

# ions

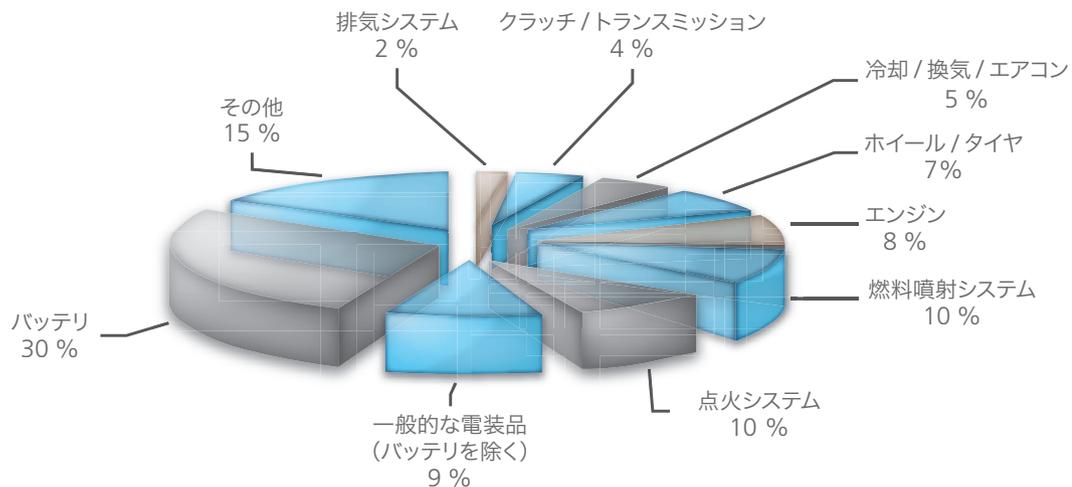
## at the Start

12V リチウムイオンスタータバッテリーのデモンストレータ構築



一般的な車両で使用されている 12V のスタータ用鉛蓄電池は性能的な限界に達しつつあります。最新のスタート/ストップシステム、電装品の増加、機械駆動式コンポーネントの電動化といった動向により、エネルギー貯蔵装置への要求が高まっています。しかし同時に軽量化への要求も満たす必要があり、厳しい制約が課せられます。このような状況の中、リチウムイオンスタータバッテリーの開発は非常に有望なアプローチであると言えます。





2011年に記録された車両故障の約30%が12Vスタータバッテリーに起因(ADACの2011年アセンブリ分析による)

#### スタータバッテリーに対する要求

今日の自動車開発においては、総合的なエネルギー効率の継続的な改善と車両CO<sub>2</sub>排出量の低減が重要な課題となっています。徹底的な構造の軽量化が求められる反面、安全性および快適性機能の充実、従来の機械駆動式コンポーネントの電動化、自動スタート/ストップなどの新機能の導入といった動向により、電気エネルギーへの要求は増加し続けています。これらはすべてバッテリーの負荷を増加させます。さらに、スタート/ストップにおける安定した充放電サイクルや耐久性が要求される一方で、バッテリーそのものにも軽量化が求められます。バッテリーについては、車両故障の原因という観点からも注目されます。ドイツ自動車連盟(ADAC)による2009年度の車両故障要因解析の結果は、全車両故障の約27%がバッテリーによって発生したことを示しています。2011年度の結果によると、バッテリーは記録された全車両故障の約30%に関与しています。つまり、従来のバッテリーは性能的限界に達していると言えます。

#### 代替バッテリーソリューション

車両故障率を下げる1つの方法として、2系統のバッテリー電気系を使用し、電気二重層キャパシタまたは他のバッテリー技術を追加することが考えられます。リチウ

ムイオン(Li-ion)バッテリーは、12V車両スタータバッテリーとして特に魅力的な特性を備えています。

これは、現在利用可能な再充電可能エネルギー貯蔵システムの中では最も高いエネルギー密度を有する技術の1つです。リチウムイオンバッテリーは鉛蓄電池に比べて数倍の充放電サイクル寿命を有し、サイクル安定性の面で要求基準を満たすのみならず、軽量化の面でも要件を満たします。例として、容量92Ahの鉛蓄電池の重量は約26kgあり、20%の放電深度において約400回の充放電サイクルで寿命に達します。同等容量のLi-ionバッテリーの重量は16kgしかなく、同じ20%の放電深度において約15,000回の充放電サイクルが可能です。同等容量で約10kgの軽量化が可能です。これは車両CO<sub>2</sub>排出量に換算すると約0.85gの改善をもたらします。

