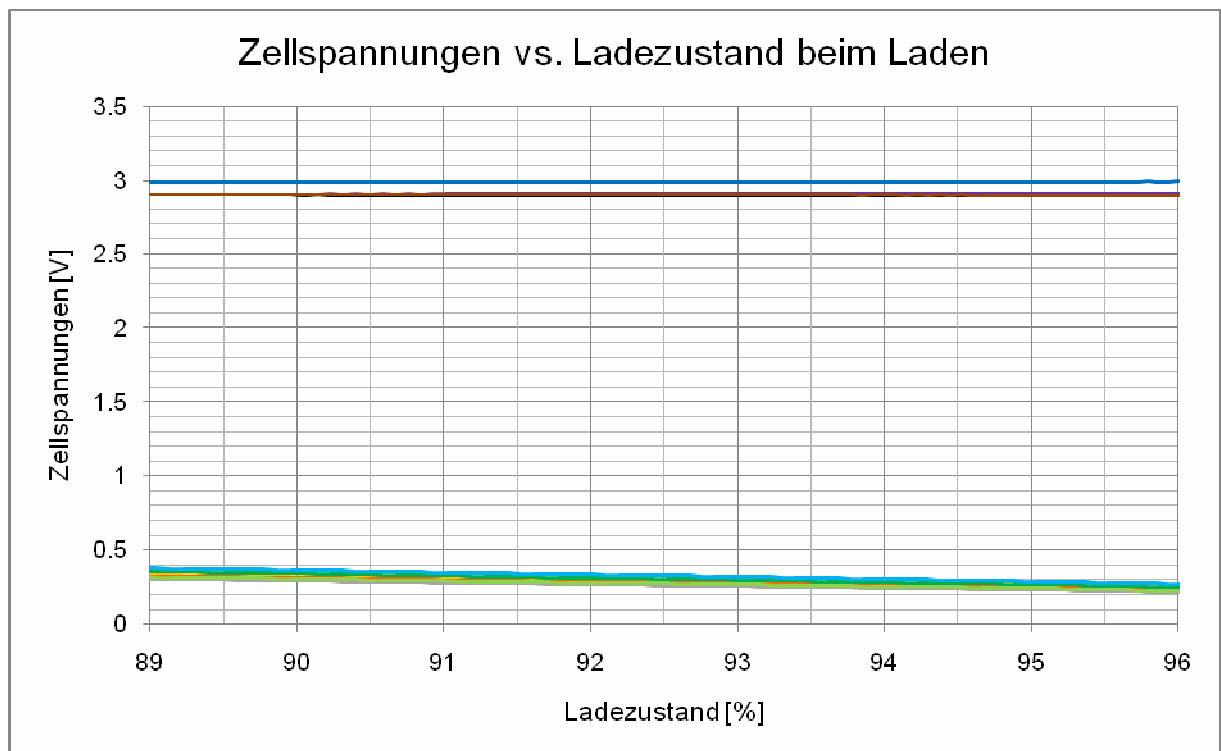


Abbildung 14: Betrieb eines Moduls mit sechs defekten ZEBRA-Zellen

2 CAN-Datenlogger

2.1 Der Grundgedanke

Während der Betrieb der Module auf den Prüfständen genau definierte Betriebsparameter erlaubt, ist im Gegensatz dazu das Nutzungsspektrum einer realen Fahrzeugbatterie sehr unterschiedlich. Die Art der Belastung und auch deren Dauer hängt stark vom jeweiligen Lenker und dem befahrenen Gelände ab.

Um also die Resultate aus den Modultests in der Realität verwenden zu können, ist zusätzlich ein Erfassen des Kapazitätsverlusts von möglichst vielen E-Fahrzeugbatterien nötig. Dazu sind (und werden noch) in mehreren Autos CAN-Datenlogger installiert, die fortlaufend die Belastung der Batterie aufzeichnen. Mit der alle paar Monate stattfindenden Kapazitätsüberprüfung der Batterie ist es möglich, die Lebensdauer in Abhängigkeit der Betriebsparameter zu ermitteln.

