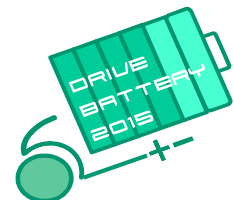


Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Audi

Audi Electronics
Venture GmbH

BMW-Verbundprojekt: DriveBattery2015 Phase I

Intelligente Steuerungs- und Verschaltungskonzepte für modulare Elektrofahrzeug-Batteriesysteme zur Steigerung der Effizienz und Sicherheit sowie zur Senkung der Systemkosten

Zuwendungsempfänger: Audi Electronics Venture GmbH
Sachsstraße 20
85080 Gaimersheim

Förderkennzeichen: 03 ET6003 I

Projektlaufzeit: 1. August 2013 – 30. April 2015

Berichtszeitraum: 1. August 2013 – 30. April 2015

Beitrag: Teilvorhaben AEV
**Optimierung des Energiemanagements von
Fahrzeugen mit Lithium-Ionen Starter- und
Bordnetzbatterien**

Koordinator: Dipl.-Ing. (TU) D. Vergossen

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (TU) D. Vergossen/M. Sc. Patrick Jansen/
Dipl.-Ing. (TUM) Daniel Renner

Ausführende Stelle: Audi Electronics Venture GmbH
Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen
I/AEV-21 - Batterietechnologien - eNOVA/Förderprojekte
Sachsstraße 20 - 85080 Gaimersheim
Tel.: +49-841-89-573950 – Fax: +49-841-8984573950
eMail: david.vergossen@audi.de

Projektkoordination: Wilhelm Maurer
Infineon Technologies AG – Research & Development Funding
Am Campeon 1 - 12 – 85579 Neubiberg
Tel.: +49 89 234 41310 – Fax: +49 89 234 15 41310
eMail: wilhelm.maurer@infineon.com

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03 ET6003 I gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

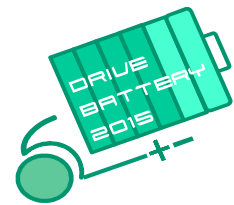


Inhalt

Bildverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1. Kurze Darstellung	5
1.1 Aufgabenstellung AEV	5
1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	6
1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand	10
Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien	10
Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien	19
2. Eingehende Darstellung	22
2.1 Zusammenfassung - Erzielte Ergebnisse	22
TA 1 Anforderungsdefinition und Spezifikation	22
AP1.1 Lastenheft Batterie-Prototyp(en)	22
TA 2 Systemarchitektur und Simulation	24
AP 2.6 Modelle zur Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien	24
TA 6 Batteriemangement/Betriebsstrategien und Algorithmen	26
AP 6.6 Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien	26
AP 6.6 Batteriedemonstrator – M18	29
TA 8 Erprobung und Validierung	31
AP 8.2 Messung zur Bestimmung des Verhaltens von Batterie und Energiemanagement auf System- und Fahrzeugebene	31
Messung Batterieverhalten auf Systemebene	31
Messungen Energiemanagement (Teil 1 – Phase 1)	32
2.2 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	34
3. Literaturverzeichnis	35
Literatur: Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien	35
Literatur: Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien	35
Ergänzende Literatur	36

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

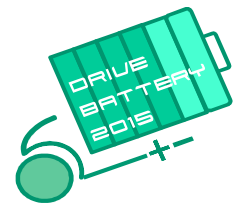


Bildverzeichnis

BILD 1:	ALLGEMEINES ELEKTRISCHES ERSATZSCHALTBILD EINER ELEKTROCHEMISCHEN ZELLE	12
BILD 2:	RUHESPANNUNGSKENNLINIE FÜR EINE LITHIUM-EISENPHOSPHAT-ZELLE ($\Theta = 25^{\circ}\text{C}$)	13
BILD 3:	ALLGEMEINES ZEITDISKRETES ZUSTANDSRAUMMODELL	13
BILD 4:	ELEKTRISCHES ERSATZSCHALTBILD EINER ELEKTROCHEMISCHEN ZELLE	15
BILD 5:	STRUKTUR DER REKURSIVEN PARAMETERSCHÄTZUNG [7]	17
BILD 6:	VERGLEICH DER LADEAKZEPTANZ VERSCHIEDENER BORDNETZBATTERIEN GEMÄß NEDC BEI EINEM SOC VON 85 % EINER TEMPERATUR VON 25 °C UND VORHERGEHENDER LADEZUSTANDSERHALTUNG DER BATTERIE – BORDNETZVERSORGUNG DURCH GENERATOR	21
BILD 7:	PRINZIPBILD NV-BORDNETZ	23
BILD 8:	VERSCHALTUNGSKONZEPT DB2015-DEMONSTRATORBATTERIE	23
BILD 9:	CHARAKTERISIERUNG VON 12 V BATTERIEN UND EINBETTUNG IN EIN GESAMTFAHRZEUGSIMULATIONSMODELL	25
BILD 10:	DEMONSTRATOR 12 V LITHIUM-IONEN-STARTERBATTERIE (PHASE 1)	25
BILD 11:	VALIDIERUNG DEMONSTRATORVERHALTEN MITTELS VERGLEICH MESSUNG/SIMULATION	26
BILD 12:	LADEZUSTANDSERKENNUNG MITTELS SVM	26
BILD 13:	KLASSIERUNGSRATE IN ABHÄNGIGKEIT VOM SVM-POLYNOMGRAD UND DEM IMPEDANZFEHLER	26
BILD 14:	INTEGRATION ENERGIEMANAGEMENT IN EIN LÄNGSDYNAMIK-MODELL FÜR GESAMTFAHRZEUG AUF MATLAB-SIMULINK BASIS	27
BILD 15:	NACHWEIS DER EIGENSCHAFTEN VON AUF LITHIUM-IONEN-TECHNOLOGIE ANGEPASSTE REGELUNGSSTRATEGIEN VIA SIMULATION UND AUFBAU DES ZU GEHÖRIGEN RCP-SYSTEMS	27
BILD 16:	UMSETZUNG DES EM MITTELS SIMULATION (BEISPIEL: PRÄDIKTIVE SOC-REGELUNG)	28
BILD 17:	SIMULIERTES KRAFTSTOFF-EINSPARPOTENTIAL BEI EINSATZ EINER LI-IONEN-BATTERIE MIT OPTIMIERTEM ENERGIEMANAGEMENT	28
BILD 18:	M18-DEMONSTRATOR (12 V LITHIUM-IONEN-STARTERBATTERIE - $\text{LiFePO}_4/10\text{P4S}/44\text{AH}$)	29
BILD 19:	ZELLSPEZIFIKATION FÜR BATTERIE-DEMONSTRATOR (AEV-TEILVORHABEN)	30
BILD 20:	BATTERIEPACK-SPEZIFIKATION FÜR BATTERIE-DEMONSTRATOR (AEV-TEILVORHABEN)	30
BILD 21:	KONSTRUKTIVER AUFBAU FÜR BATTERIE-DEMONSTRATOR (AEV-TEILVORHABEN)	31
BILD 22:	BMS-EIGENSCHAFTEN FÜR BATTERIE-DEMONSTRATOR (AEV-TEILVORHABEN)	31
BILD 23:	IMPLEMENTIERUNG DES MITTELS SIMULATION OPTIMIERTEN ENERGIEMANAGEMENTS IN EIN FAHRZEUG MIT RCP-SYSTEM (SIEHE AUCH AP 6.6)	32
BILD 24:	MESSUNG BATTERIEVERHALTEN - BEISPIEL: STROMVERLAUF FÜR NEDC-MODUS (POSITIVE STRÖME: BATTERIE WIRD GELADEN)	32
BILD 25:	FUNKTIONSNACHWEIS EM - BEISPIEL: STROMREGELUNG TIEFTEMPERATUR (-10°C)	33

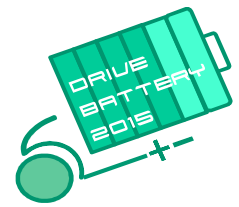
Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	INHALTLICHE AEV-BETEILIGUNG DRIVEBATTERY2015 – NACH ANPASSUNG AN BEWILLIGUNGSVORGABEN (PHASE 1 + PHASE 2)	9
TABELLE 2:	KORRELATION MODELLIERUNGSMETHODE UND -ANSATZ	12
TABELLE 3:	INHALTLICHE AEV-BETEILIGUNG DRIVEBATTERY2015 – NACH ANPASSUNG AN BEWILLIGUNGSVORGABEN (PHASE 1 + PHASE 2)	22



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung AEV

Die AEV setzt sich mit der Erforschung von neuen Verfahren zur effizienten Anpassung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien auseinander (z.B. MikroHybrid mit Rekuperation). Ziel des Forschungsvorhabens ist die Stabilisierung und Aufwertung des Verhaltens von Niedervolt-Bordnetzen in Kraftfahrzeugen. Es werden u.a. die folgenden Teilthemen erforscht:

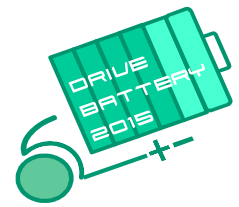
- Erstellung Lastenheft für Batterieprototypen
- Verfahren zur Entwicklung kostenoptimierter Starterbatterien
- Entwicklung zur Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Li-Ionen Energiespeichern
- Messung Batterieverhalten auf Systemebene
- Automatisierte Parametrierung des Energiemanagements
- Beurteilung technologische Machbarkeit neuartiger Batteriesystemlösungen.

Der Projektpartner AEV GmbH war im Vorhaben DriveBatterie2015 (Phase 1) mit den in der folgenden Tabelle aufgelisteten Teilaufgaben (TA) befasst.

Es ist zu beachten, dass sich die Anforderungen an das Energiemanagement von 12-V-Lithium-Ionen-Batterien deutlich von denen für die heute noch standardmäßig verwendeten Blei-Säure-Batterien unterscheiden. Um die Eigenschaften von Lithium-Ionen-Starterbatterien im Fahrzeug optimal zu nutzen, muss die EM-Software an die Batterie flexibel angepasst werden können. Ein weiteres Ziel muss es daher sein, die Entwicklung neuartiger Verfahren (SW) zur Optimierung des Energiemanagements (EM) von Fahrzeugen mit 12-V-Lithium-Ionen-Batterien so voran zu treiben, dass ein Algorithmus-Baukasten für Energiemanagement-Systeme von Lithium-Ionen Starterbatterien bereitgestellt werden kann.

Es ist also u.a. die Erforschung von neuen Verfahren zur effizienten Anpassung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien (z.B. Mikro-Hybrid mit Rekuperation) notwendig.

Die Bereitstellung innovativer/modularer Konzepte für das Batteriemangement erhöht die Anwendungs-Flexibilität durch Adaption des Fahrzeug-Batteriemagements an die benötigten Batterieeigenschaften.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Die steigende Anzahl elektrischer Verbraucher und die zunehmende Elektrifizierung von mechanisch angetriebenen Aggregaten erhöhen erheblich die Anforderungen an den Energiespeicher im Fahrzeug. Im Automobil-Sektor werden Lithium-Ionen-Zellen meistens mit Hybrid- oder Elektrofahrzeugen in Verbindung gebracht. Moderne Start-Stopp-Systeme, die steigende Anzahl elektrischer Verbraucher und die zunehmende Elektrifizierung von mechanisch angetriebenen Aggregaten erhöhen die Anforderungen an den Energiespeicher.

Die herkömmlichen in konventionellen Fahrzeugen eingesetzten 12 Volt Blei-Säure-Starterbatterien gelangen damit zunehmend an ihre Leistungsgrenzen.

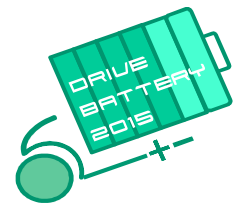
Aufgrund der stetig steigenden Anforderungen an die Batterieeigenschaften hinsichtlich Gewicht, Zyklenfestigkeit und einer möglichst lastunabhängigen Ausgangsspannung, eignet sich die Lithium-Ionen-Technologie auch sehr gut als Kernelement einer 12 Volt Starterbatterie für den Einsatz in konventionellen Kraftfahrzeugen (Ersatz für die aktuell noch übliche Blei-Säure-Technologie).

An eine 12-Volt-Starterbatterie werden allerdings andere Anforderungen gestellt als an die Hochvoltbatterie eines Elektro- oder Hybridfahrzeuges (Traktionsbatterie). Zwar muss auch die Starterbatterie das Rekuperieren unterstützen, jedoch muss sie normalerweise keine hohen Ströme über längere Zeiträume abgeben, abgesehen vom Startvorgang des Verbrennungsmotors. Darüber hinaus speist sie das Bordnetz mit vergleichsweise niedrigen Strömen. Eine Starterbatterie wird beim Normalbetrieb in der Regel nie vollständig entladen. Typischerweise bewegt sich ihr Ladezustand in einem Bereich um 95 %.

Weiterhin sind zur abschließenden Festlegung einer Methodik zur Auslegung von 12-V-Starterbatterien mit Lithium-Ionen-Zellen noch Untersuchungen zu den Themen: Motorstarttests, Bordnetzstabilität und Eignung erweiterter Stromprofile durchzuführen.

Der Partner AEV GmbH hat seine Erfahrungen aus dem Bereich *Energie-Management* und *Entwicklung von Batteriesystemen auf Lithium-Ionen-Basis* in das Vorhaben eingebracht. Da der Antragsteller AUDI Electronics Venture GmbH (AEV) eine 100-prozentige Tochter der AUDI AG ist, konnte auch auf die Fachkompetenz der AUDI AG hinsichtlich Rollenprüfstand/Klimakammer zurückgegriffen werden. Weiterhin konnte die bei VW vorhandene Fachkompetenz zur Charakterisierung von Lithium-Ionen-Zellen zur Unterstützung der AEV-Arbeiten herangezogen werden.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Vergangenheit zum Thema *Entwicklung von Batteriesystemen auf Lithium-Ionen-Basis* konnten Strategien zur Einführung einer flexiblen und effizienten Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen Starter- und Bordnetzbatterien untersucht werden. Die F+E-Arbeiten der AEV wurden in Rahmen der Phase 1 im Wesentlichen auf Verfahren zur Entwicklung kostenoptimierter Starterbatterien in Verbindung mit der Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen konzentriert. Auch konnten mit den vorhandenen F+E Erfahrungen die Voraussetzungen zur Erreichung der Ziele CO₂-Reduktion und Erhöhung der Batterielebensdauer in das Vorhaben eingebracht werden.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1

AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Um die spätere Ergebnisverwertung der erstellten Modelle und SW-Algorithmen vorzubereiten zu können, mussten die Voraussetzungen für die Entwicklung eines neuartigen Batterie-Architektur in Verbindung mit der Erforschung eines optimalen Energiemanagements geschaffen werden.

Das neue Batteriekonzept und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen für das Energiemanagement soll schrittweise installiert werden. Eine wichtige Voraussetzung im Vorhaben DriveBattery2015 (Phase 1) war es, die notwendige Kompetenzerweiterung auf dem Gebiet neuartige Batterie-Architekturen auf Lithium-Ionen-Basis sicherzustellen. Im Hinblick auf die Funktionssicherheit der zu erforschenden Systemlösungen wurde der Qualitätsmaßstab 100 Prozent zugrunde gelegt.

