

# Optimierte Betriebsstrategien zur Steigerung von Energieeffizienz und Sicherheit durch kombinierte Systembetrachtung von Bordnetz und Batterie

---

Daniel Renner, Xiangfeng Zhang, Patrick Jansen, David Vergossen, Werner John, Stephan Frei

## Abstract

Efficient and intelligent allocation of electrical energy in vehicles is gaining more and more importance due to the rising energy demand of the electrical system, caused by an increasing number of electrical loads on the one hand and the necessity to further reduce CO<sub>2</sub> emissions on the other hand.

State of the art energy storage systems used in conventional vehicles are lead-acid-batteries. This technology does not accept all energy generated during recuperation-phases. To increase their life-time it is essential to avoid high charge and discharge rates as well as cyclization of the battery.

One approach to balance these deficits and at the same time enhance the stability of the electrical system, is the use of a Starting-Lightning-Ignition-battery based on lithium-iron-phosphate technology. This opens up new possibilities to optimize the energy management and the associated control strategies.

This article exhibits algorithms and control strategies for the safe operation of lithium-iron-phosphate batteries in conventional vehicles. In addition, to further increase the energy efficiency of conventional vehicles, an adaption of algorithms from hybrid vehicles to this low voltage system is discussed. It is shown, that simple adaptations to the energy management leads to fuel savings in a single digit percentage range.

A longitudinal dynamics simulation in combination with the validation on a vehicle dynamometer proves the effectiveness of the shown approaches.

## Kurzfassung

Der ansteigende Energiebedarf im Bordnetz - bedingt durch eine steigende Zahl an Verbrauchern - und die Notwendigkeit den CO<sub>2</sub>-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 Op-

timierung des Energiemanagements und der damit verbundenen Regelungsstrategien.

In diesem Beitrag werden Betriebsstrategien für den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in konventionellen Fahrzeugen vorgestellt, die in allen Betriebspunkten einen sicheren Betrieb des Energiespeichers gewährleisten. Mit dem Ziel, eine weitere Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge zu erreichen, werden neben Strategien zum sicheren Betrieb auch die Adaption von Algorithmen aus dem Hybrid-Fahrzeugbereich für das vorliegende System diskutiert. Es wird gezeigt, dass es durch einfache Strategieanpassungen im Energiemanagement möglich ist, Kraftstoffeinsparungen im Prozentbereich zu erreichen.

Die Wirksamkeit der erarbeiteten Konzepte wird durch eine längsdynamische Gesamtfahrzeugsimulation mit anschließender Validierung auf dem Fahrzeugrollenprüfstand überprüft.

## 1. Einleitung

Die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugkomponenten sowie eine wachsende Zahl an Verbrauchern und deren Anforderungen an Spannungsstabilität und Bordnetzleistungsfähigkeit führen zu stetig steigender Belastung des 14 V Energiespeichers. Zunehmend strengere Gesetzesreglementierungen hinsichtlich Schad- und Kraftstoffausstoß hingegen führen zu einer weiteren Elektrifizierung des Fahrzeugs und lenken das Interesse auf eine effiziente Betriebsweise aller Komponenten. Die fehlende Fähigkeit zur schnellen Ladungsaufnahme und begrenzte Lebensdauer der meist eingesetzten Blei-Säure-Batterie erzwingt eine dauerhafte Bordnetzstabilisierung durch den Generator und verhindert die gezielte Erzeugung elektrischer Energie in verbrauchsbezogen günstigen Betriebspunkten. Ein zukunftsweisender Ansatz ist der Einsatz eines Speichers mit Lithium-Ionen Technologie als Starterbatterie. Insbesondere die Lithium-Eisenphosphat (LFP) Zellchemie eignet sich aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit, des Spannungsniveaus und nicht zuletzt aufgrund des Sicherheitsaspekts hervorragend für diesen Einsatzbereich, wie die Anwendung in [1] und [2] schon nahelegt. Zusätzlich bietet diese Technologie den Vorteil einer erhöhten Lebensdauer gegenüber eines Speichers mit Blei-Säure Chemie und trägt zu einer gesteigerten Kundenakzeptanz hinsichtlich Funktionen wie Stopp-/Start bei. Ein entscheidender Faktor ist zudem die deutlich verbesserte Ladeakzeptanz der LFP-Technologie, die es ermöglicht in Schubphasen mehr Energie zurückzugewinnen und somit die Generatorleistung während der Zugphasen des Fahrzeugs zu reduzieren. Dies ist ein weiterer Schritt in Richtung effizienter Fahrzeuge der Zukunft. In diesem Beitrag wird der Einsatz einer LFP-Starterbatterie als Ersatz für eine Blei-Säure-Batterie untersucht. Es werden Betriebsstrategien diskutiert die es ermöglichen den Arbeitspunkt des Energiespeichers zu beeinflussen und die durch den Speicherwechsel entstandenen Potentiale gezielt auszunutzen.