Mit den gewonnenen Ergebnissen aus den Elektrofahrzeugen ist ein Kalibrieren der Transferfunktion, welche aus den Modultests entstanden ist, möglich. Die wichtigsten Schritte bei der Entwicklung des Lebensdauermodells sind in Abbildung 15 dargestellt.

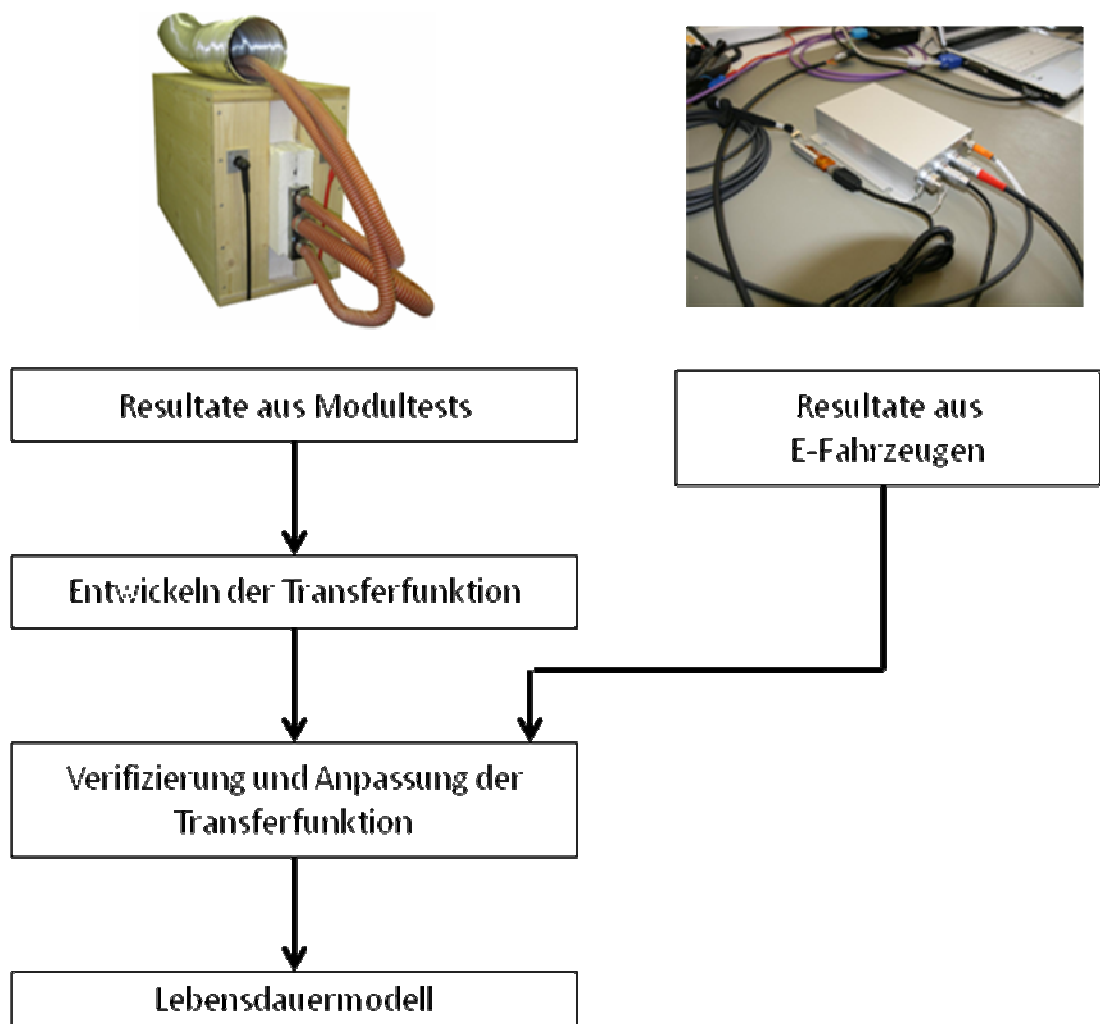


Abbildung 15: Vorgehensweise beim Entwickeln des Lebensdauermodells

2.2 Einbau

Ende 2009 wurden fünf CAN-Datenlogger unter der Regie der Berner Fachhochschule in Elektrofahrzeuge der Firma Mobility Solutions eingebaut. Diese Geräte sind eine Entwicklung der BFH-TI und erlauben nebst dem Abspeichern der CAN-Daten auch ein Aufzeichnen der Fahrroute mittels GPS.



Abbildung 16: CAN-Datenlogger der Berner Fachhochschule

Da der Logger der Berner Fachhochschule kein kommerziell erhältliches Produkt ist, wurde in der Folge mit der Firma SMART Electronic Development GmbH ein kompetenter Partner zur Entwicklung eines Datenloggers für weitere Elektrofahrzeuge gefunden. Im September 2010 bestellte KWO 50 Datenlogger, die Anfang 2011 ausgeliefert wurden.

Dieses Gerät wurde bereits mit Blick auf das Projekt «Swiss to Grid» und das Geschäft der ese Batterie-Vermietgenossenschaft entwickelt. Denn es erfüllt mehrere Funktionen:

- Sammeln der CAN-Daten für das ABLiM-Projekt