#### 課題：充電と温度

Li-ionバッテリーは、過放電と過充電に対して非常に敏感であることと、動作温度レンジが制限されることを欠点とします。加えて、温度と運転挙動によって充電要件が変化するという問題も抱えます。たとえば、冬期の短時間の運転ではエネルギー貯蔵システムへの電力要求が最も高くなる反面、充電能力は制限されます。このよ

## 鉛蓄電池の代替技術としてのリチウムイオンバッテリー

鉛蓄電池	Li-Ion
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 寿命：～4年</li> <li>■ 放電深度 20% での充放電サイクル： <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 鉛蓄電池：～400回</li> <li>■ AGM(ガラスマット吸収式バッテリー)：～1000回</li> </ul> </li> <li>■ エネルギー密度：～40 Wh/kg</li> <li>■ 価格：低</li> <li>■ 複雑性：低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 寿命：～15年</li> <li>■ 放電深度 20% での充放電サイクル：15,000回</li> <li>■ エネルギー密度：50-100 Wh/kg</li> <li>■ 価格：現在、鉛蓄電池の5倍</li> <li>■ 複雑性：高(バッテリーマネジメントシステムが必要)</li> </ul>

車両のスタータバッテリーとして使用する場合の鉛蓄電池と Li-ion バッテリーシステムの比較

うな欠点は、運用ストラテジや動作点などを最適化することにより緩和できます。これには電子制御式バッテリーマネジメントシステム (BMS) が非常に効果的です。BMS は、充電状態と温度に応じて充放電電流を制御するなど、さまざまな監視および制御タスクも実行します。さらに、BMS はすべてのセルの充電状態を均一化するためにセルバランシングも実行します。バッテリーは直列に接続された複数のセルにより構成されるため、個々のセルグループで過充電や過放電が生じぬよう、セルバランシングを行ってセルの充電状態を常に均一なレベルに維持する必要があります。

#### スタータバッテリーとトラクションバッテリーの違い

12V スタータバッテリーに対する要件は、電気自動車またはハイブリッド車の高電圧トラクションバッテリーに対する要件とは異なります。スタータバッテリーはエネルギー回収をサポートする必要はありますが、内燃エンジンの始動プロセス中を除けば、高電流を長く供給し続ける必要はありません。また、車両電気システムは比較的低い電流しか要求しません。通常の動作において、スタータバッテリーが完全に放電してしまうことはありません。通常、スタータバッテリーの充電状態は約 95% を保ちます。

#### Li-ion スタータバッテリーシステムの先行開発

Li-ion 型バッテリーシステムの各種コンポーネントを効率的に開発するために、Audi 社は複数のサブプロジェクトを同時に遂行しました。これらのサブプロジェクトには、バッテリー制御電子回路を含むバッテリーデモンストレータ、バッテリーの熱的および電氣的シミュレーションモデル、充電電流の制御アルゴリズム (BMS に統合)、車載ラビッドコントロールプロトタイプピング (RCP) 用のツールチェーンが含まれます。この先行開発は、実際の量産開発を立ち上げる前に量産に適用可能なアプローチと手法を調査および検証することを目的としました。可能な限り多くのアイデアを試して評価できるように試験システムを設計しました。これは、電子制御コンポーネントを含むバッテリーデモンストレータを構築し、すべてのアルゴリズムを RCP システム上で実行することにより実現しました。

#### バッテリーと BMS アルゴリズムのコンセプト

まず、標準的な車両のバッテリーをバッテリーデモンストレータに交換するために、その形状は鉛蓄電池スタータバッテリーの設置スペースに収まるよう設計する必要があります。将来の量産適用においては、形状をより自由に設計して搭載できると考えら

## 用語解説

**電気化学インピーダンス分光法** – 物質の特性を外乱の影響なく分析する方法。複数の異なる周波数の励起信号とシステム応答を評価することにより、システムのインピーダンススペクトルを得る。

**有限要素法 (FEM)** – 偏微分方程式を解く数値的方法。たとえば、物理的プロセスの数学的記述として用いられる。

**Serial Peripheral Interface (SPI)** – 同期シリアルデータ転送用のバスシステム。デジタル回路間をマスター/スレーブ方式で接続できる。

**Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)** – 主として同一デバイス内の異なる回路コンポーネント間の通信に用いられるシリアルデータバス。たとえば、コントローラと周辺制御回路間の通信に用いられる。