## 2. 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.

## 2.1 Nutzbarer Energieinhalt

Die Bestimmung des aktuellen Energieinhalts des eingesetzten Energiespeichers ist einer der zentralen Punkte für die Auswahl des optimalen Betriebsmodus in Mild-Hybrid 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]. Der Energieinhalt ist daher eine, wenn nicht die zentrale Regelgröße im Energiemanagement von Mild-Hybrid-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 (engl.: state of charge, 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.

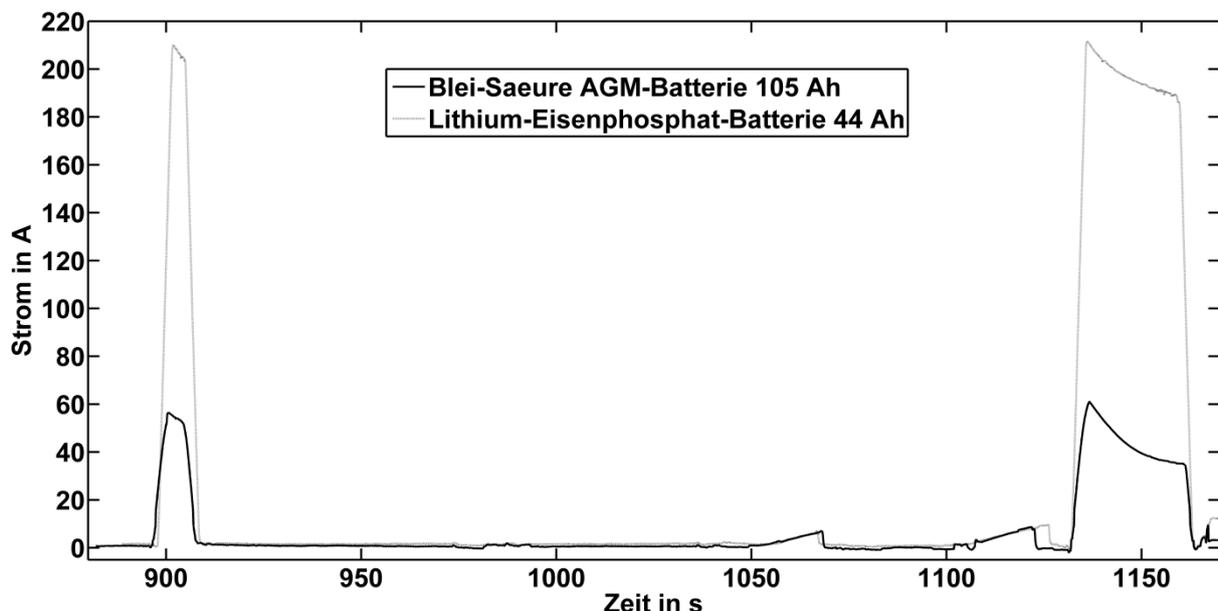
## 2.2 Ladeverhalten

Weitere Unterschiede ergeben sich auch beim Laden der Batteriespeicher. Nach Untersuchungen von Schindler [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.

### 2.3 Dynamische Ladeakzeptanz

Ein weiterer entscheidender Unterschied beim Betrieb der Energiespeicher im Fahrzeug stellt die Stromaufnahmefähigkeit der Speicher dar. Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Messreihen zur Ladeakzeptanz bestätigen die Untersuchungen von Budde-Meiwes [6], Thele [7] und Schaeck [8] und sind in Abbildung 1 gezeigt. 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. Diese zwei Betriebsfälle treten bei konventionellen Fahrzeugen häufig auf und beeinflussen die Ladeakzeptanz zusätzlich negativ.



*Bild 1: Vergleich der Ladeakzeptanz verschiedener Bordnetz Batterien im NEDC bei einem SOC von 85% einer Temperatur von 25 °C und vorhergehender Ladestandserhaltung der Batterie – Bordnetzversorgung durch Generator*

In Abbildung 1 ist ein Ausschnitt der letzten fünf Minuten aus dem Stromverlauf der Starterbatterie während des 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.

## 2.4 Alterungseinflüsse

Auch hinsichtlich der Pflege zur Vermeidung vorzeitiger Speicher-Alterung unterscheiden sich die untersuchten Zellchemien deutlich. Diverse Untersuchungen von Schindler [5] und Sauer [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 von Roscher [11] eine deutlich erhöhte Lebensdauer hinsichtlich der zyklischen Alterung von LFP-Zellen im Vergleich zu Blei-Säure-Batterien bei der Betrachtung von Vollzyklen.