Im Teilvorhaben der AEV GmbH wurden zum Projektbeginn die 5 internen Hauptmeilensteine

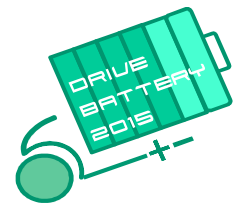
- TA1: MM-1 (intern) - Spezifikation für Konzeptbatterie mit Li-Ionen-Technologie für das NV-Bordnetz erfolgreich abgeschlossen (31. Dezember 2013)
- TA 2: MM-2 (intern) - Erstellung eines Gesamtbatteriemodells auf Basis der Einzelzelle (31. Oktober 2014)
- TA 6: MM-3 (intern) - Integration von 12 V Lithium-Ionen-Batteriemodell in eine Gesamtfahrzeugsimulation (31. Oktober 2014)
- TA 8: MM-4 (intern) - Implementierung des mittels Simulation optimierten Energiemanagements in ein Fahrzeug mit RCP-System (31. Dezember 2014)
- TA 8: MM-5 (intern) - Demonstrator tests abgeschlossen (Phase 1) - 31. Januar 2015

mit einem Abbruchkriterium und einen zugehörigen Risikomanagement (z.B. 4 Varianten zur benötigten Entwicklungselektronik für die geplante AEV-Konzeptbatterie (M18) oder Vorbereitung und Planung einer evtl. notwendigen kosten-neutralen Laufzeitverlängerung als Maßnahme zur Risikominderung) eingeführt. Es musste sichergestellt werden, dass Änderungen bzgl. der nachfolgenden Projektstufe wegen mangelnder technischer Machbarkeit keinen Einfluss auf den späteren (nach Abschluss Phase 1) betrieblichen und wirtschaftlichen Nutzen der bereits erforschten Stufen hat.

Zur Absicherung der Batteriefunktion und für eine kontinuierliche sowie hochzuverlässige Überwachung ist eine Einbindung der Bordnetzsensorik und der Bordnetzzustände in die spätere Systemumgebung von Lithium-Ionen-Starterbatterien unbedingt erforderlich. Durch diese Arbeiten sollen die Grundlagen geschaffen werden, die erstens die Zuverlässigkeit der Batterieüberwachung erhöhen und zweitens Potential für die Reduktion der Sensoranzahl liefern.

Dazu musste sichergestellt sein, dass der Verbundpartner TU Dortmund eng mit den AEV-Bearbeitern des Teilvorhabens zusammenarbeitet. Dazu sollten hauptsächlich Ergebnisse zur:

- Erforschung und Erstellung von Verfahren zur Zustandsidentifikation für Lithium-Ionen Batterien auf Basis von Batterie-Bordnetzmodellen
- Untersuchung der Potentiale unter Einbezug des Bordnetzes und des Bordnetzzustandes für die Batteriediagnose



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

- Entwicklung von Überwachungskonzepten für die Batterie und das Bordnetz und zur Erfassung kritischer Fehlerfälle
- Auswahl geeigneter Algorithmen und Konzepte zur Schätzung bzw. Klassifikation des Gesamtsystemzustandes
- Implementierung der Verfahren in einem geeigneten forschungsorientierten Batterie- und Bordnetzdemonstrator

erarbeitet und ausgetauscht werden.

Es wurde geplant, dass die Erstellung der Spezifikationen und der erzielten F+E Ergebnisse zu den oben in Frage kommenden Themenstellungen in enger Zusammenarbeit mit dem Partner TUDO erfolgen.

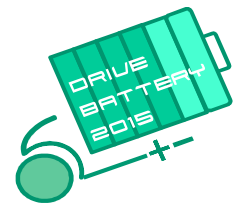
Um dies sicherzustellen, wurde auf den Erfahrungen der TU Dortmund dem Gebiet Bordnetze und Signalverarbeitung aufgebaut.

Weiterhin wurde im Verlauf der Arbeiten zur Projektdefinition für die Phase 2 mit der TUDO vereinbart, dass die F+E Themen: *Fahrzeug-taugliche Messumgebung (Labordemonstrator) zur Bordnetz- und Batteriecharakterisierung sowie zur Parameterbestimmung für die entwickelten Modelle und Bewertung von Störungen inklusive Spezifikation der Belastung durch elektromagnetische Störungen in elektrisch-angetriebenen Fahrzeugen im Bordnetz* und *Definition eines Monitoringsystem zur Datenermittlung* und deren Ergebnisse sowie die damit verbundenen Optimierungen unbedingt in das Vorhaben DriveBattery2015 eingebracht werden müssen.

Weiterhin sollten mögliche Batterie-Teststellungen im Rahmen der Phase 1 mit den Partnern ausgetauscht werden können.

Der DB2015-Partner AEV hat das beantragte Teilvorhaben in der Phase 1 gemäß der folgenden Vorgehensweise bearbeitet:

- Entwicklung eines Lastenhefts für Lithium-Ionen-Starterbatterien
- Bewertung der verfügbaren Bordnetztopologien und Relevanz bezgl. des Projektvorhabens
- Analyse und Simulation zur Ausnutzung der Kapazität sowie der Leistungsfähigkeitsabschätzung einer Lithium-Ionen-Batterie im NV-Energiemanagement
- Verbraucheranalyse
- Portierung des aktuellen NV-Energiemanagements auf ein prototypisches Steuergerät zur Weiterentwicklung und Untersuchung der Funktionalitäten für Li-Ionen-Batterietechnologien
- Effizienzanalyse der Weiterentwicklungen im Energiemanagement durch Versuche auf dem Abgasrollenprüfstand (NEDC, WLTP, verschiedene Verbraucher- und Umgebungsszenarien)
- Weiterentwicklung des Batteriemagements für die Li-Ionen-Technologie mit Aufbau einer Konzeptbatterie für Entwicklungsversuche.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1

AEV GmbH - 03 ET6003 I

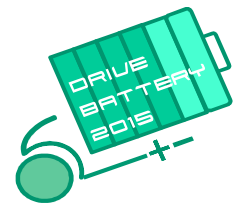
- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Der Projektpartner AEV GmbH war im Vorhaben DriveBatterie2015 (Phase 1) mit den in der folgenden Tabelle aufgelisteten Teilaufgaben (TA) befasst.

TA	Titel	Arbeitsthemen (AEV GmbH)
1	Anforderungsdefinition und Spezifikation	<input type="checkbox"/> AP1.1: Lastenheft Batterie-Prototyp(en)
2	Systemarchitektur und Simulation	<input type="checkbox"/> AP2.6: Modelle zur Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien
6	Batteriemanagement/ Betriebsstrategien und Algorithmen	<input type="checkbox"/> AP6.6: Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien
8	Erprobung und Validierung	<input type="checkbox"/> AP8.2: Messung zur Bestimmung des Verhaltens von Batterie und Energiemanagement auf System- und Fahrzeugebene

Tabelle 1: Inhaltliche AEV-Beteiligung DriveBattery2015 – nach Anpassung an Bewilligungsvorgaben (Phase 1 + Phase 2)

Die geplanten F+E Ergebnisse zur Thematik *Optimiertes Energiemanagement für den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien* werden von der Audi Electronics Venture GmbH (AEV) nach Abschluss der Phase 2 schrittweise für die AUDI AG im Rahmen von zusätzlichen internen F+E Projekten aufbereitet und adaptiert (Starterbatterie + Bordnetz + elektrische Antriebsstränge). Auf den im Vorhaben erzielten Ergebnissen soll die bereits bei der AEV vorhandene Wissensbasis zum Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien um das Thema: Entwicklung neuer Verfahren (SW) zur Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Starter- und Bordnetz-Batterien ausgebaut werden. Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt (bei gegebenem ROI) in der Regel im Rahmen einer seriennahen Produktvorbereitung nach erfolgreichem Projektabschluss. Mit der Beteiligung an einem wichtigen Projekt der NPE (Nationale Plattform Elektromobilität) verfolgt die AEV aktiv eine Ergebnispräsentation unter Einbeziehung von inter- und nationalen Gremien.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien

Übersicht

Die exakte Ermittlung des Ladezustands einer Lithium-Ionen-Batterie stellt eine nicht unerhebliche Herausforderung bezüglich der Signalverarbeitung dar. Die Anforderungen an die Genauigkeit des ermittelten Ladezustands sind besonders im automobilen Anwendungsbereich von großer Bedeutung, um einen sicheren und effizienten Betrieb des elektrochemischen Energiespeichers in einem Fahrzeug gewährleisten zu können.

Bereits bekannte, auf einem elektrischen Ersatzschaltbild basierende, Verfahren wie das Kalman Filter, das Extended Kalman Filter oder der Zustandsbeobachter stoßen hierbei allerdings schnell an ihre Grenzen. Grund hierfür sind, im speziellen bei der Lithium-Eisenphosphat-Technologie, zwei wesentliche Punkte: Zum einen das sehr flache Plateau der Ruhespannungskennlinie im mittleren Ladezustandsbereich und zu anderen die Genauigkeit des elektrischen Ersatzschaltbilds bezüglich der Netzwerkparameter, zur Berechnung der Ruhespannung aus der Klemmenspannung. So kann bei den ruhespannungsbasierten Verfahren die Ladezustandsermittlung im mittleren Bereich, mit Genauigkeiten im einstelligen Prozentbereich, nur mit sehr großem messtechnischem Aufwand realisiert werden. Nachfolgend werden die folgenden Themen zum Stand der Technik behandelt:

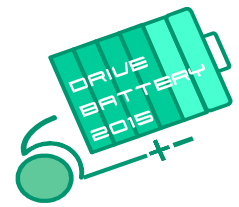
- Ladezustandsbestimmung eines elektrochemischen Energiespeichers
- Batteriemodellierung
- Batteriezustandsraummodell
- Rekursive Parameterschätzung
- Ladezustandserkennung mittels Impedanzklassierung durch eine Support Vector Machine (SVM).

Ladezustandsbestimmung eines elektrochemischen Energiespeichers

Die Ladezustandsbestimmung eines elektrochemischen Energiespeichers (kurz EES) stellt in der Signalverarbeitung eine erhebliche Herausforderung für den sicheren und effizienten Betrieb eines elektrischen Energiespeichers im Kraftfahrzeug dar, da der Ladezustand, oder oft auch aus dem Englischen entlehnt State of Charge genannt (kurz SOC), nicht als physikalische Größe sensorisch erfasst werden kann. Der nominale Ladezustand eines EES ergibt sich per Definition aus der nominalen Batteriekapazität C_N und der entnommenen Ladungsmenge Q_b [1].

$$SOC = \frac{C_N - Q_b}{C_N} \quad (1)$$

Wie in [2] beschrieben existieren verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Ladezustands für EES aus den Signalen des Zeitbereichs, wie Strom, Spannung und Temperatur. Es eignen sich allerdings nicht alle Methoden für alle Zelltypen (Zellchemie) gleichermaßen. Zusammengefasst lassen sich die Verfahren in vier methodische Klassen einteilen:



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

- Stromintegrationsbasierte Methoden
- Heuristische Methoden
- Maschinell-lernende Methoden
- Zustandsraumbasierte Methoden.

Die wohl verbreitetsten Verfahren zur Ladezustandsbestimmung beruhen auf stromintegrationsbasierten Methoden, wie zum Beispiel der Restentladungstest oder die Amperestunden-Bilanzierung (kurz AhB) bei der der Batteriestrom I_{Batt} über die Zeit t integriert wird. Dafür ist allerdings die Kenntnis des initialen Ladezustandes SOC_0 , sowie eine batteriespezifische Modellierung des Verluststroms $I_{Verlust}$ für eine korrekte Bestimmung des SOC erforderlich.

$$SOC_k = SOC_0 \cdot \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^{t_k} (I_{Batt k} - I_{Verlust k}) dt \quad (2)$$

Diese Methoden sind zwar mit wenigen Einschränkungen, wie den spezifischen Verlustströmen, auf alle EES anwendbar. Allerdings lassen sich diese Verfahren nur bedingt auf EES in verschiedenen Systemen applizieren. So ist eine AhB als Applikation in einem System, das regelmäßig definierte Rekalibrierungspunkte, zur Korrektur der Ampere-Stundenintegration, anfährt sehr wohl möglich und auch mit Verluststrombetrachtung effizient, aber für eine Systemapplikationen, wie im Fahrzeugbordnetz bei denen dies nicht der Fall ist, nicht mehr praktikabel.

Für Fahrzeuganwendungen im Niedervolt-Bordnetz ist die SOC-Bestimmung mittels AhB nur hinreichend effizient, da Rekalibrierungspunkte hier nicht regelmäßig und definiert angefahren werden können. Auch die Modellierungsmethode der Ruhespannungskennlinie als Grundlage zur SOC-Bestimmung lässt sich für Bordnetzanwendungen im Fahrzeug nicht direkt applizieren, da die Batterie in der Regel nie von den elektrischen Verbrauchern getrennt wird und sich somit keine Ruhespannung an der Batterie einstellen kann. Die künstlichen neuronalen Netze spielen in der Fahrzeugapplikation noch eine eher untergeordnete Rolle.

Die zustandsraum-basierten Methoden hingegen haben sich als probates Mittel zur SOC-Bestimmung im Fahrzeug bewährt gemacht. Die auf einem elektrischen Batterieersatzschaltbild basierenden Verfahren versuchen über eine Top-Down Modellierung das Batterieverhalten mathematisch zu beschreiben und den SOC als Zustandsgröße zu schätzen.

Batteriemodellierung

Grundlegend werden die Methoden zur Modellierung einer Batterie in fünf Gruppen unterteilt [3], welche wiederum nach deren Herangehensweise unterschieden werden. So werden grundsätzlich zwei Ansätze unterschieden, der BottomUp- und der TopDown-Ansatz.

Der BottomUp-Ansatz verfolgt dabei das Ziel des genauen Systemverständnisses. Man versucht die verschiedenen bekannten physikalisch-chemischen Effekte einer Batterie auf mikroskopischer Ebene zu modellieren, um durch Skalierung und Anpassungen das reale Klemmenverhalten so genau wie möglich nach zu bilden. Dem gegenüber steht der TopDown-Ansatz zur Modellierung von Batterien. Bei diesem Ansatz wird versucht das bekannte Klemmenverhalten mit einfachen Mitteln, wie zum Beispiel Heuristiken, nach zu bilden [4].



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Die nachfolgende Tabelle zeigt wie die beschriebenen Ansätze mit den Methoden zur Modellierung korrelieren.

Modellierungsmethode	Modellierungsansatz
physikalisch-chemische Modelle	Bottom-Up
elektrische Batterieersatzschaltbilder	Top-Down
empirische Modelle ("Black-Box-Modell")	Top-Down
Fuzzy Logic Modelle	Top-Down
Neuronale Netzwerk Modelle	Top-Down

Tabelle 2: Korrelation Modellierungsmethode und -ansatz

Von den genannten fünf Modellierungsmethoden zur Ladezustandsbestimmung im Zustandsraum eignet sich die Modellierung eines elektrischen Batterieersatzschaltbilds am besten, da sich durch den vereinfachenden Modellansatz aus dem ESB die Differentialgleichungen für ein Zustandsraummodell ableiten lassen.