- Sammeln von Mietdaten für ese (Beispiel: Wann wird geladen/entladen)
- Integration des «Swiss to Grid»-Algorithmus (Messen der Netz- und Batteriedaten)

Im Gegensatz zum Logger der BFH-TI besitzt diese neue Version kein GPS, was aufgrund anderer Zielsetzungen nicht nötig ist.

Mittlerweile haben Mitarbeiter von KWO etwa 45 Logger in Elektrofahrzeuge der Marken THINK, Twingo und Fiat Panda eingebaut. Sobald weitere Elektroautos zur Verfügung stehen, werden auch die verbleibenden Geräte zur Datenerfassung montiert.

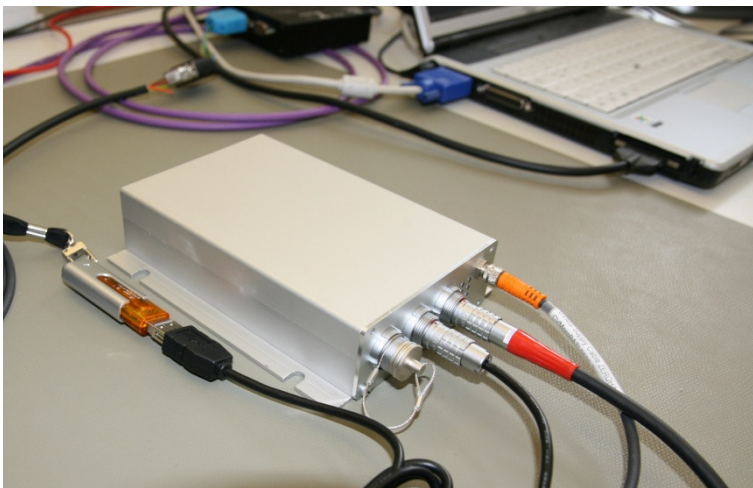


Abbildung 17: Prototyp des neuen Datenloggers der SMART Electronic Development GmbH

3.2.3 Kapazitätsmessung an der Fahrzeugbatterie

Um die verbleibende Batteriekapazität zu messen, war die Anschaffung einer mobilen Last nötig. Damit ist es möglich, die vollgeladene Autobatterie während rund zwei Stunden mit einem konstanten Strom von 38 A zu entladen. Dabei kann die noch verfügbare Kapazität und der Verlauf des Innenwiderstands der Batterie erfasst werden.

Jedes Fahrzeug wird halbjährlich oder öfter auf die noch vorhandene Kapazität überprüft. Fachpersonal der KWO und der BFH-TI messen die Batterie direkt beim Kunden oder im KWO-Werkhof in Innertkirchen aus.