れます。デモンストレータは、電圧出力端子に加えて BMS アルゴリズムを実装した RCP システムへのインターフェースも備えます。RCP システムはバッテリーに近接して設置し、バスシステムを介して接続します。量産品では、バッテリー本体にソリューションを内蔵することが考えられます。バッテリーケースは、Li-ion セルに加えて、各セルグループの電圧と電流および一部セルの温度を計測するための電子回路を収納します。この電子回路はセルバランシングも可能にし、充電電流を制御するためのアクチュエータとしても機能します。バッテリーデモンストレータの内部構造には、熱的および電気的な配慮が必要です。これには、セルと電子回路の空間的レイアウトのみならず、セルグループと電流レール間の電気的接続も含まれます。すべてのセル接続の構造と接続形態を最適化するために、さまざまな試験体を使ったシミュレーションを用いました。

#### Li-ion スタータバッテリーのモデル

Li-ion バッテリーと BMS アルゴリズムの挙動をシミュレーションに基づいて検討するために、バッテリーモデルを開発しました。

このモデルは、バッテリーの電気的および熱的特性に関する重要な知見を得るための予備的調査を用途とします。バッテリーの特性をリアルタイムに再現するために、端子電圧モデルと電熱有限要素法 (FEM) モデルを結合する必要がありました。すべてのモデルをパラメータ化することは特に困難でした。バッテリーの包括的な特性化を行うために、バッテリーセルのステップ応答を評価し、電気化学インピーダンス分光法を実施しました。得られた結果をハイブリッドモデルにマージし、高いクオリティとダイナミクスを持つ総合モデルを作成しました。パラメータ化が完了したモデルは、経時劣化と充電サイクル由来の劣化を含むバッテリー劣化状態などの様相を再現可能です。

#### BMS ソフトウェアの開発

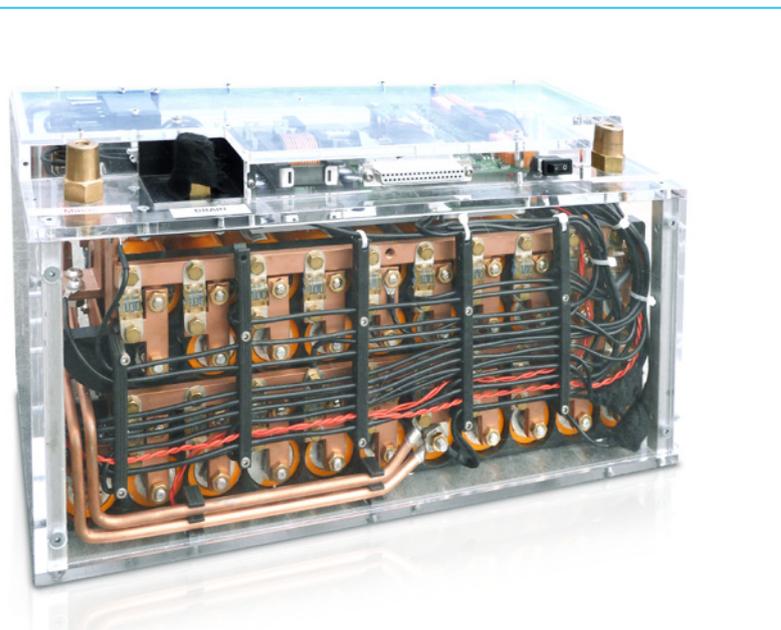
BMS ソフトウェアの基本コンポーネントは、充電電流の制御、セルバランシングの実行、バッテリーの充電状態 (SOC) と劣化状態 (SOH) の計測を行う各種アルゴリズムです。これらのアルゴリズムはバッテリーの過電圧、過熱、過電流を重複して監視します。試験システムの SOC アルゴリ

ズムは、計測誤差と異常動作を排除するために、カルマンフィルタを使用して設計しました。ソフトウェアはバッテリーの SOC だけでなく SOH も分析します。システムに実装した自己診断機能は、明確に個々のセルを区別して充電可能容量と劣化状態に関するデータを提供します。

セルの充電状態を均一化する方法として、受動的セルバランシング法を採用しました。この手法では、最も充電状態の低いセルグループと同じ充電レベルになるまで個々のセルグループを選択的に放電することにより、すべてのセルを均一な充電レベルにします。初期の先行開発とその後の費用対効果分析により、セルからセルへ充電量を移動する能動的セルバランシング法では、想定した車両寿命が尽きるまでに投資に見合う経済的メリットは得られないであろうということが判明しました。このため、スタータバッテリーには能動的的手法を採用しないことを決断しました。