Das grundlegende ESB einer Batterie lässt sich auf das Helmholtz-Thevenin-Äquivalent zurückführen, nachdem sich das elektrische Verhalten komplizierter, linearer Netzwerke auf einfache diskrete Zweipole reduzieren lässt [5].

Ausgehend von diesem ESB haben sich zum Beschreiben des elektrischen Batterieverhaltens Abwandlungen etabliert, wie z. Beispiel das Randles-ESB.

Das ESB kann sich je nach Modellierungsgrad aus Induktivitäten, Kapazitäten, Widerständen und Spannungsquellen zusammensetzen [4].

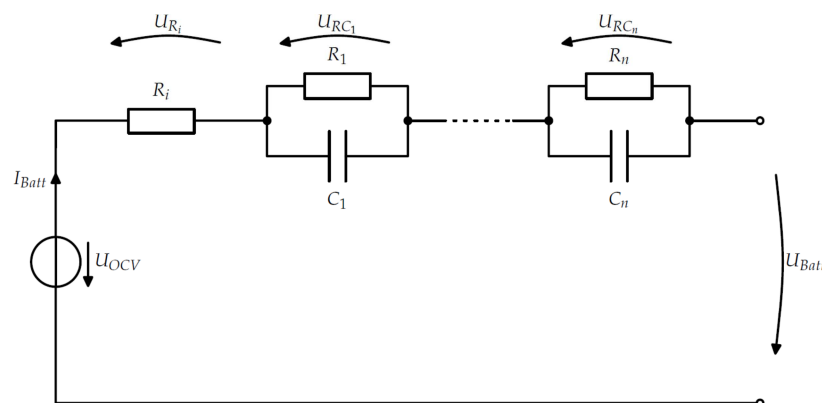


Bild 1: Allgemeines elektrisches Ersatzschaltbild einer elektrochemischen Zelle

Modifikationen zur Abbildung von Nichtlinearitäten ermöglichen die Modellierung des dynamischen Verhaltens einer Batterie. So kann, wie in Abbildung 1 dargestellt, ein Netzwerk aus Innenwiderstand und mehreren RC -Gliedern mit unterschiedlichen Zeitkonstanten die verschiedenen in der Batterie ablaufenden physikalisch, chemischen Prozesse, ohne deren genauen Kenntnisse, über das dynamische Klemmenverhalten nachbilden. Dabei steigt die Präzision des Klemmenverhaltens, allerdings nur bis zu einem gewissen Grad, mit der Anzahl der RC -Gliedern.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

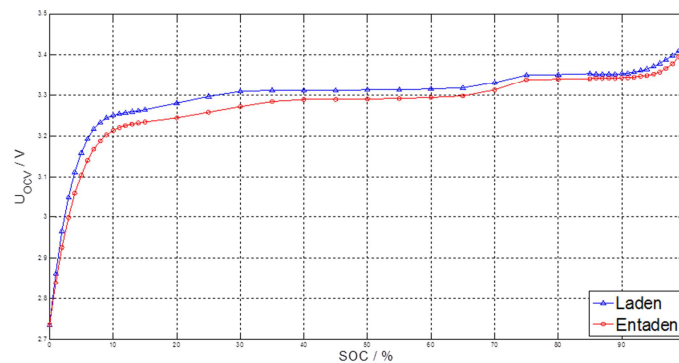


Bild 2: Ruhespannungskennlinie für eine Lithium-Eisenphosphat-Zelle ($\vartheta = 25^\circ\text{C}$)

Neben dem Netzwerk mit Innenwiderstand und den RC -Gliedern spielt auch die Ruhespannungskennlinie der Zelle, wie in Abbildung 2 dargestellt, als Spannungsquelle im Ersatzschaltbild eine entscheidende Rolle zur Abbildung des statischen Verhaltens.

Batteriezustandsraummodell

Die Modellierung einer Batterie im Zustandsraum zielt darauf ab messtechnisch nicht erfassbare Zustandsgrößen mathematisch zu modellieren und auf diesem Wege regelungstechnischen und systemtheoretischen Verfahren zugänglich zu machen. Die Grundlage für das Zustandsraummodell (ZRM) ist die Differentialgleichung des zu Grunde liegenden elektrischen Systems.

Die systembeschreibende Differentialgleichung der Batterie als elektrisches System lässt sich, wie im Abschnitt *Batteriemodellierung* beschrieben, über ein geeignetes Batteriemodell herleiten.

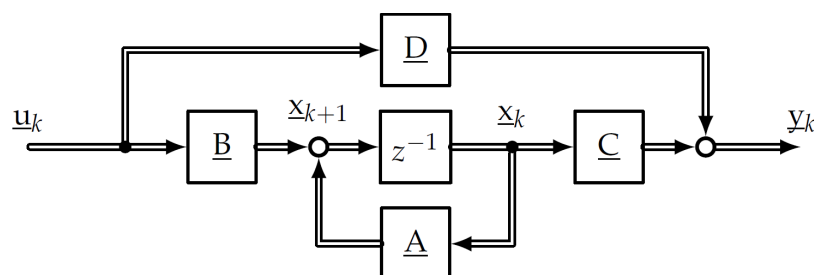
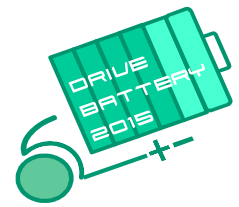


Bild 3: Allgemeines zeitdiskretes Zustandsraummodell

Das ZRM ist, nun das mathematische Äquivalent der Differentialgleichung des Batteriemodells, in expliziter Form als System aus n Differentialgleichungen 1-ter Ordnung, dabei gibt die Dimension n die Ordnung des Systems wider. Diese Form der Differentialgleichungen eignet sich optimal für die Darstellung in einer Matrixschreibweise. Diese Beschreibungsform wird gegenüber der Differentialgleichung bevorzugt, da so der Systemzustand als wichtiges Element der Analyse dynamischer Systeme direkt verfügbar ist. Ein weiterer Vorteil des Zustandsraummodells ist die sehr gute Eignung für die rechnergestützte Verarbeitung [6].



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1

AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Die allgemeine Form der Zustandsraumdarstellung eines dynamischen Systems kann graphisch, zum einfacheren Verständnis, durch ein Blockschaltbild, wie in Abbildung 3, in der allgemeinen Form, dargestellt werden. Diese Darstellungsform beschreibt die Struktur eines dynamischen Systems, sowie die Beschreibung der Teilsysteme des Systems und deren Kopplung untereinander.

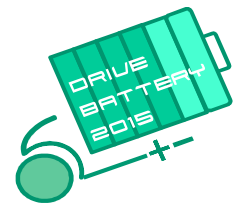
Das ZRM für lineare zeitinvariante Systeme besteht aus zwei Gleichungen wobei die erste als Zustandsdifferentialgleichung (siehe Gleichung 3) und die zweite als Ausgangsgleichung (siehe Gleichung 4) bezeichnet wird. Mit diesen Gleichungen lässt sich das dynamische Zeitverhalten des Systems beschreiben. Bezogen auf den Eingangsvektor $\underline{u}_{(t)}$ lässt sich so bei definiertem Initialzustand \underline{x}_0 des Zustandsvektors die Trajektorie des Systemausgangs zu jedem beliebigen Zeitpunkt berechnen. Die Komponenten des Eingangsvektors entsprechen dabei den einzelnen Eingangsgrößen $\underline{u}_{1(t)}, \dots, \underline{u}_{n(t)}$ des Systems. Das Resultierende Systemverhalten wird durch die einzelnen Ausgangsgrößen $\underline{y}_{1(t)}, \dots, \underline{y}_{n(t)}$ des Systems als Komponenten des Ausgangsvektors $\underline{y}_{(t)}$ wiedergegeben.

$$\underline{x}_{k+1} = \underline{A}\underline{x}_k + \underline{B} \cdot \underline{u}_k \quad (3)$$

$$\underline{\hat{y}}_k = \underline{C}\underline{x}_k + \underline{D} \cdot \underline{u}_k \quad (4)$$

Der zeitkontinuierliche Zustandsvektor $\underline{x}_{(t)}$ beschreibt in diesem Zusammenhang die zeitlich veränderlichen Zustandsvariablen $\underline{x}_{1(t)}, \dots, \underline{x}_{n(t)}$ des dynamischen Systemverhaltens. Die zeitvarianten Zustandsvariablen repräsentieren die Zustände der verteilten Energiespeicher im beschriebenen dynamischen System. Die Matrizen \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} werden hierbei entsprechend ihrer Reihenfolge als System-, Eingangs- oder auch Steuerungsmatrix, Ausgangs- oder auch Beobachtungsmatrix und Durchgangsmatrix bezeichnet. Die Matrizen enthalten die Koeffizienten der einzelnen Größen im System, welche sich je nach Matrix auf die Zustandsvariablen wie im Fall der Systemmatrix \underline{A} , auf die Eingangsgrößen wie bei der Eingangsmatrix \underline{B} , auf die Ausgangsgrößen wie bei der Ausgangsmatrix \underline{C} oder bei der Durchgangsmatrix \underline{D} direkt von den Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen beziehen. Die Durchgangsmatrix beschreibt im Wesentlichen die Sprungfähigkeit eines dynamischen Systems, somit ist ein System für $\underline{D} \neq 0$ sprunghfähig. Die Koeffizienten der Matrizen sind für zeitinvariante Systeme konstant, verändern sich also nicht über den zeitlichen Verlauf. Zeitvarianten Systeme hingegen haben veränderliche Koeffizienten, diese können sich über den zeitlichen Verlauf verändern. Die Änderung der Koeffizienten kann hierbei von verschiedenen Faktoren abhängen [6; 7].

Als einfaches Beispiel für einen veränderlichen Koeffizienten sei an dieser Stelle ein Widerstand genannt, welcher sich über die Temperatur verändert und somit direkt Einfluss auf das Systemverhalten nimmt.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

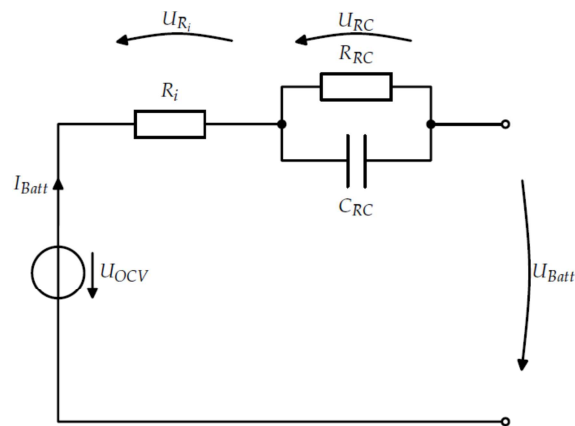


Bild 4: Elektrisches Ersatzschaltbild einer elektrochemischen Zelle

Wie in [8] und in [9] beschrieben, lassen sich aus dem vereinfachten elektrischen Ersatzschaltbild mit einem RC -Glied, wie in Abbildung 4 dargestellt, durch die Gesetze der Elektrotechnik die zeitdiskreten Zustandsgleichungen und die Ausgangsgleichung für das mathematische Batteriemodell aus dem ESB herleiten. So ergeben sich für die Zustandsgleichungen die zwei Gleichungen

$$SOC_{k+1} = SOC_k + \frac{\Delta t}{C_N} \cdot I_{Battk} \quad (5)$$

$$U_{RCk+1} = \frac{\Delta t}{C_{RC}} \cdot I_{Battk} + \left(1 - \frac{\Delta t}{R_{RC} \cdot C_{RC}}\right) \cdot U_{RCk} \quad (6)$$

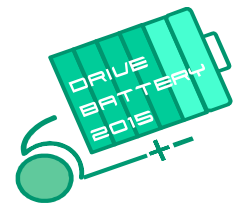
Die Gleichung 5 beschreibt mit dem Ladezustand SOC_k die Abhängigkeit bezogen auf den Batteriestrom I_{Batt} - analog zu Gleichung 2 - als die diskrete Amperestundenintegration dar. Die Gleichung 6 beschreibt das dynamische Verhalten des Systems, den Spannungsabfall U_{RCk} über dem RC -Glied. C_{RC} und R_{RC} sind dabei die Parameter des RC -Glieds.

Die Ausgangsgleichung zur Bestimmung der Klemmenspannung ergibt sich aus der Summe der einzelnen Spannungsabfälle im ESB, wobei U_{OCV} die Ruhespannung bezogen auf den aktuellen SOC wiedergibt. U_{Ri} gibt den Spannungsabfall über dem Innenwiderstand der Batterie wider.

$$U_{Batt} = U_{OCV} + U_{RC} + U_{Ri} \quad (7)$$

Die explizite Darstellungsform macht gleich die den Energiespeicher repräsentierenden Zustandsvariablen des Systems ersichtlich, zum einen den zeitdiskreten Ladezustand SOC_k der Batterie, sowie die Spannung U_{RCk} über dem RC -Glied.

Aus dieser expliziten Form lässt sich nun die Matrixschreibweise für das ZRM ableiten.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

$$\underline{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_{RC} \cdot C_{RC}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{RCk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_{RC}} \end{bmatrix} \cdot I_{Battk} \quad (8)$$

$$\hat{U}_{Battk} = \begin{bmatrix} \frac{U_{OCV_k}}{SOC_k} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{RCk} \end{bmatrix} + R_i \cdot I_{Battk} \quad (9)$$

Mit einem aus dem ESB derart abgeleiteten Batteriezustandsraummodell, lässt sich an Hand des Spannungsverhaltens der Batterie bezüglich der Klemmen, durch die möglichst genaue Kenntnis der Netzwerkparameter des ESB, näherungsweise die Ruhespannung, das Hystereseverhalten nicht berücksichtigt, bestimmen und so über die Ruhespannungskennlinie die Amperestundenintegration korrigieren.

Rekursive Parameterschätzung

Die Parametrierung eines solchen, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, ESB stellt eine enorme Herausforderung dar. Die elektrochemische Impedanzspektroskopie (kurz EIS) ist eine effektive Möglichkeit zur Charakterisierung eines EES und dessen dynamischen Verhaltens [10].

Bei der EIS wird ein EES mit verschiedenen frequenten sinusoidalen Eingangssignalen – je nach Verfahren galvanometrisch mit Strom oder potentiometrisch mit Spannung – angeregt und das Ausgangssignal als Systemantwort ins Verhältnis zum Eingangssignal gesetzt, um für die verschiedenen Frequenzen die Impedanzen zu ermitteln. Die auf diese Weise ermittelten Impedanzen lassen sich nun im Nyquist-Diagramm als Impedanzortskurven darstellen.

Mit Hilfe dieser Impedanzmessungen können automatisiert die Netzwerkparameter für die Zelle durch Fittingverfahren näherungsweise ermittelt werden [11].

Auf Grund der sehr zeit- und kostenaufwändigen Charakterisierung einer Zelle mit dieser Methode ist eine mögliche Online-Schätzung der Netzwerkparameter eine sehr interessante Möglichkeit den initialen Aufwand zur Batteriemodellerstellung zu minimieren.