## 3. Methodenentwicklung

Die Unterschiede zwischen den Speichereigenschaften führen zu neuen Möglichkeiten im Energiemanagement des Fahrzeugs. Nachfolgend soll auf drei Betriebsstrategien bei Einsatz einer Lithium-Ionen-Batterie im Niedervolt-Bordnetz zur Steigerung der Systemsicherheit und Effizienz eingegangen werden. Es wird den veränderten Eigenschaften in Form von stromstärkeunabhängiger Aussagekraft des SOC, deutlich erhöhter Ladeakzeptanz und Lebensdauer im zyklischen Betrieb Rechnung getragen. Die nachfolgend vorgestellten Betriebsstrategien basieren dabei auf folgenden vier Modi.

1. **Rekuperationsbetrieb:**  
Das Fahrzeug befindet sich in der Schubphase und die Generatorspannung wird bis zum Maximalwert erhöht, um zusätzliche Energie in den Speicher zu laden.
2. **Nullstromregelung:**  
Die Generatorspannung wird auf den notwendigen Spannungswert geregelt, um die Batterie auf einem konstanten SOC zu halten und sie mit „Nullstrom“ zu betreiben. Die Batterie wird in diesem Betriebszustand also weder geladen noch entladen.
3. **Batterientladebetrieb:**  
Die Generatorspannung wird auf ein niedrigeres Spannungsniveau als das des Energiespeichers geregelt, um die Bordnetzverbraucher aus der Batterie zu versorgen und den Energiespeicher zu entladen. Der im Fahrtbetrieb bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor eintretende Stopp-/Start-Betrieb resultiert ebenfalls in einer Batterieentladung durch die Bordnetzverbraucher.
4. **Batterieladebetrieb:**  
Die Batterie wird mit der vom Hersteller empfohlenen Ladespannung bis zu einem definierten SOC geladen.

### 3.1 SOC-basierte Regelung

Um den vielfältigen Anforderungen an den Energiespeicher in modernen Bordnetzen mit Mild-Hybrid Funktionalität in Anlehnung an Karden [4] und Schindler [5] gerecht zu werden, gewinnt die Kenntnis über den exakten Zustand des Energiespeichers und dessen Reserven zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der chemischen Eigenschaften des LFP Speichers mit einer über weite Ladezustandsbereiche äußerst flach verlaufenden Kennlinie gestaltet sich bei diesem Speicher eine Regelung auf vordefinierte Spannungszustände als nicht realisierbar. Eine auf dem SOC des LFP-Speichers basierende Regelungsstrategie zum Betrieb in einem definierten Ladezustandsfenster ist die logische Konsequenz. Das Ladezustandsfenster wird als der Bereich zwischen oberer und unterer SOC-Grenze definiert. Dies stellt einerseits sicher, vorzeitige Alterungserscheinungen zu vermeiden und dennoch den Anforderungen zur Gewährleistung der Startfähigkeit und Bordnetzstabilität gerecht zu werden. Ebenfalls ermöglicht die Angabe des SOC beim LFP Speicher im Gegensatz zur Blei-Säure-Batterie konkrete Aussagen hinsichtlich Energie und Leistungsreserven zu treffen. In Abbildung 2 ist die, in Abhängigkeit des SOC vorgeschlagene Betriebsstrategie dargestellt.