Abbildung 18: Bestimmung der Restkapazität einer Fahrzeugbatterie mit der elektronischen Last im Vordergrund

Da die ZEBRA-Batterie praktisch über den gesamten Betriebsbereich eine konstante Leerlaufspannung (2.58 V pro Zelle) aufweist, ist eine einfache Berechnung des Innenwiderstands mittels der gemessenen Batteriespannung und des Stroms möglich.

Im Diagramm Abbildung 19 zeigt die rote Kurve den gemessenen Innenwiderstand gegenüber der Entladetiefe bei der Entladung mit konstantem Strom. Es gilt zu beachten, dass die Temperatur während dieses Prozesses nicht konstant ist, da sich die Zellen im Betrieb erwärmen und in der Folge auch durch die Luftkühlung gekühlt werden. Deshalb wird die gemessene Kurve auf eine Temperatur von 300 °C normiert, was die blaue Kurve ergibt, bei der (theoretisch) über den gesamten Bereich eine konstante Temperatur vorherrscht.

Aus Garantiegründen darf die Batterie nur bis zu einer Entladetiefe von 80 % (Ladezustand = 20 %) entladen werden, weshalb für die weitere Auswertung eine mathematische Extrapolation der normierten Kurve (grüne Linie) vorgenommen wird.

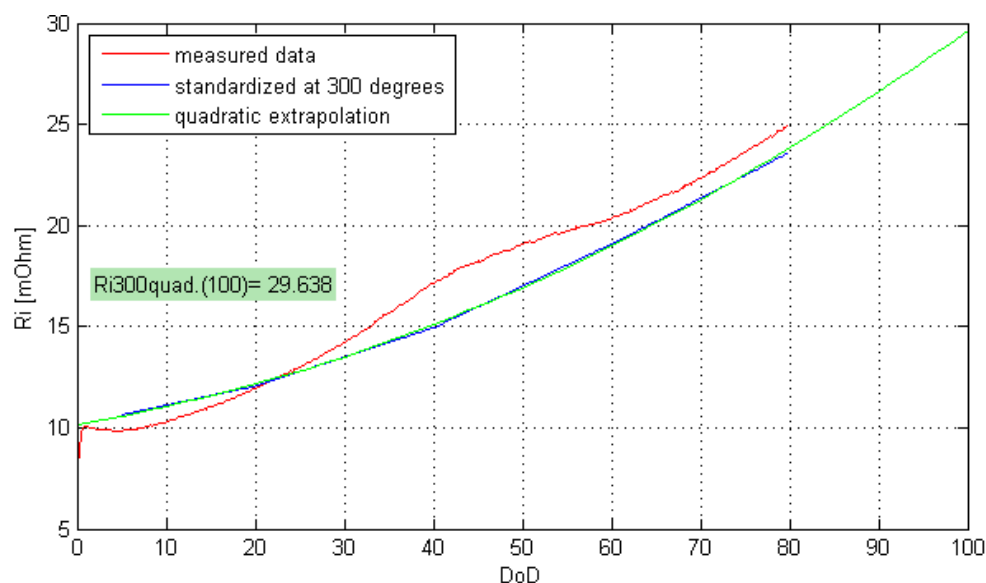


Abbildung 19: Innenwiderstandsverlauf während der charakterisierenden Entladung

2.4 Datenbank

Die Firma ese hat den Aufbau einer Datenbank begonnen, die in Zukunft das Abspeichern aller aufgezeichneten Daten sowie deren automatische Auswertung zur Integration in das Lebensdauermodell erlaubt. ese kann folglich die Datenbank auch dazu nutzen, alle Daten der von ihr vermieteten Batterien zu sichern und analysieren. Die Resultate kann ese in etwaige Anpassungen der Vermietbedingungen einfließen lassen.

Wie erwähnt befindet sich die Datenbank und auch die Analyse der Daten noch in der Entwicklung, weshalb bis zum heutigen Zeitpunkt keine Fahrzeugdaten zur Validierung des Lebensdauermodells miteinbezogen werden konnten.