Wie in [4] beschrieben ist es möglich die Netzwerkparameter eines EES aus dem Spannungs- und Stromverhalten rekursiv aus dem Strom- und Spannungsprofil der Batterie online zu schätzen. Das dynamische Verhalten des Netzwerks gemäß Abschnitt *Batteriezustandsraummodell* entspricht dabei dem eines PDT_1 -Glieds,

$$\underline{Z}(j\omega) = (R_{RC} + R_{RC}) \cdot \frac{1 + j\omega \cdot (R_i \parallel R_{RC}) \cdot C_{RC}}{1 + j\omega \cdot R_{RC} \cdot C_{RC}} \quad (10)$$

$$G(s) = V \cdot \frac{1 + s \cdot T_v}{1 + s \cdot T_1} \quad (11)$$



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

wobei die Spannung als Ausgangsgröße vom Strom als Eingangsgröße, oder umgekehrt, abhängt. Gleichung 10 beschreibt mathematisch die Impedanz $Z(j\omega)$ des Netzwerks bestehend aus Innenwiderstand und RC -Glied. Gleichung 11 gibt die entsprechende Übertragungsfunktion eines PDT_1 -Glieds im Zeitbereich wider.

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{1 + a_1 \cdot z^{-1}} \quad (12)$$

Die z -Transformation ermöglicht nun die Korrelationen zwischen den Koeffizienten der diskreten Übertragungsfunktion aus Gleichung 12 und den Netzwerkparametern im Zeitbereich.

$$R_i = b_0 \quad (13)$$

$$R_{RC} = \frac{b_1 - a_1 \cdot b_0}{1 + a_1} \quad (14)$$

$$C_{RC} = \frac{\Delta t}{b_1 - a_1 \cdot b_0} \quad (15)$$

Mittels eines iterativen Bestimmungsverfahrens können nun für das bekannte dynamische System und dessen z -Übertragungsfunktion die Koeffizienten a_1 , b_0 und b_1 bestimmt werden und daraus die Netzwerkparameter R_i , R_{RC} und C_{RC} berechnet werden.

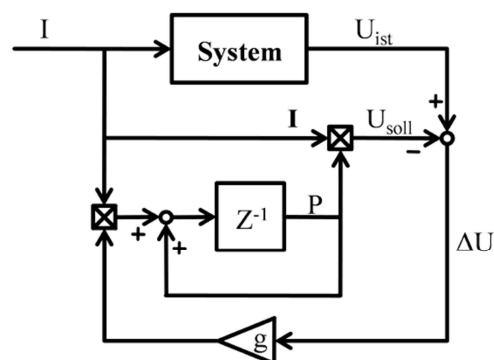
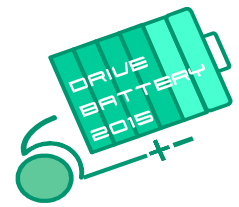


Bild 5: Struktur der rekursiven Parameterschätzung [7]

Zur Bestimmung der Parameter zielt der RLS-Algorithmus, wie in Abbildung 5 dargestellt, darauf ab, die aus den Koeffizienten als Elemente des Vektors $p_k = [a_1, b_0, b_1]$ berechneten Netzwerkparameter den realen Parametern an zu gleichen. Dies geschieht durch Prädiktion der Ausgangsgröße zu jedem Zeitschritt durch die Eingangsgröße und den Koeffizienten des vorherigen Zeitschritts der Übertragungsfunktion.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Der daraus resultierende Prädiktionsfehler ε aus geschätzter und gemessener Ausgangsgröße dient nun der Korrektur der Koeffizienten mittels eines Korrekturfaktors g zur erneuten Prognose im nächsten Berechnungsschritt.

$$\underline{p}_k = \underline{p}_{k-1} + (y_k - \underline{p}_k^T \cdot \underline{u}_k) \cdot g \cdot \underline{u}_k \quad (16)$$

Fasst man nun die erforderlichen Messgrößen in einem Vektor zusammen so ergibt sich für den Eingangsvektor des RLS-Algorithmus.

$$\underline{u}_k = \begin{bmatrix} -(U_{Batt} - U_{OCV(SOC,T)})_{k-1} \\ I_k \\ I_{k-1} \end{bmatrix}_k \quad (17)$$

Die auf diese Weise ermittelten Netzwerkparameter können nun als Grundlage eines Zustandsraummodells, wie im Kapitel [|Batteriezustandsraummodell|](#) beschrieben, herangezogen werden.

Ladezustandserkennung mittels Impedanzklassierung durch eine Support Vector Machine (SVM)

Im Gegensatz zu den bekannten (siehe oben), auf einem elektrischen Ersatzschaltbild basierende, Verfahren wie das Kalman Filter, das Extended Kalman Filter oder der Zustandsbeobachter zeigt die Ladezustandserkennung mittels Impedanzklassierung durch eine Support Vector Machine einen alternativen Weg auf. Hierbei kann auf Komponenten wie die Berechnung der Ruhespannung aus der Klemmenspannung (siehe Ruhespannungskennlinie) und die Ermittlung der Parameter für ein elektrisches Ersatzschaltbild verzichtet werden.

Die Klassen für die Support Vector Machine (SVM) stellen die Menge an Impedanzortskurven der zu klassifizierenden Ladungszustände, bei definierter Alterung und Temperatur, dar.

Da eine SVM lediglich zu einer binären Entscheidung fähig ist, bedarf es, für eine Klassierung bei mehr als zwei vorhandenen Klassen, einer Trennung für jede Impedanzortskurve zu der nächstgelegenen durch eine Hyperebene mittels Support Vector Machine. So entstehen für n Klassen genau $n-1$ Support Vector Machines, welche durch verschiedene Suchverfahren, wie der linearen oder der binären Suche eine messtechnisch erfasste Impedanz sicher klassiert und somit einem definierten Ladezustand zugeordnet werden kann.

Versuche mit Messungen zur Bestimmung der gesuchten Impedanzortskurven einer Lithium-Eisenphosphat-Sekundärzelle konnten einen Nachweis der Funktionalität für die Ermittlung des Ladezustandes mittels SVM-Klassifikation erbringen.

Hierzu wurden mit einer definierten Menge an Klassen für Ladezustände die entsprechenden Support Vector Machines erzeugt. Für eine Auswahl von einzelnen Impedanzen aus den Klassen wurden diese mit einer normalverteilten Störung versehen, um eine korrekte Klassierung dieser zu überprüfen [12].

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -



Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien

Der ansteigende Energiebedarf im Bordnetz - bedingt durch eine steigende Zahl an Verbrauchern - und die Notwendigkeit den CO₂-Ausstoß weiter zu reduzieren führen dazu, dass die effiziente und intelligente Verteilung der elektrischen Energie im Fahrzeug zunehmend an Bedeutung gewinnt.

In konventionellen Fahrzeugen werden aktuell hauptsächlich Batteriespeicher mit Blei-Säure-Chemie eingesetzt. Diese Batterietechnologie erlaubt es nicht, einen Großteil der vom Generator in Rekuperationsphasen bereitgestellten Energie aufzunehmen. Um ein vorzeitiges Lebensdauerende von Batterien dieser Technologie zu vermeiden, ist es außerdem notwendig, eine hohe Lade- und Entladedynamik und somit Zyklisierungsrate des Speichers zu vermeiden.

Ein Ansatz, diese Defizite zu verbessern und zugleich die Bordnetzstabilität zu erhöhen, ist die Verwendung einer Starterbatterie auf Lithium-Eisenphosphat-Basis. Der Einsatz dieser Batterietechnologie im Fahrzeug eröffnet neue Möglichkeiten zur Optimierung des Energiemanagements und der damit verbundenen Regelungsstrategien.

Zur Optimierung des Energiemanagements und der damit verbundenen Regelungsstrategien müssen Betriebsstrategien für den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in konventionellen Fahrzeugen untersucht werden. Es muss für alle Betriebspunkte ein sicherer Betrieb des Energiespeichers gewährleistet werden. Mit dem Ziel, eine weitere Effizienzsteigerung zu erreichen, wird neben Strategien zum sicheren Betrieb auch die Adaption von Algorithmen aus dem Hybrid-Fahrzeuggbereich diskutiert.

Zum Stand der Technik werden nachfolgend die folgenden Themen behandelt:

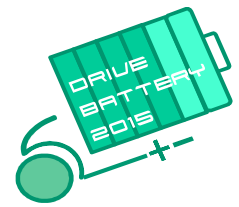
- Batteriespeicher-Vergleich
- Nutzbarer Energieinhalt
- Ladeverhalten
- Dynamische Ladeakzeptanz
- Alterungseinflüsse.

Batteriespeicher-Vergleich

Die Blei-Säure-Batterie als Energiespeicher im Niedervolt-Bordnetz weist Defizite bezogen auf die Ladeakzeptanz und Zyklisierbarkeit auf, welche die hochdynamische und effektive Einbindung in das Gesamtbordnetz verhindern. Daher soll zuerst ein Vergleich der unterschiedlichen Energiespeicher, deren Einsatz und Regelung im Fahrzeug vorgestellt werden. Dabei werden einige der für den Fahrzeugeinsatz relevante Größen und Kennwerte der Speicher näher beleuchtet.

Nutzbarer Energieinhalt

Die Bestimmung des aktuellen Energieinhalts des eingesetzten Energiespeichers ist einer der zentralen Punkte für die Auswahl des optimalen Betriebsmodus in MildHybrid-Fahrzeugen [3]. Auf dem Energieinhalt basieren Strategien wie die Freigabe der Stopp-/Start-Funktionalität und der Einsatz der Rekuperationsfunktion. Auch die Sicherstellung der Verfügbarkeit des Motorstarts nach einer Standphase über mehrere Tage basiert im Wesentlichen auf dem verfügbaren Energieinhalt der Starterbatterie [4].



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Der Energieinhalt ist daher eine, wenn nicht die zentrale Regelgröße im Energiemanagement von MildHybrid-Fahrzeugen. Vor allem die Bestimmung des nutzbaren Speicherenergieinhalts unterscheidet sich bei den untersuchten Technologien. Die entnehmbare Energiemenge eines Blei-Säure Speichers hängt entscheidend von äußeren Umständen wie der Entladestromstärke und der Batterietemperatur ab. Somit muss im Energiemanagement eine Abschätzung über die bei aktuellen Randbedingungen nutzbare Energiemenge erfolgen. Dahingegen lässt sich der Energieinhalt einer Hochleistungs-LFP-Zelle im gemäßigten Temperaturbereich sehr gut durch den Ladezustand (SOC) darstellen. Die Abhängigkeit der entnehmbaren Energiemenge, oder Kapazität C_{akt} von der Stromstärke I_{akt} ist bei der LFP-Batterie wesentlich geringer ausgeprägt und kann durch die Peukertgleichung

$$C_{AKT} = C_N \cdot \left(\frac{I_N}{I_{AKT}} \right)^{k-1} \quad (1)$$

beschrieben werden. Die Werte werden in das Verhältnis zu den bei Nennbetrieb im Labor gemessenen Größen Nennkapazität C_N bei Nennstromstärke I_N gesetzt. Der Exponent k ist vom Batterietyp abhängig zu wählen und liegt für Blei-Säure-Batterien bei 1.3 und für Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien bei unter 1.05. Somit reduziert eine Verzehnfachung des Entladestroms I_{AKT} die entnehmbare Kapazität C_{AKT} bei der Blei-Säure Chemie um 50 % während die Reduktion bei der LFP-Technologie unter 10 % beträgt. Diese deutlich geringere Stromabhängigkeit der entnehmbaren Kapazitäts- oder Energiemenge bei LFP-Batterien ermöglicht es die Regelstrategie im Energiemanagement rein SOC-abhängig zu gestalten. Es ist keine komplexe Prädiktion des verfügbaren Energieinhalts aufgrund der zu erwartenden Bordnetzströme notwendig, wie es bei der Blei-Säure-Batterie der Fall wäre.

Ladeverhalten

Weitere Unterschiede ergeben sich auch beim Laden der Batteriespeicher. Gemäß [5] erfolgt die optimale Ladung der Blei-Säure-Batterie mit temperaturabhängiger Ladespannung um Alterungseffekten wie vorzeitigem Wasserverlust oder Korrosion vorzubeugen. Eine Lebensdauerbeeinflussung durch eine temperaturabhängige Ladespannungsbegrenzung konnte bei Lithium-Ionen-Batterien bislang nicht beobachtet werden. Laut den Herstellerangaben für verschiedene LFP Zellen liegt die temperaturunabhängige Ladespannung bei Dauerladung bei 3.6 V. Dies führt für Dauerladungen zu einer Spannungshöchstgrenze bei vier seriell verschalteten Zellen von 14.4 V.

Dynamische Ladeakzeptanz

Einen weiteren entscheidenden Unterschied beim Betrieb der Energiespeicher im Fahrzeug stellt die Stromaufnahmefähigkeit der Speicher dar. Durchgeführte Messreihen zur Ladeakzeptanz bestätigen die in [6; 7; 8] dargestellten Untersuchungen (siehe auch Abbildung 1). Die Ladeakzeptanz von Blei-Säure-Batterien hängt dabei neben den zu erwartenden Faktoren wie SOC und Temperatur, im Gegensatz zur Lithium-Ionen-Technologie, auch entscheidend von der kurzzeitigen Vorgeschichte des Speichers ab. Es zeigt sich eine besonders niedrige Ladeakzeptanz bei einer vorgehenden Ladephase und vorausgehendem niedrigem SOC-Hub.

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1

AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -



Diese zwei Betriebsfälle treten bei konventionellen Fahrzeugen häufig auf und beeinflussen die Ladeakzeptanz zusätzlich negativ.

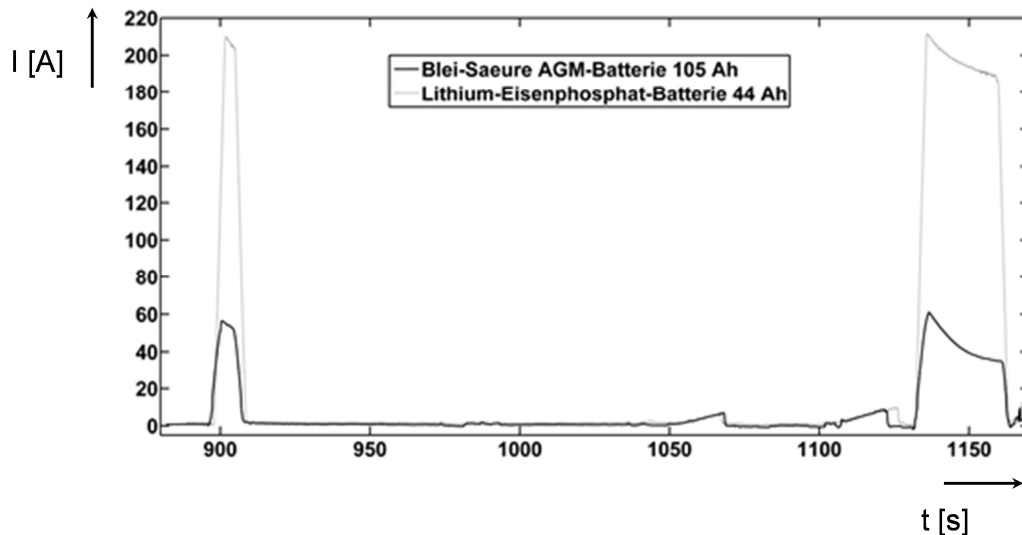


Bild 6: Vergleich der Ladeakzeptanz verschiedener Bordnetz Batterien gemäß NEDC bei einem SOC von 85 % einer Temperatur von 25 °C und vorhergehender Ladezustandserhaltung der Batterie – Bordnetzversorgung durch Generator

In Abbildung 6 wird ein Ausschnitt der letzten fünf Minuten aus dem Stromverlauf der Starterbatterie gemäß New-European-Drive-Cycle (NEDC) dargestellt. Die während der Schubphase des Fahrzeugs erhöhte Spannung führt zu einer verstärkten Batterieladung. Während die Blei-Säure-Batterie lediglich in der Lage ist, Ströme von maximal 60 A aufzunehmen, wird die Ladeakzeptanz der LFP-Batterie nur durch die Leistungsfähigkeit des Generators begrenzt. Bei leistungsfähigerem Generator könnte sie durchaus mit größeren Stromstärken geladen werden.