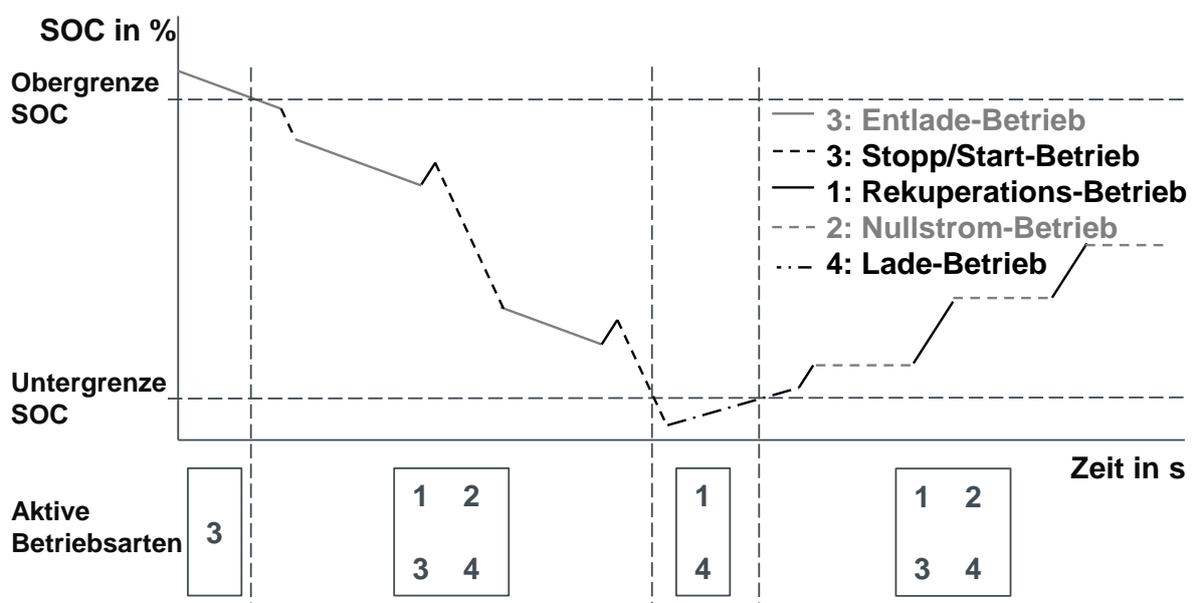


Bild 2: SOC abhängiger Einsatz der vier vorgestellten Betriebsarten

Über einem Schwellenwert, hier mit SOC-Obergrenze bezeichnet, sollte der Batterieentladebetrieb angewendet werden, um den Speicher wieder in das Ladezustandsfenster zurückzuführen. Damit kann einerseits eine Reserve für zukünftige Rekuperationsphasen geschaffen werden. Zugleich wird der SOC-Bereich mit beschleunigter Alterung vermieden. Unterhalb des zweiten Schwellenwertes hier mit SOC-Untergrenze bezeichnet, sollte der Batterieladebetrieb dauerhaft angewendet werden, um eine Wiederstartfähigkeit des Fahrzeugs zu gewährleisten. Innerhalb dieses Ladezustands-Fensters finden die Regelungsstrategien „Prädiktive SOC-Regelung“ und „Adaptive Generatorregelung“ Anwendung. Diese sollen im Folgenden genauer beschreiben werden.

### 3.2 Prädiktive SOC Regelung

Durch die verbesserte Zyklenfestigkeit und Ladeakzeptanz der LFP-Batterie ist es möglich einen gewünschten SOC während des Fahrtbetriebs gezielt und in kurzer Zeit anzufahren. Diese Funktion soll hier als „prädiktive SOC-Regelung“ bezeichnet werden. Sie eignet sich zum einen für die Verbrauchsermittlung durch vordefinierte Fahrzyklen, um Verbrauchsabweichungen durch zusätzliche Lade- oder Entladeenergie der Batterie ausschließen zu können, zum anderen ist sie aber im Kundeneinsatz entscheidend, um den beim Abstellen des Fahrzeugs für den Wiederstart notwendigen SOC einstellen zu können.

Durch Informationen zu Geschwindigkeitsbeschränkungen und Straßenprofilen für eine gewünschte Fahrstrecke ist es auch im Kundenbetrieb möglich, den Energiebedarf vorab abzuschätzen. 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, wie sie auch in Fahrzyklen gefordert wird, zu wahren. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die Strategie zur Gewährleistung der SOC-Neutralität zwischen Abfahrt und Ankunft.