#### BMS のプロトタイプ構築

BMS と車両のエネルギー管理 (EM) システムが相互に作用する状態で動作ストラテジを検討および調整し、また



透明アクリルケースに収納した Li-ion バッテリーデモンストレータ。セル、電流レール、接点、電子回路を見ることができ。将来の量産向けシステムでは、軽量化のために電流レールを銅製からアルミ製に変更することが考えられる。

「MicroAutoBox によるプロトタイピングシステムは完全に期待に添えてくれました。変更したコントローラソフトウェアを読み込むだけで、即座に車両で評価できます」

Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen 氏、Audi Electronics Venture GmbH

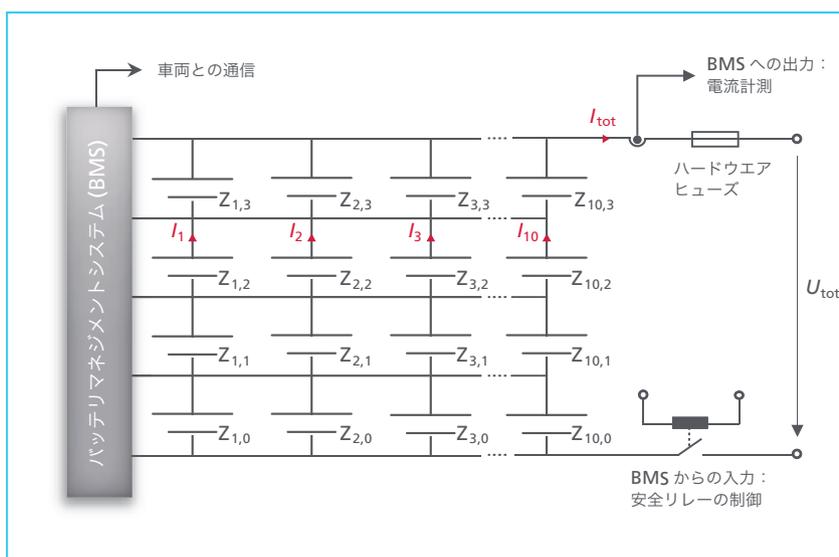
全天候テストを実施するために、開発の早期段階でテストドライブによる BMS のテストが必要でした。このため、BMS ECUとしてラピッドコントロールプロトタイピングシステム dSPACE MicroAutoBox を使用しました。制御アルゴリズムはモデルベース開発で作成し、これを開発 PC から MicroAutoBox に直接書き込んで実行できます。MicroAutoBox は EM システムに接続します。バッテリーの内蔵電子回路はセルレベルで評価を行います。この電子回路は、セルバランシング用のアクチュエータシステム、充電電流制限用の出力半導体、SOH を判定するための DC-DC コンバータを実装します。通信は Serial Peripheral Interface (SPI)/Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C) を介して行います。MicroAutoBox は dSPACE Programmable Generic Interface (PGI1) を介して接続します。

このようなセットアップにより、Li-ion スタータバッテリーは車載状態でも試験施設でも動作できます。量産スタータバッテリーを Li-ion バッテリーデモンストラータに交換し、MicroAutoBox を車両の LIN バスとバッテリーに接続することにより、簡単に車両に搭載できます。車両バスに接続せず、試験設備で動作させることも可能です。