Alterungseinflüsse

Auch hinsichtlich der Pflege zur Vermeidung vorzeitiger Speicher-Alterung unterscheiden sich die untersuchten Zellchemien deutlich. Diverse Untersuchungen (siehe [5; 9; 10]) zeigen, dass die Blei-Säure-Batterie zumindest in periodischen Abständen vollgeladen werden sollte, um die bei Dauerbetrieb in niedrigen Ladezuständen einhergehende Sulfatierung des Blei-Säure Speichers zu vermeiden. Bei auf der LFP-Technologie basierenden Speichern begünstigen hingegen genau diese Betriebsbereiche eines hohen SOC den Alterungsprozess [11], [12]. Insbesondere im Dauerbetrieb und während der Ruhephasen von LFP-Batterien sollte der Betriebsbereich das bis zu einem SOC von 90 % flach verlaufende Ruhespannungsplateau nicht überschreiten.

Der zyklenbedingte Alterungsfortschritt hängt entscheidend von der Zyklientiefe ab, was einen direkten Vergleich der Speicher im Fahrzeugbetrieb erschwert [5]. Dennoch zeigt sich bei den Untersuchungen gemäß [11] eine deutlich erhöhte Lebensdauer hinsichtlich der zyklischen Alterung von LFP-Zellen im Vergleich zu Blei-Säure-Batterien bei der Betrachtung von Vollzyklen.

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -



2. Eingehende Darstellung

2.1 Zusammenfassung - Erzielte Ergebnisse

Der Projektpartner AEV GmbH war im Vorhaben DriveBatterie2015 mit den in der folgenden Tabelle aufgelisteten Teilaufgaben (TA) befasst.

TA	Titel	Arbeitsthemen (AEV GmbH)
1	Anforderungsdefinition und Spezifikation	<input type="checkbox"/> AP1.1: Lastenheft Batterie- Prototyp(en)
2	Systemarchitektur und Simulation	<input type="checkbox"/> AP2.6: Modelle zur Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien
6	Batteriemanagement/ Betriebsstrategien und Algorithmen	<input type="checkbox"/> AP6.6: Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien
8	Erprobung und Validierung	<input type="checkbox"/> AP8.2: Messung Batterieverhalten auf Systemebene <input type="checkbox"/> AP8.5: Messungen Energiemanagement

Tabelle 3: Inhaltliche AEV-Beteiligung DriveBattery2015 – nach Anpassung an Bewilligungsvorgaben (Phase 1 + Phase 2)

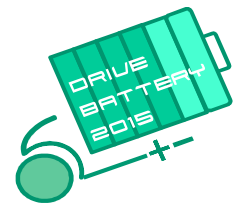
TA 1 **Anforderungsdefinition und Spezifikation**

AP1.1 Lastenheft Batterie-Prototyp(en)

Folgende F+E Arbeiten zur Erstellung des geplanten 12-Volt-Lithium-Ionen Batterie (Lastenheft Batterie-Prototyp(en)) wurden im Verlauf der Phase 1 durchgeführt:

- Erstellung eines Lastenheftes zur Spezifikation für eine Konzeptbatterie mit Li-Ionen-Technologie für das NV-Bordnetz;
- Festlegung Verschaltungskonzept;
- Festlegung BMS
- Festlegung Sicherheitskonzept
- Anforderungsdefinition an einen Steuergerät zur Ladezustandserkennung
- Festlegung freiprogrammierbare Entwicklungselektronik.

Auf der Grundlage der obigen Arbeiten konnten die Planungen für die Fertigstellung des in einer ersten Version benötigten Demonstrators zur Konzeptbatterie im Rahmen der bewilligten Projektlaufzeit abgeschlossen werden.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Der AEV-Demonstrator zielt auf die Systemkomponenten Batterie (12 V Spannungsebene) + Energiemanagement ab. Dieser Demonstrator wurde einem Test in einem AEV-Versuchsfahrzeug unterzogen werden.

Im Detail wurden im Vorfeld der Demonstratordefinition die folgenden F+E Aufgaben in TA 1 bearbeitet:

- Erstellung eines Lastenheftes zur Spezifikation für eine Konzeptbatterie mit Li-Ionen-Technologie für das NV-Bordnetz

Dazu wurden die folgenden Ziele festgelegt:

- ⇒ Stabilisierung und Erhöhung der Zuverlässigkeit
- ⇒ Verlängerung der Lebenszeit
- ⇒ Erhöhung des Rekuperationspotentials.

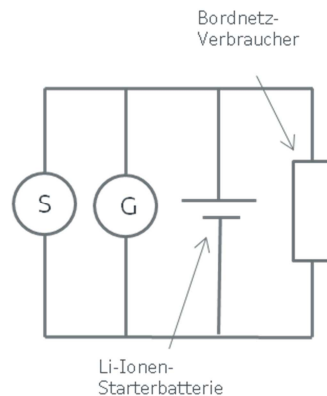


Bild 7: Prinzipbild NV-Bordnetz

- Festlegung Verschaltungskonzept

- ⇒ LFP-Zellen A123 AHR32113 (3.3V & 44 Ah)
- ⇒ Matrixverschaltung der Zellen als 10p4s-System
 - Systemspannung 13.2 V
 - Systemkapazität 44 Ah

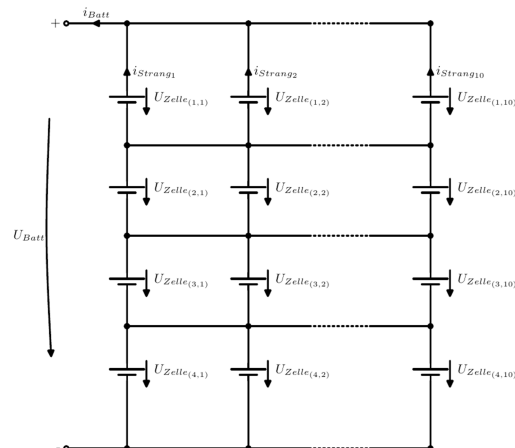
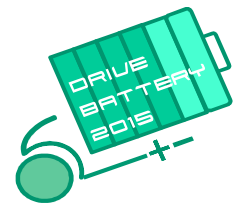


Bild 8: Verschaltungskonzept DB2015-Demonstratorbatterie



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

- ❑ Sicherheitskonzept
 - ⇒ 10 Messpunkte zur Erfassung sicherheitsrelevanter Größen
 - Spannung (4 x Spannungsebenen der Parallelgruppen sowie 1 x im Hauptpfad)
 - Strom (Strommessung über Shunt im Hauptpfad)
 - Temperatur (4 Messpunkte innerhalb der Zellmatrix)
 - ⇒ Relais im Hauptpfad zur Trennung vom Bordnetz im Fehlerfall.

- ❑ Anforderungsdefinition an einen Steuergerät zur Ladezustandserkennung.
 - ⇒ Batteriemanagementsystem (Zell-Ladungsausgleich)
 - ⇒ Automotiv-tauglicher Controller
 - ⇒ Kommunikation (CAN/LIN/XCP)
 - ⇒ Datenlogger.

Im Verlauf der Bearbeitung des TA 1 (Konzeptphase) wurden für die freiprogrammierbare Entwicklungselektronik zur Analyse des Batteriezustandes zusätzlich, basierend auf den obigen Überlegungen, 4 Varianten einer Machbarkeitsanalyse unterzogen.

- ❑ Es waren keine weiteren Schritte in Phase 1 notwendig (TA1 zunächst abgeschlossen; evtl. müssen die Spezifikation(en) der Testumgebung(en) in Phase 2 noch einmal überarbeitet werden)

TA 2 **Systemarchitektur und Simulation**

AP 2.6 Modelle zur Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien

Die Charakterisierung von 12 V Batterien - sowohl der konventionellen Blei-Säure- als auch der neuen Lithium-Ionen-Technologie - dient zur Einbettung in ein *Gesamtfahrzeugsimulationsmodell* für grundlegende Systembetrachtungen und Optimierungsversuche in der *[Model-in-the-Loop]*-Simulation.

Die Gesamtfahrzeugmodell (Audi-Simulationsbaukasten) enthält beispielsweise

- Fahrermodell
- Motormodell
- Generatormodell
- Abbildung der Fahrzeuglängsdynamik.

Zur Validierung des Gesamtfahrzeugmodells mit den neuen Batteriemodellen wurden Fahrzeugversuche auf einem Klimarollenprüfstand mit Hilfe eines Fahrroboters durchgeführt.

Durch das Nachfahren von simulierten Fahrzyklen auf dem Rollenprüfstand, konnte die Übereinstimmung des Modellverhaltens- mit dem Fahrzeugverhalten nachgewiesen werden. Die erfolgreiche Validierung des Gesamtfahrzeugsimulationsmodells erlaubt es, dieses als Grundlage für weitere Untersuchungen heranzuziehen.

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

- Charakterisierung und Modellbildung
 - ❖ 12V Bleibatterie
 - ❖ 12V Lithium-Ionen-Batterie

- Einbettung der Batteriemodelle in ein bereits vorhandenes Audi-Gesamtfahrzeugmodell
- Durchführung simulierter Fahrten unter Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils (u.a. WLTP)

- Validierung der Simulationsergebnisse durch Tests in einem Klimarollenprüfstand (AUDI AG)

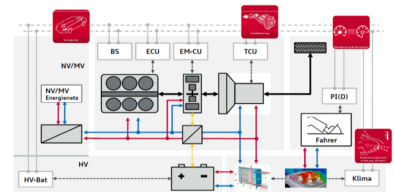
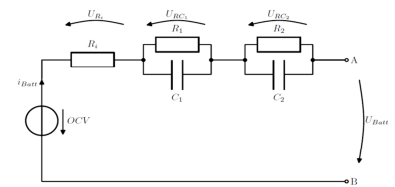


Bild 9: Charakterisierung von 12 V Batterien und Einbettung in ein Gesamtfahrzeugsimulationsmodell

Für die zuvor beschriebene Validierung sowie für weitere Untersuchungen der Ladezustandsbestimmung war eine Lithium-Ionen-Demonstratorbatterie zur Applikation im Fahrzeug notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein Demonstrator aufgebaut. Bei dieser Batterie handelt es sich um eine Verschaltung von Lithium-Eisenphosphatzellen (LiFePo₄-Hochstromzellen). Diese wurden als 10p4s-Verbund in einem Standard-H9-Batteriegehäuse verbaut. Zum sicheren Betrieb wurde im Batteriedeckel ein seriennahes Fahrzeugsteuergerät verbaut. So übernimmt die freiprogrammierbare Elektronik neben dem Ladungsausgleich zwischen den Parallelengruppen auch die Sicherheitsüberwachung der Batterie. Um möglichst realitätsnahe Verhältnisse zu erzielen wurden in dem Demonstrator ein automotive-geeigneter Prozessor eingesetzt. Durch ein Relais kann im Fehlerfall das Zellpaket von den Polen getrennt werden und die Batterie in einen sicheren Zustand versetzen. Für die Sensoren wurde aus Zeitgründen auf bereits getestete und vorhandene Komponenten zurückgegriffen. Des Weiteren erfolgte die Validierung der Batteriemodelle durch einen Modell-Systemvergleich (siehe Bild unten).

- Inbetriebnahme eines ersten Demonstrators einer 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterie
 - ❖ LiFePo₄
 - ❖ 10p4s
 - ❖ 44 Ah

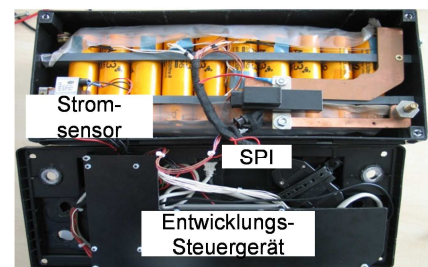
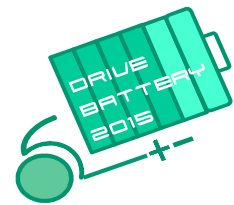


Bild 10: Demonstrator 12 V Lithium-Ionen-Starterbatterie (Phase 1)

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -



- Vergleich der Simulationsergebnisse des Batteriemodells mit gemessenen Größen
 - ❖ Vorgegebene Größe für das Gesamtfahrzeugmodell mit dem neuen Batteriemodell ist ein Geschwindigkeitsprofil

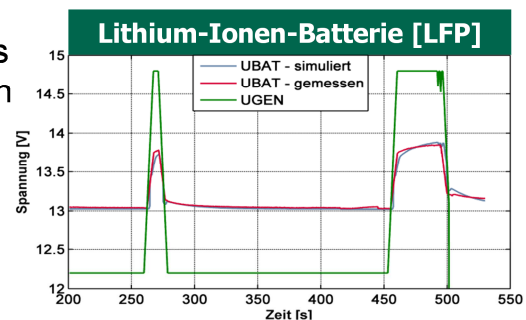


Bild 11: Validierung Demonstratorverhalten mittels Vergleich Messung/Simulation

TA 6 Batteriemangement/Betriebsstrategien und Algorithmen

AP 6.6 Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien

Eine neue Methode zur Ladezustandsbestimmung von Lithium-Eisenphosphatzellen wurde erarbeitet. Da bewährte Methoden, wie zum Beispiel das Kalman-Filter oder der Zustandsbeobachter speziell für die hier verwendete Zellchemie (LiFePo4-Hochstromzellen) an ihre Grenzen stoßen, wird hier der Ladezustand aus den Impedanzen im Frequenzbereich bestimmt. Hierzu werden die ladezustands-spezifischen Impedanzortskurven mittels der Verwendung von Support-Vector-Machine klassifiziert. Im Anschluss daran werden die im Fahrzeug gemessenen Impedanzen den klassifizierten Impedanzortskurven zugewiesen (Klassierung) und können auf diese Weise so dem entsprechenden Ladezustand zugeordnet werden. Ein erstes *|ProofOfConcept|* konnte die Eignung des Verfahrens unter bestimmten Rahmenbedingungen nachweisen. Zu den wichtigsten, zu beachten Rahmenbedingungen zählt unter anderem die Güte der im Fahrzeug gemessenen Impedanzen.