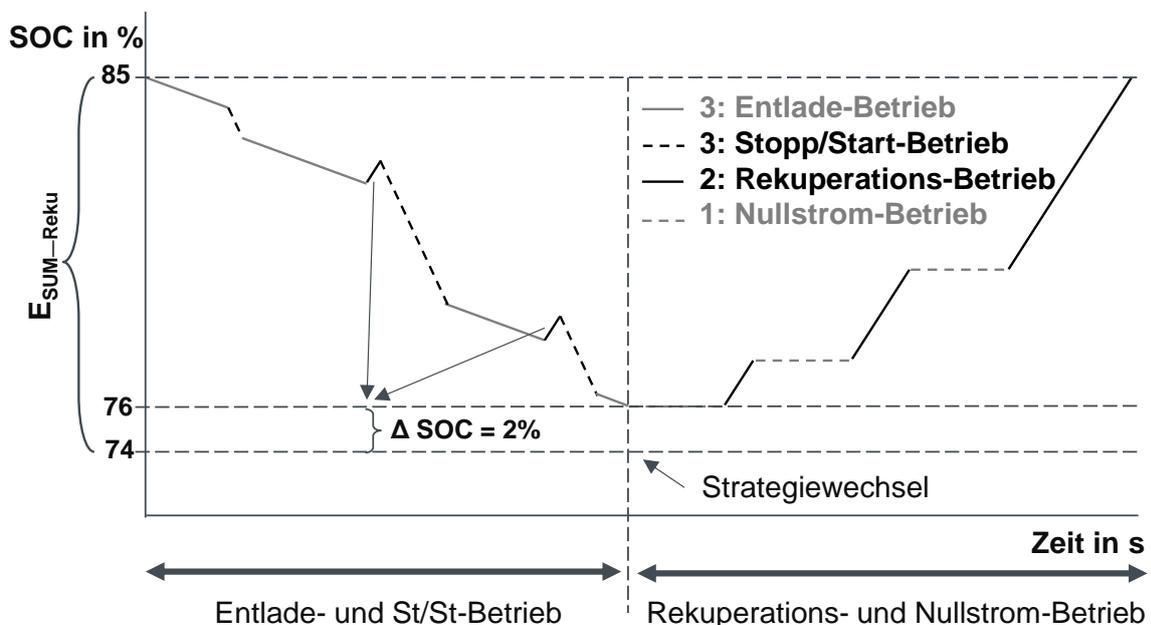


Bild 3: Exemplarische Entwicklung des SOC bei Fahrt mit prädiktiver SOC-Regelung

Für die Fahrstrecke wurde eine durch den Rekuperationsbetrieb speicherbare Energiemenge  $E_{\text{SUM\_Reku}}$ , die einem SOC-Hub von 11 % entspricht abgeschätzt. Diese Energiemenge wird solange durch Stopp-/Startbetrieb und Spannungsabsenkung während der Zugphasen aufgebraucht, bis der Grenz-SOC von 76% erreicht wurde. Die Differenz von zwei SOC-Prozentpunkten zu dem im Vorfeld berechneten SOC-Hub ergibt sich durch die bis zum Wechsellpunkt bereits durch die Rekuperationsfunktion eingespeicherte Energiemenge. Der anschließende Strategiewechsel stellt die Wiederaufladung des Speichers bis zum Ende der Fahrt sicher.

### 3.3 Adaptive Generatorregelung

Der Gesamtwirkungsgrad der elektrischen Energieerzeugung im Fahrzeug hängt von einer Wirkungsgradkette, die Reibungsverluste in Rad-Differential-Getriebe bis hin zum Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine, den Riementriebverlusten und den Generatorwirkungsgrad beinhaltet, ab. Eine Beeinflussung des Gesamtwirkungsgrads durch das Energiemanagement des Fahrzeugs in Form einer Spannungsanpassung des Generators ist mit Hilfe der aus dem Themenfeld der Hybridfahrzeuge bekannten Lastpunktanhebung / -verschiebung möglich. Unter der adaptiven Generatorsteuerung versteht man die Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors bei gleichbleibender Drehzahl, um den Verbrennungsmotorwirkungsgrad positiv zu beeinflussen [13]. Dies kann in Verbindung mit der Funktion ‚Prädiktive SOC Regelung‘ dazu genutzt werden, um die für einen definierten SOC zum Ende der Fahrt notwendige Energiemenge in Phasen mit zur elektrischen Energieerzeugung günstigem Wirkungsgrad nachzuladen. Der Einfluss der Betriebspunktverschiebung auf den Kraftstoffverbrauch lässt sich mittels sogenannter Willans-Kennlinien darstellen. Die Willans-Kennlinien können dabei zur näherungsweise Bestimmung der mechanischen Verlustarbeit von Verbrennungsmotoren verwendet werden [14]. In dem vorliegenden Fall ist es möglich die für die elektrische Energieerzeugung notwendige, mechanische Leistungsabgabe  $P_{m,VKM}$  des Verbrennungsmotors der eingesetzten chemischen Leistung  $P_{ks,VKM}$  in Form des Kraftstoffverbrauchs pro Zeiteinheit bei konstanter Drehzahl gegenüberzustellen. Das Delta zwischen den zwei entstehenden Arbeitspunkten – ohne Belastung (AP1) und mit Generatorbelastung (AP2) – veranschaulicht den Kraftstoffmehreinsatz bei zusätzlicher Belastung des Verbrennungsmotors durch den Generator.

$$\Delta\eta = \frac{\Delta P_{m,VKM}}{\Delta P_{ks,VKM}} = \frac{P_{m,VKM}(AP2) - P_{m,VKM}(AP1)}{P_{ks,VKM}(AP2) - P_{ks,VKM}(AP1)} \quad (2)$$

Aus Gleichung 2 lässt sich entsprechend der Differenz-Wirkungsgrad  $\Delta\eta$  des Verbrennungsmotors für die Energieerzeugung in Abhängigkeit der Drehzahl  $n$  und des angeforderten Drehmoments  $M$  darstellen. Abbildung 4 zeigt den für die hier untersuchten Fahrzyklen relevanten Ausschnitt an Drehzahl- und Drehmomentbereich.