3. Das Lebensdauermodell

3.1 Design of Experiments (DOE)

Als Vorbereitung der Modultests wurde eine statistische Versuchsplanung (Englisch: **Design Of Experiments** = DOE) aufgestellt. Dabei wird in der Testreihe jeweils nicht nur einer, sondern werden mehrere Parameter variiert.

Als wesentliche Einflussfaktoren auf die Batteriebensdauer gelten bei den Modultests folgende:

- Temperatur
- Entladetiefe
- Ladestrom
- Entladestrom

Um die Testreihe für ein erstes Modell auf eine gewisse Grösse zu begrenzen, wird zunächst auf eine Variation des Entladestroms verzichtet. Für die anderen drei Faktoren werden jeweils drei mögliche Stufen definiert, was insgesamt zu $3^3 = 27$ mögliche Parameterkonfigurationen im Versuchsplan führen würde.

Um Zeit und Aufwand zu sparen, wird der Versuchsplan zunächst durch einen Teilfaktorplan mit $3^{3-1} = 9$ möglichen Kombinationen ersetzt. Damit ist es möglich, bereits mit weniger Versuchen den Einfluss der Parameter zu bestimmen.

In der Abbildung 20 sind die ausgewählten (grün) und nicht ausgewählten (rot) Parameterkombinationen dargestellt.

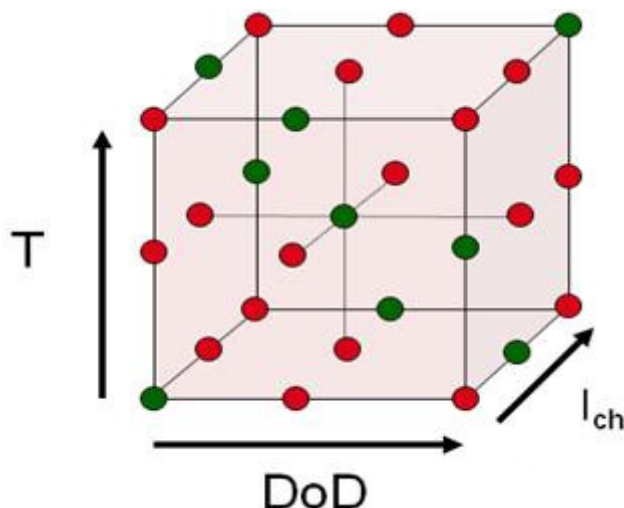


Abbildung 20: 3D-Darstellung der möglichen und ausgewählten (grün) Parametersätzen für den Test

In einem nächsten Schritt ist auch die Variation des Entladestroms geplant. Dadurch erhöht sich die Anzahl von möglichen Kombinationen ($3^4 = 81$) und folglich auch die benötigte Anzahl Tests im Teilfaktorplan (Teilfaktoriell $3^{4-1} = 27$), um ein Modell mit zuverlässiger Aussage zu erhalten. Dementsprechend werden die Messungen fortgesetzt.

3.2 Aktuelles Lebensdauermodell

Aufgrund der bis heute verfügbaren Resultate konnte ein erstes Modell erstellt werden, welches die bisherigen Ergebnisse korrekt nachbildet. Die genaue Formel ist Eigentum der Projektpartner, weshalb hier nur das grundsätzliche Prinzip der Funktion beschrieben wird.

$$\text{Lebensdauer in Zyklen} = f(T, \text{DOD}, I_c) = a + b_1 T + b_2 \text{DOD} + b_3 I_c + \text{Terme höherer Ordnung}$$

Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Entladetiefe wie auch die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Alterung haben. Um eine genaue Aussage über die Abhängigkeit des Ladestroms zu machen, benötigt das Modell noch weitere Messpunkte. Das nachfolgendes Diagramm Abb. 21 zeigt den Einfluss von Entladetiefe und Temperatur auf die Alterung (bei einem bestimmten, fixen Lade- und Entladestrom).