- Im Frequenzbereich angewendetes Verfahren zur Ladezustandserkennung von Li-Ion-Batterien mittels Support Vector Machine (SVM)
 - ❖ Klassifikation der Impedanzortskurven bei verschiedenen Ladezuständen
 - ❖ Ladezustandsbestimmung durch Klassierung von gemessenen Impedanzen via SVM-Suche mittels binärem Suchbaum

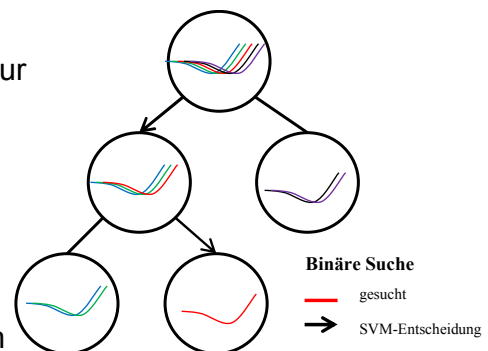


Bild 12: Ladezustandserkennung mittels SVM

- Klassierungsrate bei statistischer Absicherung mehrerer zu klassierender Impedanzen
 - ❖ Sichere Ladezustandsbestimmung bei mehreren zu klassierenden Impedanzen
 - ❖ Fehlertoleranz von ~ 10 % Abweichung
 - ❖ Optimale Ergebnisse bei einem Polynomgrad der SVM von 5 - 7

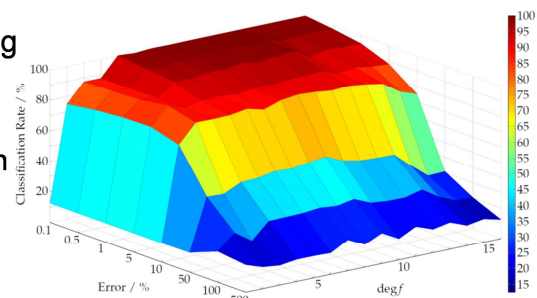


Bild 13: Klassierungsrate in Abhängigkeit vom SVM-Polynomgrad und dem Impedanzfehler



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMWi-Bibliothek -

Übergeordnetes Ziel im Teilvorhaben ist es das Energiemanagement für Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Starterbatterie hinsichtlich Systemsicherheit und Effizienz zu optimieren. Der erste Schritt war es daher in Phase 1, ein vorhandenes Serien-Energiemanagement im Hinblick auf dieses Ziel zu analysieren. Es wurden in Phase 1 die Aufgaben, Ziele und Einflussmöglichkeiten des Energiemanagements genau analysiert um die benötigte Basis für weitere Optimierungen zu schaffen.

Zur Analyse der Auswirkungen von Parameter- und Signalveränderungen im Serien-Energiemanagement wurde das Energiemanagement in ein Längsdynamik-Modell für Gesamtfahrzeug auf MATLAB-Simulink Basis integriert. Mit dieser der *Model-in-the-Loop*-Methode (siehe AP 2.6) war es möglich, die Wirksamkeit der neu gestalteten und auf die Eigenschaften der Lithium-Ionen-Technologie zugeschnittenen Regelungsstrategien, via Simulation nachzuweisen.

- Analyse eines aktuellen im Serieneinsatz befindlichen Energiemanagements
- Integration des Energiemanagements in ein Fahrzeugsimulationsmodell

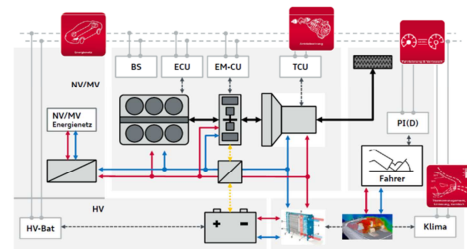
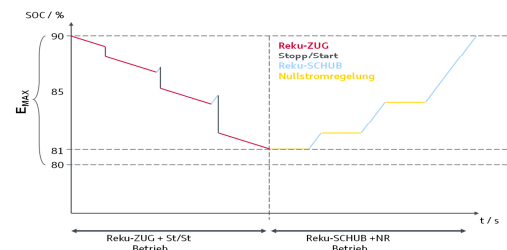


Bild 14: Integration Energiemanagement in ein Längsdynamik-Modell für Gesamtfahrzeug auf MATLAB-Simulink Basis

- Erstellung eines Konzepts für eine neue Regelungsstrategie zur Erhöhung der Effizienz des Fahrzeuges
- Funktionsnachweis in einer Simulation



- Aufbau und Inbetriebnahme eines RCP-Systems

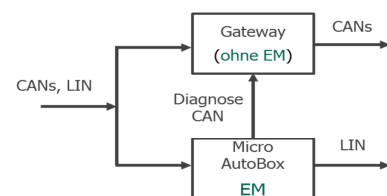
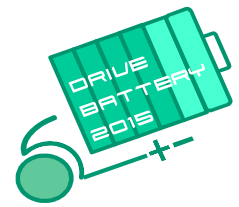


Bild 15: Nachweis der Eigenschaften von auf Lithium-Ionen-Technologie angepasste Regelungsstrategien via Simulation und Aufbau des zu gehörigen RCP-Systems



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Um die Potentiale der Lithium-Ionen-Starterbatterie nutzen zu können bieten sich verschiedene Regelungskonzepte an, von denen hier eine exemplarisch vorgestellt werden sollen. Durch die verbesserte Zyklenfestigkeit und Ladeakzeptanz der Lithium-Ionen-Batterie ist es möglich einen gewünschten Ladezustand während des Fahrtbetriebs gezielt und in kurzer Zeit anzufahren. Diese Funktion wird hier als *prädiktive SOC-Regelung* bezeichnet werden. Für die prädiktive SOC-Regelung muss zurzeit die Fahrtstrecke bekannt sein (Navigationsdaten); der SOC für den Start- und den Zielzustand soll identisch sein. Die in der Batterie gespeicherte Energie wird so genutzt, dass der Kraftstoffverbrauch und somit der CO₂-Ausstoß minimiert werden kann.

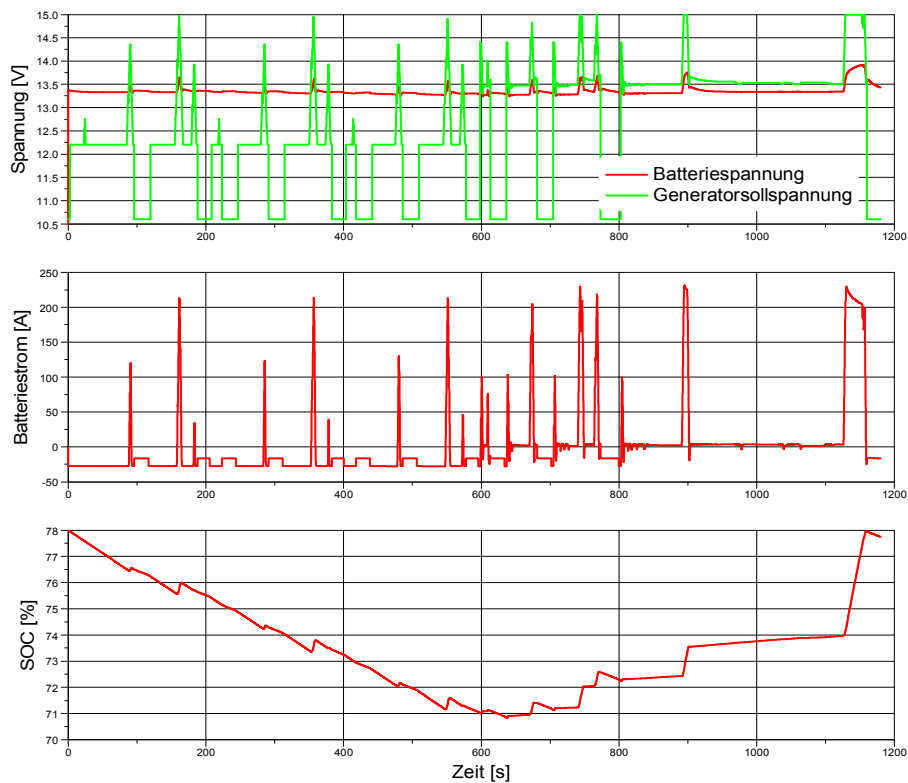


Bild 16: Umsetzung des EM mittels Simulation (Beispiel: Prädiktive SOC-Regelung)

Fahrzyklus	Blei-Batterie/ Standard-EM [l/100km]	Lithium-Batterie/ Optimiertes EM [l/100km]	Einspar- Potential [%]
NEFZ	5.922	5.860	1.44
WLTP	6.018	5.960	1.66
Audi-Land	6.592	6.453	2.1

Bild 17: Simuliertes Kraftstoff-Einsparpotential bei Einsatz einer Li-Ionen-Batterie mit optimiertem Energiemanagement

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Entsprechend dem vorab bewerteten Energieverbrauch durch die Bordnetzverbraucher, im Vergleich zu dem durch Rekuperation speicherbaren Energiebedarf, wird eine Energiebilanzierung durchgeführt.

Abhängig vom Ergebnis der Bilanzierung wird der Speicher in geeigneten Phasen geladen oder entladen, um einen vorher bestimmten SOC zu erreichen oder die SOC-Neutralität zu wahren. Durch die bessere Ladefähigkeit der Lithium-Ionen-Batterie ist es möglich die Generatorleistung während des Fahrbetriebs zu drosseln und somit den Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß zu minimieren. Dabei ergibt sich ein mittels Simulation ermitteltes Einsparpotential von bis zu 2 %.

AP 6.6 Batteriedemonstrator – M18

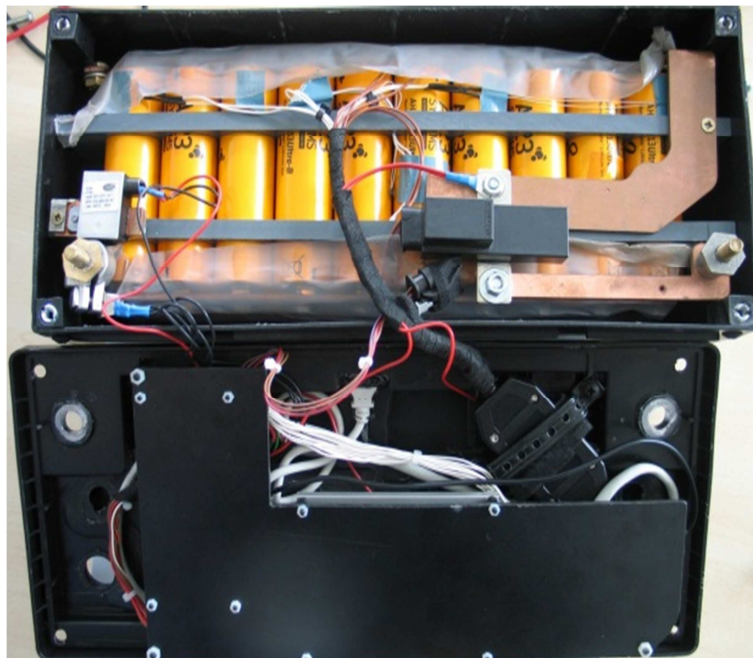
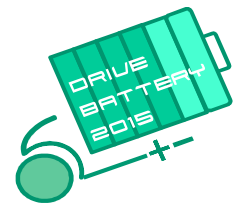


Bild 18: M18-Demonstrator (12 V Lithium-Ionen-Starterbatterie - LiFePo₄/10p4s/44Ah)

Der geplante AEV-Demonstrator zielt auf die Systemkomponenten Batterie (12 V Spannungsebene) + Energiemanagement ab. Dieser Demonstrator wurde in einem ersten Test (vor M 18) in einem AEV-Versuchsfahrzeug unterzogen.

Die Planungen für die Fertigstellung der benötigten Zuarbeiten für den Demonstrator zur Konzeptbatterie wurden an den Ergebnissen aus TA1 orientiert. Bei der Planung wurde darauf geachtet, dass für die rechtzeitige Fertigstellung der Demonstratoren (HW/SW) ein entsprechender zeitlicher Vorlauf benötigt wird.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

In Bild 22 wird der Demonstrator mit LiFePo₄-Hochleistungszellen und einem Steuergerät mit Automotive-Prozessor gezeigt. Es wird ein automotiv-tauglicher Prozessor verwendet um möglichst realitätsnahe Verhältnisse abbilden zu können. Die Batterie verfügt wie geplant Stromsensor und ein Relais zur Notabschaltung und sowie eine Schmelzsicherung. Das Steuergerät wurde so ausgelegt das die benötigten Daten, wie Strom, vier Spannungswerte und vier Temperaturwerte im Fahrbetrieb erfasst und aufgezeichnet werden können. Zusätzlich können auf dem Steuergerät die in DB2015 erforschten neuen SOC/SOH-Algorithmen implementiert und getestet werden. Das Steuergerät kann alle Signale verarbeiten, die auch ein in Serie befindliches Blei-Batterie-BMS erzeugt.

Im Detail wurde die Spezifikation aus TA 1 wie folgt umgesetzt:

❑ Festlegung Batteriezellen

Zellspezifikation AHR32113 Ultra B	
Hersteller	A123 Systems
Bezeichnung	AHR32113 Ultra B
Zellchemie	LiFePO ₄
Abmessungen	ø32×113
Nominalkapazität	4,4 Ah
Energieinhalt	14,6 Wh
Entladeleistung	550 W
Nominalspannung	3,3 V
Spezifische Leistung	2700 W/kg
Spezifische Energie	71 Wh/kg
Betriebstemperatur	-30°C bis 55°C



Bild 19: Zellspezifikation für Batterie-Demonstrator (AEV-Teilvorhaben)

❑ Festlegung Batteriepack (siehe auch Bild <>)

Spezifikation Batteriepack	
Zelltyp	AHR32113 Ultra B
Verschaltung	10p4s (Matrix)
Zellenanzahl	40 St.
Nominalkapazität	44 Ah
Nominalspannung	13,2 V

Bild 20: Batteriepack-Spezifikation für Batterie-Demonstrator (AEV-Teilvorhaben)

Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

- ❑ Festlegung konstruktiver Aufbau

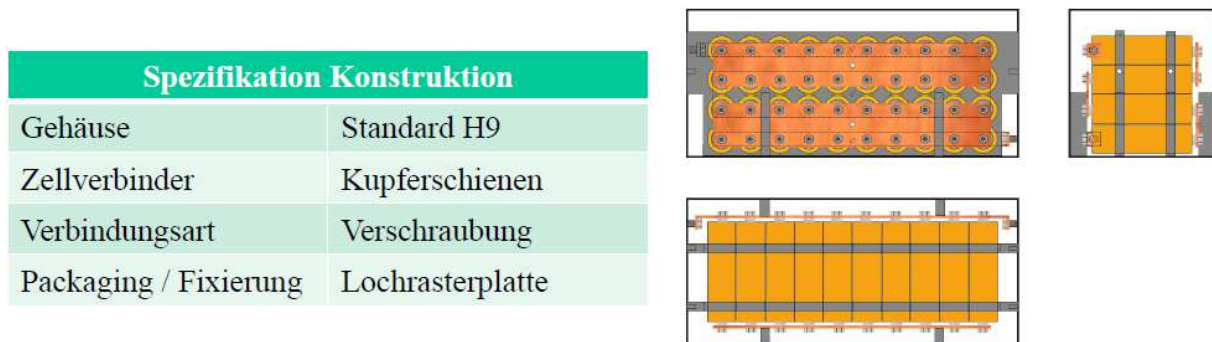


Bild 21: Konstruktiver Aufbau für Batterie-Demonstrator (AEV-Teilvorhaben)