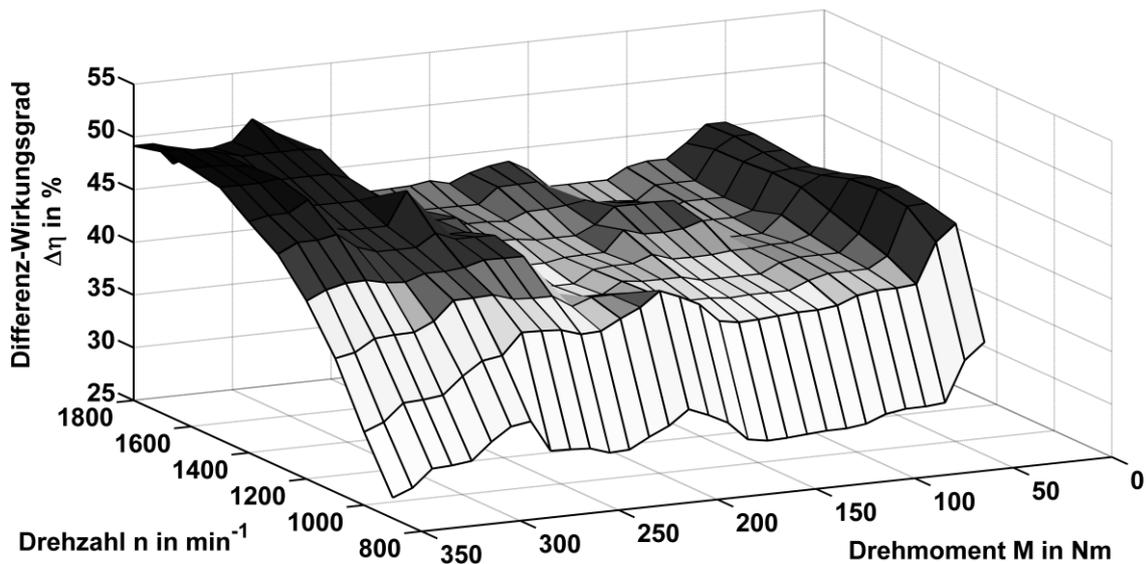


Bild 4: Wirkungsgradkennfeld des 3.0l Dieselmotors zur Erzeugung elektrischer Energie mittels Generator

Im Kennfeld lässt sich der bei einem Arbeitspunkt für die elektrische Energieerzeugung erzielbare Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors abgelesen.

Das Wirkungsgradkennfeld ist aus dem Verbrauchskennfeld eines 3.0l Dieselmotors bei zusätzlicher Belastung durch den Generator mit einem Drehmoment von 20 Nm erzeugt worden. Hier dunkel hervorgehoben sind die für eine Lastpunktverschiebung geeigneten Stellen. Besonders geeignet für eine Lastpunktanhebung ist demnach die Menge  $A$ .  $A = \{ n, M \mid n \in [1000, 1800] \wedge (M \in [1, 80] \vee M \in [220, 350]) \}$

Befindet sich der Arbeitspunkt des Verbrennungsmotors in der Menge  $A$ , wechselt die Betriebsart von der Nullstromregelung zum Batterieladebetrieb.

## 4. Längsdynamiksimulation

Um Aussagen über den Kraftstoffverbrauch generieren zu können, ist die Fahrzeuglängsdynamik entscheidend. Quer- und Vertikaldynamik werden für Verbrauchssimulationen vernachlässigt. Für die Methodenentwicklung und anschließende Verbrauchssimulation wird ein dynamischer Modellansatz angewandt, wie er auch bei Winke [15] Verwendung findet und in einem MATLAB-Simulink-Modell realisiert.

### 4.1 Dynamischer Modellansatz

Der dynamische Modellansatz bietet den Vorteil einer Abbildung der Teilmodelle in verschiedenen Modellierungstiefen. Für die in diesen Untersuchungen zugrundeliegenden Modelle wurde der Ansatz verfolgt, die für eine Bordnetzsimulation bedeutendsten Teilmodelle möglichst genau zu beschreiben, während die weniger Einfluss habenden Komponentenmodelle kennfeldbasiert oder aus Fahrzeugmessungen abgeleitet wurden. Abbildung 5 zeigt den verwendeten dynamischen Modellansatz mit Kennzeichnung der Modellierungstiefe, wobei genauer modellierte Modelle mit fetter Umrahmung gekennzeichnet sind.