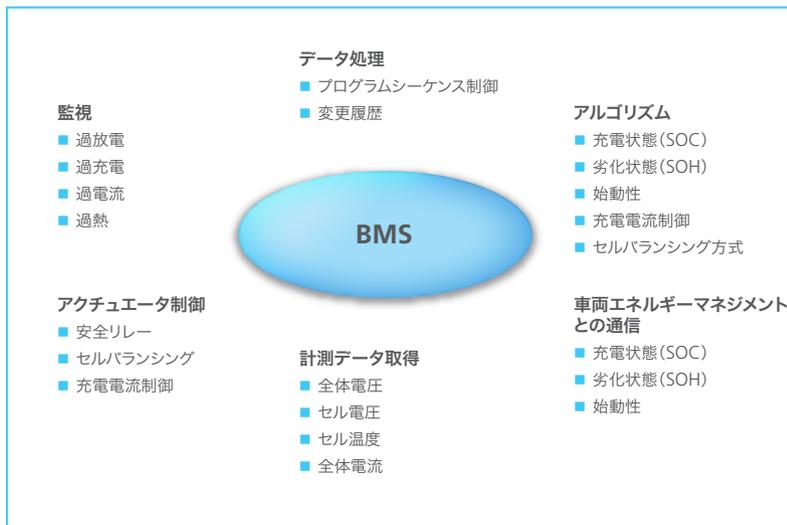
#### BMS およびバッテリーの特殊な機能

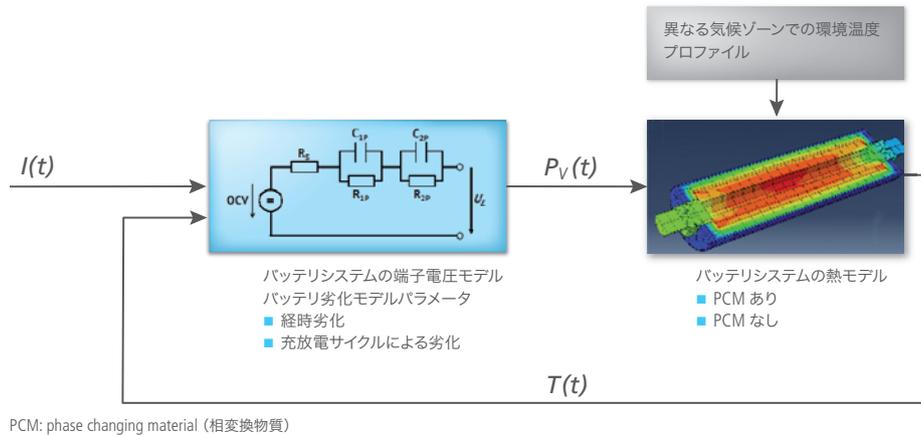
Li-ion スタータバッテリーを理想的な状態で動作させて早期の劣化を防ぐために、パワートランジスタによる線形電流制御を実行して充電電流を制限します。テスト用のセットアップでは、低温時の充電性能を改善するために、パワートランジスタの発熱を利用してバッテリーを加熱します。このためパワートランジスタは、良好な加熱特性が得られるよう、バッテリー内の各所に設置されて

12V Li-ion マルチセルバッテリーシステムの基本構造



12V Li-ion スタータバッテリー用 BMS が実行するさまざまなタスク





端子電圧モデルを電熱 FEM モデルに結合してバッテリーシステムの平均寿命を予測

「これまで専門的であったバッテリー技術が Li-ion スタータバッテリーによって実用レベルに転化できました。dSPACE MicroAutoBox のおかげで既に路上運転が可能となっています」

Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen 氏、Audi Electronics Venture GmbH

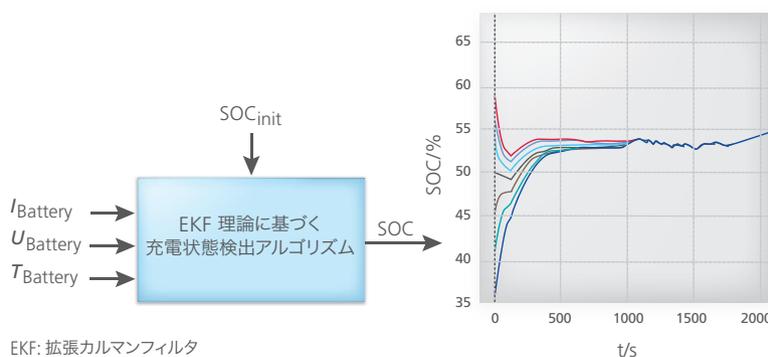
います。バッテリーの温度は、内蔵電子回路を介して 4 箇所ですべて計測します。これらの技術は高コストであるため、先行開発以外では現実的ではありません。

**実用試験における BMS**

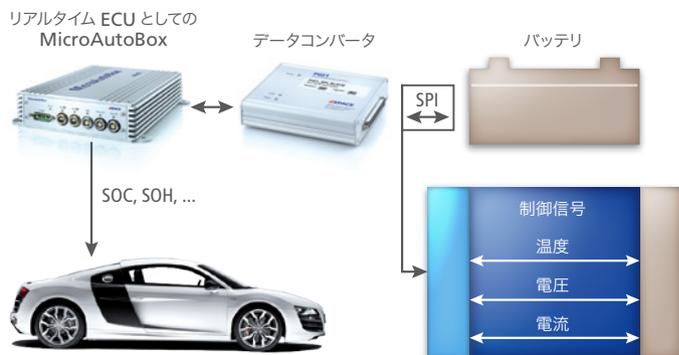
MicroAutoBox を使用したバッテリーデモ

ンストレータは、現在テストドライブと全天候シャシーダイナモでテスト中です。バッテリーはコントローラ付き（加熱機構付き）でもコントローラなしでも動作可能です。これらのテスト結果に基づき、制御アルゴリズムのさらなる最適化を進める予定です。