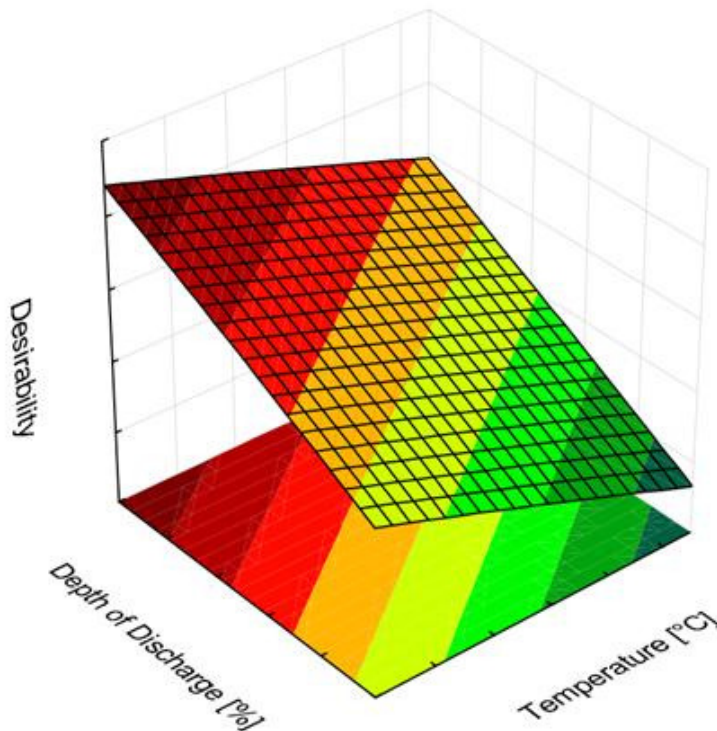


Abbildung 21: Die Alterung (Desirability) in Abhängigkeit der Entladetiefe (Depth of Discharge) und der Temperatur (Temperature)

3.3 Ausblick

Modultests

Bisher verliefen die Tests auf den sehr zuverlässigen Testsystemen äusserst erfolgreich, weshalb die Lebensdauertests weitergeführt werden. Alle vorhandenen Prüfstände sollen dazu genutzt werden, auch in den nächsten Jahren weitere Module zu testen. Unter anderem soll der Einfluss des Entladestroms in die Regressionsfunktion einbezogen werden. Ausserdem sollen die Resultate bereits gemessener Parameterkombinationen durch eine Wiederholung überprüft werden, um damit die Reproduzierbarkeit der Modultests zu kontrollieren.

CAN-Datenlogger

Eine Vielzahl der Datenlogger wurde erst während der letzten Monate in die Fahrzeuge eingebaut, weshalb eine Validierung der Resultate aus den Modultests noch nicht möglich war. Diese Logger werden jedoch in den nächsten Monaten eine riesige Datenmenge liefern, die bearbeitet werden muss und in das Modell einfließen kann.

Zurzeit wird eine Datenbank für die gesammelten Daten aufgebaut und die entsprechende Software für die Datenreinigung, Datenkompression und Auswertung entwickelt, welche ein blitzschnelles Analysieren der gesammelten Daten und ein Kalibrieren des Lebensdauermodells erlauben wird.

Diskussion

Die Lebensdauer grosser Batterien für Elektromobilität und als Puffer in Stromnetzen ist von grosser technischer und kommerzieller Bedeutung. Die Ziele sind hoch gesteckt, denn Batterien in Elektroautos sollen so lange halten wie die Fahrzeuge selbst, das sind 12+ Jahre bei ca. 1500 80% Zyklen insgesamt, während Batterien in Verbindung mit Photovoltaik für 20 Jahre und ca. 7000 Zyklen möglichst wartungsfrei funktionieren sollen. Zur Erreichung dieser Ziele sind Zeitraffertests notwendig, denen wiederum möglichst realistische Lebensdauermodelle zugrunde liegen. Bisher wurden hierfür folgende Ansätze verfolgt:

- Es wurden *Normbelastungszyklen* definiert, die der durchschnittlichen Belastung der jeweiligen Anwendung entsprechen. Batterien oder Teile davon wurden mit diesem Zylus bis zum Ausfall betrieben. Die Nachteile dieses Vorgehens liegen darin, dass nur die Lebensdauer einer individuellen Batterie gemessen wird, die grossen Variationen von realen Belastungszyklen nicht berücksichtigt werden können und der Test sehr lange dauert.
- Ein anderer Ansatz ist die Erstellung eines *Ersatzschaltbildes* der Batterie mit Hilfe der Impedanz Spektroskopie. Hier wird dann untersucht, wie sich einzelne Komponenten des Ersatzschaltkreises durch Alterung verändern. Dieser Ansatz kann der Diagnostik dienen, erfordert unter Umständen aber eine hohe Messgenauigkeit wie sie nur im Labor realisierbar ist. Eine Prognose der Lebensdauer ist nur bedingt möglich.
- In diesem Projekt wird die Methode des „*design of experimenst*“ wie beschrieben angewendet mit folgenden Vorteilen:
 1. Die Ergebnisse sind statistisch relevant
 2. Das Ergebnis liefert die quantitative Kenntnis der für die Lebensdauer relevanten Parameter, die dann im Algorithmus des Batterie Steuergerätes entsprechend berücksichtigt werden können
 3. Eine Prognose der Batterielebensdauer für alle verschiedenen Anwendungen und auch für Zeitraffertests wird durch das Vorliegen eines mathematischen Modells möglich
 4. Durch die Nachuntersuchung ausgefallener Zellen lässt sich der Einfluss einzelner Parameter auf die Bestandteile der Zellen untersuchen
- Eine Technologie ist schliesslich als ausgereift zu bezeichnen, wenn die Alterung auch in einem *mechanistischen Modell* beschrieben werden kann, das entweder Wege weist, die Alterung zu reduzieren oder die von der Natur vorgegebenen Grenzen aufzeigt

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse, die im Rahmen dieses Projektes erreicht wurden. Bereits erwähnt wurde, dass die Prüfstände weiter laufen sollen, um weitere Messpunkte zu generieren, womit die Toleranzgrenzen des Modells reduziert werden. Die Methode setzt die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eines Parametersatzes voraus, was auch auf die Reife der Fertigungstechnik schliessen lässt. Andere als weniger bedeutsam eingeschätzte Einflussgrössen wie Vibration und Betriebsdynamik können später auch im Rahmen des mechanistischen Modells untersucht werden. Eine andere wesentliche Einschränkung besteht darin, dass innerhalb einer Batterie die Temperaturverteilung nicht homogen ist, so dass nicht alle Zellen derselben Alterung unterworfen sind. Aus diesem Grunde und zur besseren Steuerung und Überwachung der Batterie muss eine möglichst gleichmässige Temperaturverteilung in der Batterie bei allen Betriebszuständen angestrebt werden.

Schlussfolgerungen

Die Methode des „design of experiment“ ist ein sehr nützliches Verfahren die Lebensdauer von Batteriesystemen zu untersuchen, weil die Ergebnisse sowohl für die praktische Anwendung z.B. für die Batteriemiete als auch für die Weiterentwicklung des Batteriesystems verwertet werden können. Die Messungen sind fortzusetzen. Desweiteren sollte Hinweisen nachgegangen werden, wonach die zwei Wirkungen der Alterung von ZEBRA Batterien, nämlich der Kapazitätsverlust einerseits und der Anstieg des Innenwiderstandes andererseits zwei voneinander unabhängige Ursachen haben. Das Entwicklungspotential dieses kostengünstigen und umweltfreundlichen Batteriesystems scheint bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Neben dem Weiterbetrieb der Prüfstände ist die Erarbeitung eines mechanistischen Alterungsmodells das notwendige nächste Ziel.

Symbolverzeichnis

Siehe Tabelle 2