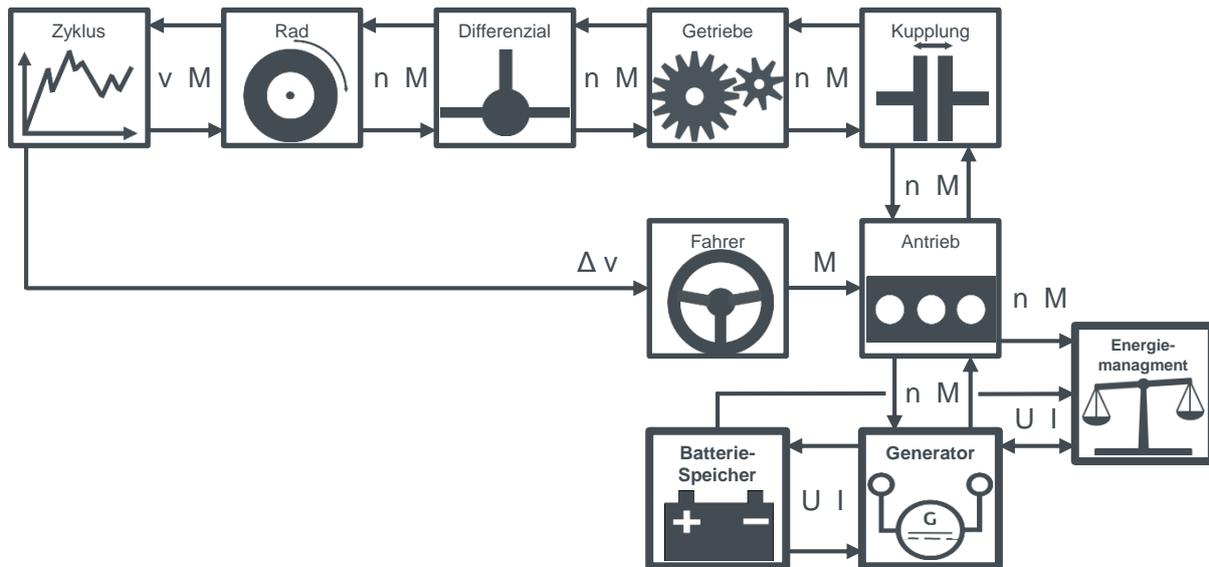


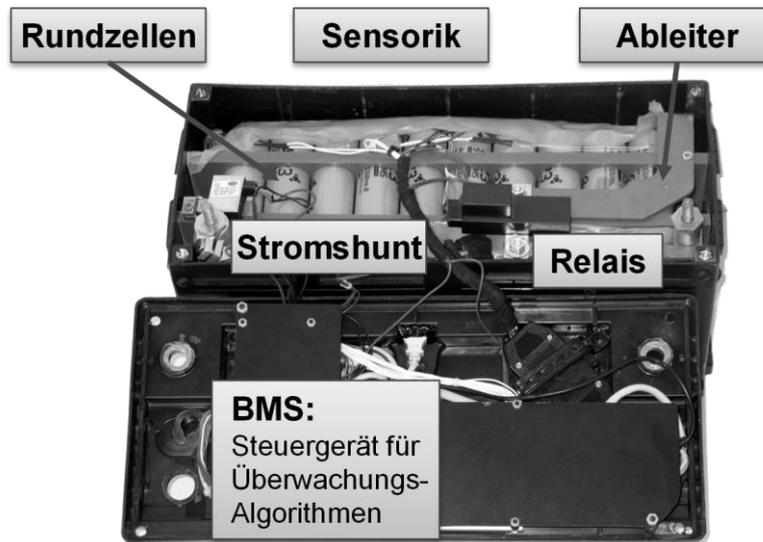
Bild 5: Dynamischer Modellansatz der Simulation unter Berücksichtigung der Modellierungstiefe

## 4.2 Verwendete Fahrzeug-, Bordnetz- und Batteriekomponenten

Für die später gezeigten Untersuchungen wurde ein Serienfahrzeug der Oberklasse oder auch des F-Segments mit Dieselmotor und Automatikgetriebe analysiert. Die Auswahl beruht auf folgenden Grundannahmen:

- Untersuchungen in [16] zeigten unterschiedliches Potential der speicherbaren Energie in Schubphasen in Abhängigkeit des Verbrennungsmotortyps. Der Einsatz eines Dieselmotors bietet aufgrund der geringen Drehzahl in Verbindung mit einer längeren Übersetzung die geringste Dauer der Schubphasen. Somit können die folgenden Untersuchungen zur Kraftstoffersparnis als Mindestpotential angesehen werden.
- Um einen Einfluss des Fahrers und dessen Schaltverhaltens ausschließen zu können, wurde ein Fahrzeug mit Automatikgetriebe gewählt, dessen Schaltkennfeld in der Simulation exakt darstellbar ist.
- Der mit einer Nennleistung von 3 kW für diesen Fahrzeugtyp typische Generator soll zeigen, ob und bis zu welchem Grad eine Lithium-Ionen-Starterbatterie in der Lage ist, die zur Verfügung gestellte Energiemenge des Generators aufzunehmen.
- Als Batterie wurde eine in dem Fahrzeug serienmäßig verbaute Blei-Säure-Batterie in AGM-Ausführung mit einer Kapazität von 105 Ah und einem Gesamtgewicht von 29 kg angenommen. Die Auswahl der Speicherkapazität der LFP-Batterie von 44 Ah basiert auf vorangegangenen Untersuchungen der Bordnetzstabilität bei ESP-Eingriff und Temperaturen von 20 °C bis -20 °C sowie der Kaltstartfähigkeit nach DIN EN 50342-1. Dabei stellte sich die 44 Ah Batterie als vergleichbar leistungsfähig zu einer 105 Ah großen AGM-Batterie dar. Damit ergibt sich zugleich eine Gewichtersparnis im Fahrzeug von 16 kg.

Abbildung 6 zeigt den für die Untersuchung verwendeten Starterbatteriedemonstrator mit 40 zylindrischen Eisenphosphat-Einzelzellen, die in einem genormten H9 Gehäuse verbaut sind.