これらの結果は、BMS を備えた Li-ion スタータバッテリーが鉛蓄電池の代替技術として有望であることを示唆しています。軽量でサイクル安定性が大幅に優れる Li-ion バッテリーはスタート/ストップ運転の要件に適合しますが、現時点ではコストが大幅に増加します。RCP システムを通



充電状態検出アルゴリズムの開発。信号は各種の不適切な初期状態からの SOC 適合の挙動を示しています。



シミュレーション結果を MicroAutoBox を使用したテストドライブで検証。シミュレーション後即座にリアルタイム車両試験を実施することにより、ソフトウェア開発サイクルが短縮されます。

して得られた経験は、将来量産開発に着手する際に役立てることが出来ます。■

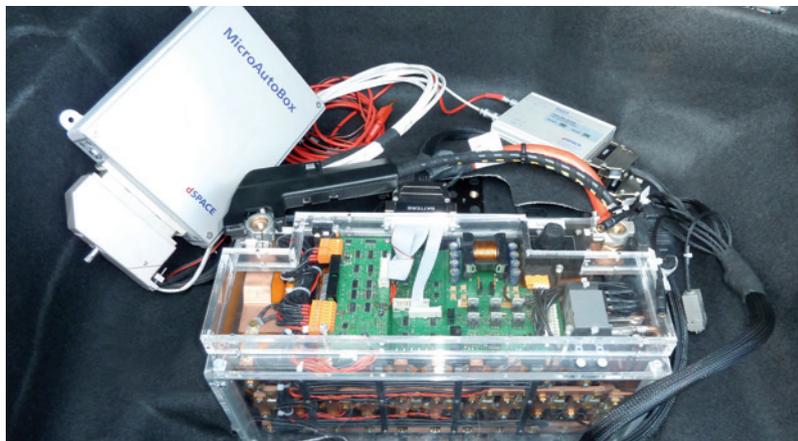
David Vergossen Dipl.-Ing. (TU)  
Audi Electronics Venture GmbH, AEV

## 謝辞

本稿は、ドイツの教育科学・研究技術省 (BMBF) と EU (ENIAC JU プロジェクト) の出資による E<sup>3</sup>Car プロジェクト (エネルギー効率の高い電気自動車のためのナノエレクトロニクス - AEV サブプロジェクト

ト: リチウムイオンバッテリーの状態検出を行う革新的アルゴリズムの研究、文献番号 13N10395 (BMBF) および 120001 (ENIAC)) に基づきます。本稿の内容には著者が単独で責任を負います。

車両の通常のスタータバッテリーを Li-ion バッテリーに交換 - 写真は車両のスペアホイール用スペースに設置した状態を示しています。



## まとめ

AEV における BMBF/ENIAC 研究プロジェクトの一貫として、リチウムイオンバッテリーのスタータバッテリーへの適用について調査しました。本プロジェクトは、鉛蓄電池に代わる軽量でサイクル安定性に優れたバッテリーの研究を目的としました。開発を通してバッテリーデモンストレータと BMS アルゴリズムを構築しました。信頼性の高い機能を確保するために、下記の基礎的研究を実施しました。

- 使用セルのモデル化
- バッテリー全体のモデル化
- バッテリー制御電子回路の開発
- バッテリー動作ストラテジの検討
- SOH、始動性、静止電流、充放電サイクルに関する能力の設計
- SOH 適合機能を備えた SOC 計測
- 熱的シミュレーション
- 電流レールとコンタクタ技術の設計

プロトタイプの実装には dSPACE MicroAutoBox を使用しました。MicroAutoBox をラボテストとテストドライブで ECU として使用することにより、機能開発を迅速に進めることができました。新型バッテリーと BMS ソフトウェアの初期試験からは、説得力のある結果が得られました。

Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen 氏  
同氏は、Audi Electronics Venture GmbH (ドイツ、インゴルシュタット) における Li-ion スタータバッテリーのプロジェクトリーダーです。