- ❑ Festlegung Batteriemanagementsystem

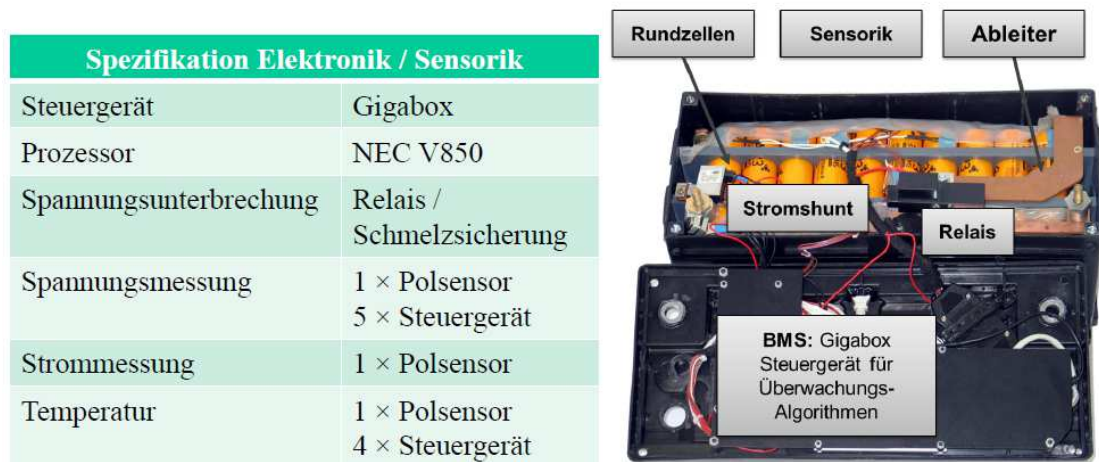


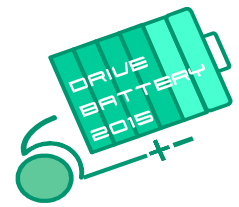
Bild 22: BMS-Eigenschaften für Batterie-Demonstrator (AEV-Teilvorhaben)

TA 8 Erprobung und Validierung

AP 8.2 Messung zur Bestimmung des Verhaltens von Batterie und Energiemanagement auf System- und Fahrzeugebene

Messung Batterieverhalten auf Systemebene

Um die Wirksamkeit der mittels Simulation erarbeiteten Konzepte auch im Fahrzeug nachweisen zu können, wurde ein Rapid-Control-Prototyping System (RCP) aufgebaut und in ein Fahrzeug integriert. Dieses System besteht aus einem echtzeitfähigen Rechner auf dem die optimierten Algorithmen des neuen Energiemanagements laufen. Zugleich ist es notwendig ein spezielles Gateway-Steuergerät im Fahrzeug zu verbauen, auf dem die Serien-Energiemanagement-Signale gesperrt werden um eine Signaleindeutigkeit zu gewährleisten.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Um einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen sicherstellen zu können, war es außerdem notwendig das Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand zu betreiben. Damit konnte ein valider Vergleich der untersuchten Verbrauchszyklen zwischen Simulations- und Fahrzeugergebnissen sichergestellt werden.

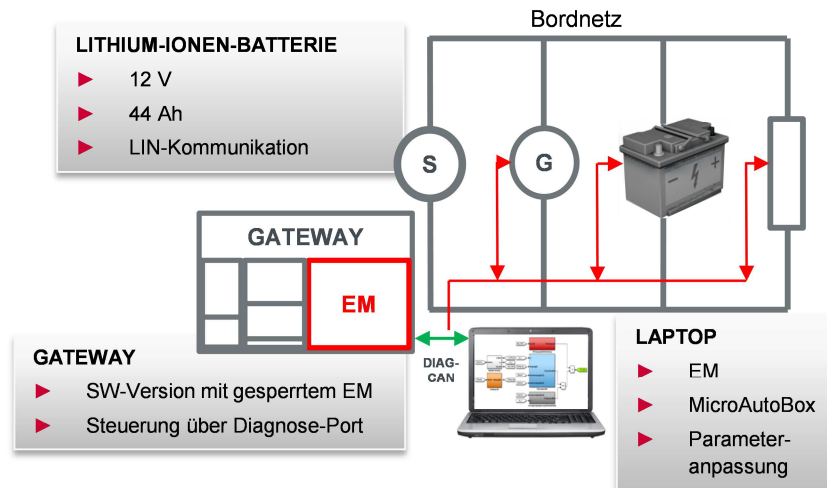


Bild 23: Implementierung des mittels Simulation optimierten Energiemanagements in ein Fahrzeug mit RCP-System (siehe auch AP 6.6)

Messungen Energiemanagement (Teil 1 – Phase 1)

Die Messung auf einem Rollenprüfstand ermöglicht einen umfangreichen Vergleich des herkömmlichen Energiemanagements mit Blei-Säure-Batterie und des optimierten Energiemanagements mit Lithium-Ionen-Batterie ohne den Einfluss von Fahrer oder Verkehrssituation.

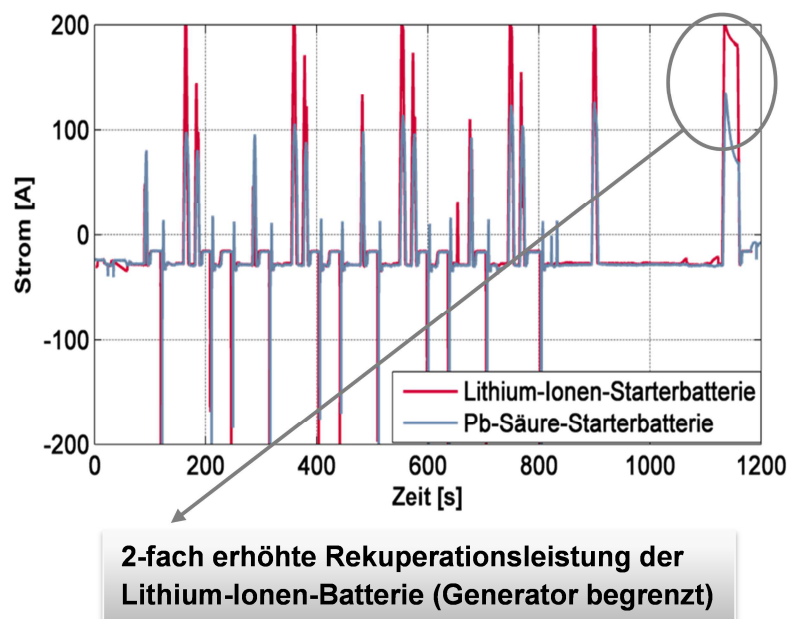


Bild 24: Messung Batterieverhalten - Beispiel: Stromverlauf für NEDC-Modus (Positive Ströme: Batterie wird geladen)



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Aus dem zeitlichen Verlauf des Batteriestroms über einen Fahrzyklus ist sehr gut zu erkennen, dass die Lithium-Ionen-Batterie im Gegensatz zur Blei-Säure-Batterie den kompletten vom Generator in Rekuperationsphasen bereitgestellten Strom sowie die komplette zw. Ladungsmenge aufnehmen kann. Eine Vergrößerung der Generatorleistung würde dabei noch weiteres Potential ermöglichen. Ebenfalls nachweisbar ist die Effektivität der Tieftemperatur-Stromregelung für Lithium-Ionen-Batterien. Durch die hohe Empfindlichkeit von Lithium-Ionen-Zellen gegenüber hohen Ladeströmen bei Kälte ist es notwendig von einer reinen Spannungsregelung beim herkömmlichen Energiemanagement auf eine Stromregelung bei tiefen Temperaturen umzustellen. Die bisherigen Energiemanagement-Algorithmen wurde daher um eine Stromregelung erweitert und zu Testzwecken an den Stromvorgaben des hier ausgewählten Zellherstellers ausgerichtet.

Der Vergleich bei Betrieb von -10°C zeigt eine Stromreduktion von über 60 A und trägt entscheidend zu einer Lebensdauererweiterung der Lithium-Ionen-Batterie bei.

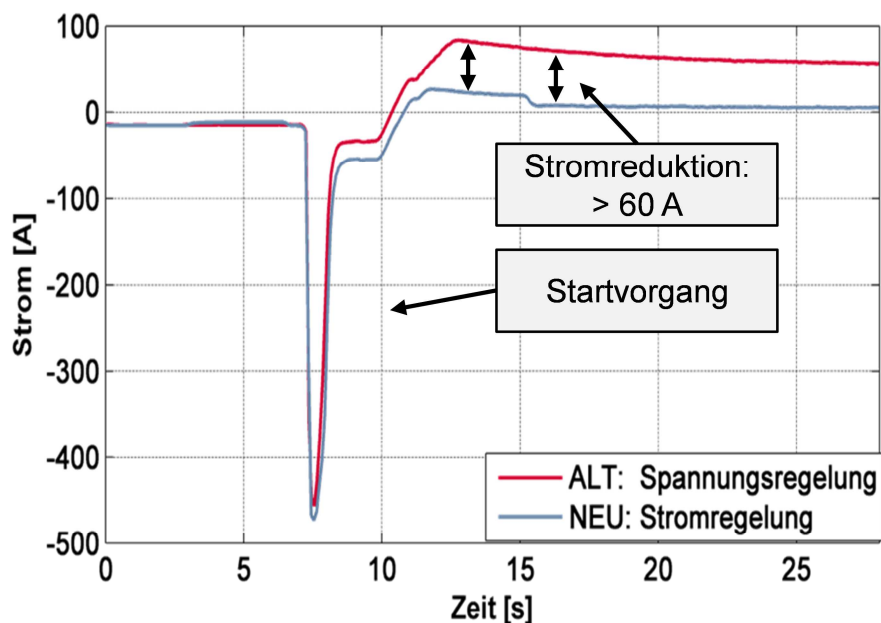
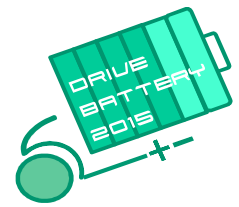


Bild 25: Funktionsnachweis EM - Beispiel: Stromregelung Tieftemperatur (-10°C)



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

2.2 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Basierend auf den im Teilvorhaben erreichten F+E Ergebnissen wurden die nachfolgend aufgelisteten internen und externen Präsentationen erstellt.

Vorträge

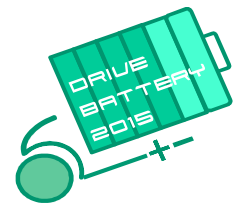
- [1] P. Jansen⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; D. Renner⁽¹⁾; W. John⁽²⁾; J. Götze⁽³⁾; *Impedanzortskurvenklassifikation zur Ladezustandserkennung von Lithium-Eisenphosphat-Batterien mittels Support Vector Machine*; Kleinheubacher Tagung 2014 (U.R.S.I. Landesausschuss in der Bundesrepublik Deutschland e.V.) - 29. September 2014 - 1. Oktober 2014; Miltenberg – Germany; (1) Audi Electronics Venture GmbH/Gaimersheim - (2) SiL GmbH Paderborn/Leibniz Universität Hannover (TET) – (3) Technische Universität Dortmund (AG DAT)
- [2] D. Renner⁽¹⁾; Xiangfeng Zhang⁽¹⁾; P. Jansen⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; W. John⁽²⁾; St. Frei⁽³⁾; *Optimierte Betriebsstrategien zur Steigerung von Energieeffizienz und Sicherheit durch kombinierte Systembetrachtung von Bordnetz und Batterie*; Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement (EEHE); 22. - 23. 4. 2015; Bad Boll;

Poster-Präsentationen

- [1] P. Jansen; *Neuartige Ladezustandserkennungsmethoden für Lithium-Ionen-Batterien*; Pro-Motion Day 2014 (Audi Doktorrandennetzwerk) - AUDI AG; 10. Dezember 2014 - Ingolstadt - Germany
- [2] D. Renner; *Optimierung des Energiemanagements für Lithium-Ionen-Starterbatterien*; Pro-Motion Day 2014 (Audi Doktorrandennetzwerk) - AUDI AG; 10. Dezember 2014 - Ingolstadt - Germany
- [3] P. Jansen⁽¹⁾; Michael Vollnhals⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; D. Renner⁽¹⁾; J. Götze⁽²⁾; *Concept of Relative Ageing Recognition on Lithium ion Cells for State of Charge Determination via Support Vector Machine*; 7. internationale Fachtagung Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung; 27. - 29.04.2015; Aachen; <http://www.battery-power.eu>; 1 Audi Electronics Venture GmbH - Gaimersheim; 2: Technische Universität Dortmund (AG DAT)
- [4] D. Renner⁽¹⁾; P. Jansen⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; A. Sapadinski⁽²⁾; St. Frei⁽²⁾; *Comparison of the Dynamic Charge Acceptance of Different Electrical Systems during Standardized Driving Cycles*; 7. internationale Fachtagung Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung; 27. - 29.04.2015; Aachen; <http://www.battery-power.eu>; 1 Audi Electronics Venture GmbH – Gaimersheim; 3: Technische Universität Dortmund (AG DAT)

Veröffentlichungen

- [1] P. Jansen⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; D. Renner⁽¹⁾; W. John⁽²⁾; J. Götze⁽³⁾; *Impedance Spectra Classification for Determining the State of Charge on a Lithium Iron Phosphate Cell using a Support Vector Machine*; Advances in Radio Science (ARS), 13, 1 - 6, 2015; www.adv-radio-sci.net/13/1/2015/; doi:10.5194/ars-13-1-2015; (1) Audi Electronics Venture GmbH/Gaimersheim - (2) SiL GmbH Paderborn/Leibniz Universität Hannover (TET) – (3) Technische Universität Dortmund (AG DAT)
- [2] D. Vergossen⁽¹⁾; W. John⁽²⁾; *Auslegung von 12-V-Starterbatterien mit Lithium-Ionen-Zellen*; Handbuch Elektromobilität 2015; EW Medien und Kongresse Buchverlag - Essen; ISBN 978-3-8022-1251-2; (1) Audi Electronics Venture GmbH/Gaimersheim - (2) SiL GmbH Paderborn
- [3] D. Renner⁽¹⁾; Xiangfeng Zhang⁽¹⁾; P. Jansen⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; W. John⁽²⁾; St. Frei⁽³⁾; *Optimierte Betriebsstrategien zur Steigerung von Energieeffizienz und Sicherheit durch kombinierte Systembetrachtung von Bordnetz und Batterie*; Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement (EEHE); 22. - 23. 4. 2015; Bad Boll; Tagungsband: Electric & Electronic Systems in Hybrid and Electrical Vehicles and Electrical Energy Management (EEHE 2015), Bad Boll, 22./23. April 2015.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1

AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

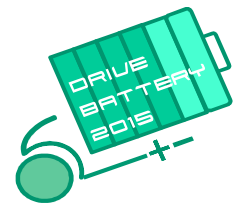
3. Literaturverzeichnis

Literatur: Simulation des elektrischen Verhaltens von Batterien

- [1] Sauer, D. U.; Bopp, G.; Jossen, A.; Garche, J.; Rothert, M. & Wollny, M.; State of Charge - What do we really speak about; *INTELEC'99, Tagungsband*, 1999
- [2] Piller, S.; Perrin, M. & Jossen, A.; Methods for state-of-charge determination and their applications, *Journal of Power Sources*, 2001, 96, 113-120
- [3] Thele, M.: A contribution to the modelling of the charge acceptance of lead-acid batteries – using frequency and time domain based concepts, *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diss.*, 2009
- [4] Roscher, M. A.: Zustandserkennung von LiFePO₄-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diss.*, 2010
- [5] Johnson, D. H.: Scanning Our Past - Origins of the Equivalent Circuit Concept: The Voltage-Source Equivalent, *Proceedings of the IEEE*, 2003
- [6] Lunze, J.: Regelungstechnik 1, *Springer Verlag*, 2010, 8, 729
- [7] Unbehauen, R.: Systemtheorie 1, *Oldenbourg Wissenschaftsverlag*, 2002
- [8] Lee, J.; Nam, O. & Cho, B.: Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering, *Journal of Power Sources*, 2007, 174, 9–15
- [9] Kim, I.-S.: The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer, *Journal of Power Sources*, 2006, 163, 584–590
- [10] Buller, S.: Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems, *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*, 2003
- [11] Boukamp, B. A.: Electrochemical impedance spectroscopy in solid state ionics: Recent advances, *Solid State Ionics*, 2004, 169, 65–73
- [12] P. Jansen⁽¹⁾; D. Vergossen⁽¹⁾; D. Renner⁽¹⁾; W. John⁽²⁾; J. Götze⁽³⁾; *Impedance Spectra Classification for Determining the State of Charge on a Lithium Iron Phosphate Cell using a Support Vector Machine*; Advances in Radio Science (ARS), 13, 1 - 6, 2015; www.adv-radio-sci.net/13/1/2015/; doi:10.5194/ars-13-1-2015; (1) Audi Electronics Venture GmbH/Gaimersheim - (2) SiL GmbH Paderborn/Leibniz Universität Hannover (TET) – (3) Technische Universität Dortmund (AG DAT)

Literatur: Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien

- [1] J. Liebl; Intelligente Generatorregelung Ein Weg zur Effizienten Dynamik; *ATZ elektronik*, vol. 04/2008, pp. 6–15, 2008.
- [2] E. Karden, P. Shinn, P. Bostock, J. Cunningham, E. Schoutz, and D. Kok; Requirements for future automotive batteries – a snapshot; *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 505–512, 2005.
- [3] M. J. Schindler; Mehr Batteriesysteme für Mikro-Hybrid Fahrzeuge auf Basis von Blei-Säure und Lithium-Ionen-Technologie. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2014.
- [4] H. Budde-Meiwes, D. Schulte, J. Kowal, D. U. Sauer, R. Hecke, and E. Karden; Dynamic charge acceptance of lead-acid batteries: Comparison of methods for conditioning and testing; *Journal of Power Sources*, vol. 207, pp. 30–36, 2012.
- [5] M. Thele, J. Schiffer, E. Karden, E. Surewaard, and D. U. Sauer; Modeling of the charge acceptance of lead-acid batteries; *Journal of Power Sources*, vol. 168, no. 1, pp. 31–39, 2007.
- [6] S. Schaeck, A. O. Stoermer, F. Kaiser, L. Koehler, J. Albers, and H. Kabza; Lead-acid batteries in micro-hybrid applications. Part I. Selected key parameters; *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 3, pp. 1541–1554, 2011.
- [7] D. U. Sauer; Optimierung des Einsatzes von Blei-Säure-Akkumulatoren in Photovoltaik-Hybrid-Systemen unter spezieller Berücksichtigung der Batteriealterung; *Dissertation Technische Universität Ulm*, 2003.
- [8] D. U. Sauer, E. Karden, B. Fricke, H. Blanke, M. Thele, O. Bohlen, J. Schiffer, J. B. Gerschler, and R. Kaiser; Charging performance of automotive batteries - An underestimated factor influencing lifetime and reliable battery operation; *Journal of Power Sources*, vol. 168, no. 1, pp. 22–30, 2007.
- [9] M. Roscher; Zustandserkennung von LiFePO₄-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge; *Herzogenrath: Shaker*, 2011.
- [10] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and A. Hammouche; Ageing mechanisms in lithium-ion batteries; *Journal of Power Sources*, vol. 147, no. 1-2, pp. 269–281, 2005.



Abschlussbericht - DriveBattery2015 Phase 1 AEV GmbH - 03 ET6003 I

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMW-Bibliothek -

Ergänzende Literatur

- [1] Codeca, F.; Savaresi, S. & Rizzoni, G.: On battery State of Charge estimation: A new mixed algorithm, *IEEE International Conference on Control Applications*, 2008, 102-107
- [2] Plett, G. L.: Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1. Background, *Journal of Power Sources* 134, 2004, S. 262–276
- [3] Plett, G. L.: Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification, *Journal of Power Sources* 134, 2004, S. 262 – 276
- [4] Plett, G. L.: Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 3. State and parameter estimation, *Journal of Power Sources*, 2004, 134, S. 277–292
- [5] Kalman, R. E. & Bucy, R.: New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, *Journal of Power Sources, Journal of Basic Engineering*, 1961, 83, 95-108
- [6] Welch, G. & Bishop, G.: An Introduction to the Kalman Filter; *Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill*, 1997
- [7] S. Büchner, Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen, 1st ed. Göttingen: Cuvillier, 2008.
- [8] A. Uraub, Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion, 2nd ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1994.
- [9] F. Winke and Bargende Michael, "DYNAMISCHE SIMULATION VON STADTHYBRIDFAHRZEUGEN," *Motorzeitung*, vol. 2013, no. 09/2013, pp. 702–709, 2013.
- [10] T. Christ, Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen. Düsseldorf: VDI Fortschrittsberichte, 2006.
- [11] M. J. Schindler; Mehr Batteriesysteme für Mikro-Hybrid Fahrzeuge auf Basis von Blei-Säure und Lithium-Ionen-Technologie. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2014
- [12] S. Schaeck, A. O. Stoermer, F. Kaiser, L. Koehler, J. Albers, and H. Kabza; Lead-acid batteries in micro-hybrid applications (Part I; Selected key parameters); *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 3, pp. 1541 – 1554, 2011
- [13] M. Thele, J. Schiffer, E. Karden, E. Surewaard, and D. U. Sauer; Modeling of the charge acceptance of lead-acid batteries; *Journal of Power Sources*; vol. 168, no. 1, pp. 31 - 39, 2007
- [14] EN 50342-1; *Blei-Akkumulatoren-Starterbatterien/Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen*; 2006
- [15] Madeleine Ecker, Jochen B. G.; *Development of a Lifetime Prediction Model for Lithium-Ion Batteries based on Extended Accelerated Aging Test Data*; *Journal of Power Sources* 215 (2012), S. 248–257
- [16] D. Vergossen; W. John; D.-U. Sauer; *Entwurf von 12-V-Starterbatterien mit Lithium-Ionen-Zellen*; Handbuch Elektromobilität 2014; VDE Verlag 2014
- [17] Álvarez Antón, J. C., García Nieto, P. J., Viejo, C. B., and Vilán Vilán, J. A.: Support Vector Machines Used to Estimate the Battery State of Charge, *IEEE Trans. Power Electro.*, 28, 5919– 5926, 2013.
- [18] Cortes, C. and Vapnik, V.: Support-vector networks, *Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 20, 273–297, 1995.
- [19] Cover T. M. and Hart P. E.: Nearest Neighbor Pattern Classification, *IEEE T. Inform. Theory*, IT-13, 1, 21–27, 1967
- [20] Dudani S. A.: The Distance-Weighted k-Nearest-Neighbor Rule, *IEEE T Syst. Man. Cyb.*, SMC-13, 325–327, 1976.
- [21] Hearst, M., Dumais, S., Osuna, E., Platt, J., and Schölkopf, B.: Support vector machines, *IEEE Intell. Syst. App.*, 13, 18–28, 1998.
- [22] Hu, J., Hu, J., Lin, H., Li, X., Jiang, C., Qiu, X., and Li, W.: State-of-Charge Estimation for Battery Management System Using Optimized Support Vector Machine for Regression, *J. Power Sour.*, 269, 682–693, doi:10.1016/j.jpowsour.2014.07.016, 2014.
- [23] Klotz, D., Schönleber, M., Schmidt, J., and Ivers-Tiffée, E.: New approach for the calculation of impedance spectra out of time domain data, *Electrochim. Acta*, 56, 8763–8769, 2011.
- [24] Lee, J., Nam, O., and Cho, B.: Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering, *J. Power Jour.*, 174, 9–15, 2007.
- [25] Piller, S., Perrin, M., and Jossen, A.: Methods for state-of-charge determination and their applications, *J. Power Jour.*, 96, 113– 120, 2001.
- [26] Weng, C., Cui, Y., Sun, J., and Peng, H.: On-board state of health monitoring of lithium-ion batteries using incremental capacity analysis with support vector regression, *J. Power Jour.*, 235, 36– 44, 2013.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN - ISSN geplant -	2. Berichtsart - Schlussbericht -
3. Titel DriveBattery2015 Phase I - Intelligente Steuerungs- und Verschaltungskonzepte für modulare Elektrofahrzeug-Batteriesysteme zur Steigerung der Effizienz und Sicherheit sowie zur Senkung der Systemkosten; Teilvorhaben AEV: Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen Starter- und Bordnetz-Batterien.	
4. Autor(en) Dipl.-Ing. (TU) D. Vergossen/M. Sc. Patrick Jansen/ Dipl.-Ing. (TUM) Daniel Renner	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30. April 2015
	6. Veröffentlichungsdatum 30. November 2015
	7. Form der Publikation Technischer Bericht
8. Durchführende Institution Audi Electronics Venture GmbH Sachsstraße 20 85080 Gaimersheim	9. Berichts-Nr. <i>Durchführende Institution</i> - entfällt -
	10. Förderkennzeichen 03 ET6003 I
	11. Seitenzahl 36
12. Fördernde Institution Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 10115 Berlin	13. Literaturangaben 58
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 33
16. Zusätzliche Angaben - entfällt -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) - entfällt -	
18. Kurzfassung Das wesentliche DB2015-Ziel besteht darin, die bisherigen Schwächen von Elektrofahrzeugen: Reichweite, Kosten & Alltagstauglichkeit, batterieseitig zu überwinden. Mittels einer ganzheitlichen Betrachtung von Batteriesystemen werden u.a. neue, intelligente Steuerungs- und Verschaltungskonzepte für modulare Fahrzeug-Batteriesysteme zur Steigerung von Effizienz, Sicherheit und Lebensdaueranforderungen bei gleichzeitiger Senkung der Systemkosten erforscht. Die AEV setzt sich in diesem Vorhaben mit der Erforschung von neuen Verfahren zur effizienten Anpassung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien auseinander (z.B. MikroHybrid mit Rekuperation). Es werden u.a. die folgenden Teilthemen erforscht: Neue und verbesserte Verfahren und Methoden zur SOC-Bestimmung; Charakterisierung der Modelle für ausgewählte Zelltypen (z.B. prismatische und zylindrische Zelltypen); effiziente Bestimmung des Lade-/Entladeverhaltens dieser Zelltypen; Aufbau einer Testhardware inklusive Adaption der Modelle und der Batteriemangement-Module an eine ausgewählte Zielhardware. Die Bereitstellung von innovativen und technologie-gestützten, modularen Konzepten für das Batterie- und Energiemanagement von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien erhöht die Anwendungs-Flexibilität. Ein weiteres Ziel besteht darin, nicht die Batterieelektronik und -Software an das Fahrzeug-Batteriemangement angepasst werden. Vielmehr muss dieses an unterschiedliche Batterieeigenschaften (z.B. auch für die Kombination einer Lithium-Ionen-Batterie mit 12 V Blei-Säure-Batterie) adaptierbar sein.	
19. Schlagwörter Elektromobilität; Lithium-Ionen-Batterien; SOC/SOH; Energiemanagement; Batterieüberwachung; Bordnetzüberwachung; Rekuperation; Modellierung; Elektronik; Validierung; Simulation; Energieeffizienz; Energiesystem; Energietechnik; Messtechnik; Sicherheitstechnik; Verfahrensoptimierung.	
20. Verlag - entfällt -	21. Preis - entfällt -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN - ISSN planned -	2. Type of Document Final Report
3. Title DriveBattery2015 Phase I - Intelligent Concepts for Management and Circuitry of Battery Systems for Electrical Vehicles to Increase Efficiency and Safety, and to Lower System Cost; Subproject AEV: <i>Optimization of Energy Management of Vehicles with Lithium Ion Starter Batteries and On-board Electrical System Batteries.</i>	
4. Author(s) Dipl.-Ing. (TU) D. Vergossen/M. Sc. Patrick Jansen/ Dipl.-Ing. (TUM) Daniel Renner	5. End of Project 30th April 2015
	6. Publication Date 30th November 2015
	7. Form of Publication Technical Report
8. Performing Organization(s) Audi Electronics Venture GmbH Sachsstraße 20 85080 Gaimersheim	9. Originator Report No. - not applicable -
	10. Reference No. 03 ET6003 I
	11. No. of Pages 36
12. Sponsoring Agency Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 10115 Berlin	13. No. of References 58
	14. No. of Tables 3
	15. No. of Figures 33
16. Supplementary Notes - none -	
17. Presented at (Title/Place/Date) - not applicable -	
18. Abstract <p>The essential project target consists of redressing the present weakness of electronic vehicles: range, costs and suitability for daily life, in an approach on the battery side. By use of an integral observation of battery systems, new intelligent control and wiring concepts for modular vehicle battery systems for increasing efficiency, security and durability requirements with simultaneous reduction of system costs will be explored among others.</p> <p>The AEV is working on the research of new methods for the efficient adjustment of energy management of vehicles with lithium-ion batteries (micro-hybrid with recuperation for example). The following sub-themes will be investigated: New and improved methods for SOC determination; characterization of models for selected cell types (prismatic and cylindrical cell types for example); efficient determination of charge/discharge behavior of these cell types; realization of a test hardware including the adaption of the models and the battery management modules for the selected target hardware. The provision of innovative and technology based, modular concepts for the required new battery and energy management of vehicles with lithium ion batteries will enhance the application flexibility. The battery management of a vehicle must be capable of adapting to varying battery characteristics. In the past the battery electronic and software was adapted onto the vehicle battery management. Much more efficient will be the development of a flexible adaption of the vehicle battery management onto different battery characteristics (also for the combination of a 12 V lithium-ion battery with a 12 V lead-acid battery).</p>	
19. Keywords Lithium Ion Batteries; SOC/SOH; Energy Management; Recuperation; Battery Monitoring; Monitoring of On-board Electrical System/Net; Electro Mobility; Electrical Battery; Modelling; Electronic; Validation; Simulation; Energy Efficiency; Energy System; Power Engineering; Measurement Techniques; Safety Technology; Process Optimization.	
20. Publisher - not applicable -	21. Price - not applicable -