*Bild 6: Modularer Starterbatteriedemonstrator mit 40 Rundzellen und 13,2 V*

Durch eine 4s10p Verschaltung kann so bei einer Nennspannung von 13,2 V eine Batteriekapazität von 44 Ah erreicht werden. Die für den Betrieb einer Lithium-Ionen-Batterie notwendigen Überwachungs- und Sicherheitssysteme wie Schutzrelais und Batteriemanagementsystem konnten platzsparend in den Gehäusedeckel integriert werden. Der modulare Aufbau des Demonstrators bietet den Vorteil, andere Zelltypen und Zellverschaltungen für weitergehende Untersuchungen zu verwenden.

### **4.3 Validierung der Simulationsmethode durch Rollenprüfstandsmessungen**

Zur Validierung der Methodik werden mit dem vorgestellten Fahrzeug und der gezeigten Auswahl an Energiespeichern Rollenprüfstandsversuche gefahren. Dabei werden drei verschiedene Fahrprofile zur Validierung herangezogen. Neben den zwei normierten Fahrzyklen NEDC und dem Worldwide-harmonized-Light-vehicles-Test-Cycle (WLTC), die für die gesetzliche Kraftstoffermittlung und den Fahrzeugvergleich dienen, wird ein Kundenreferenzprofil (KRP) untersucht, das eine Fahrt auf einer Landstraße nachbildet. Abbildung 7 veranschaulicht den zeitlichen Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit der drei untersuchten Fahrzyklen.

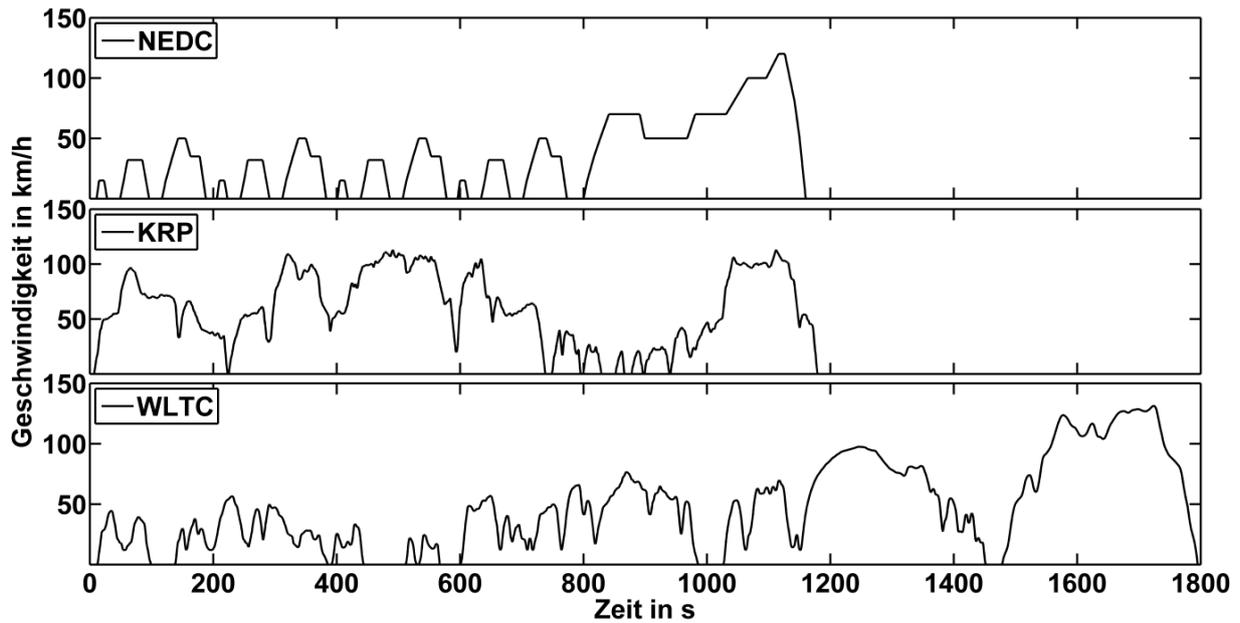


Bild 7: Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe der untersuchten Fahrzyklen

Der Vergleich des simulierten Kraftstoffverbrauchs mit dem durch Prüfstandsversuche gemessenen Kraftstoffverbrauch ist in Abbildung 8 dargestellt. Zur Kraftstoffverbrauchsermittlung werden sämtliche Messungen bei einer konstanten Temperatur von 25 °C durchgeführt. Durch eine externe Kraftstoffversorgung des Fahrzeugs mit Volumenstromermittlung ist es möglich, den Verbrauch während eines Zyklus exakt zu bestimmen. Als weitere Randbedingungen seien ein betriebswarmer Verbrennungsmotor, abgeschaltete Nebenverbraucher und ein initialer SOC des Batteriespeichers von 90% genannt. Um etwaige Messfehler durch leicht abweichende Betriebstemperaturen der Fahrzeugkomponenten oder Differenzen im Verbrennungsvorgang auszuschließen, werden für jedes Fahrprofil fünf Messfahrten durchgeführt.

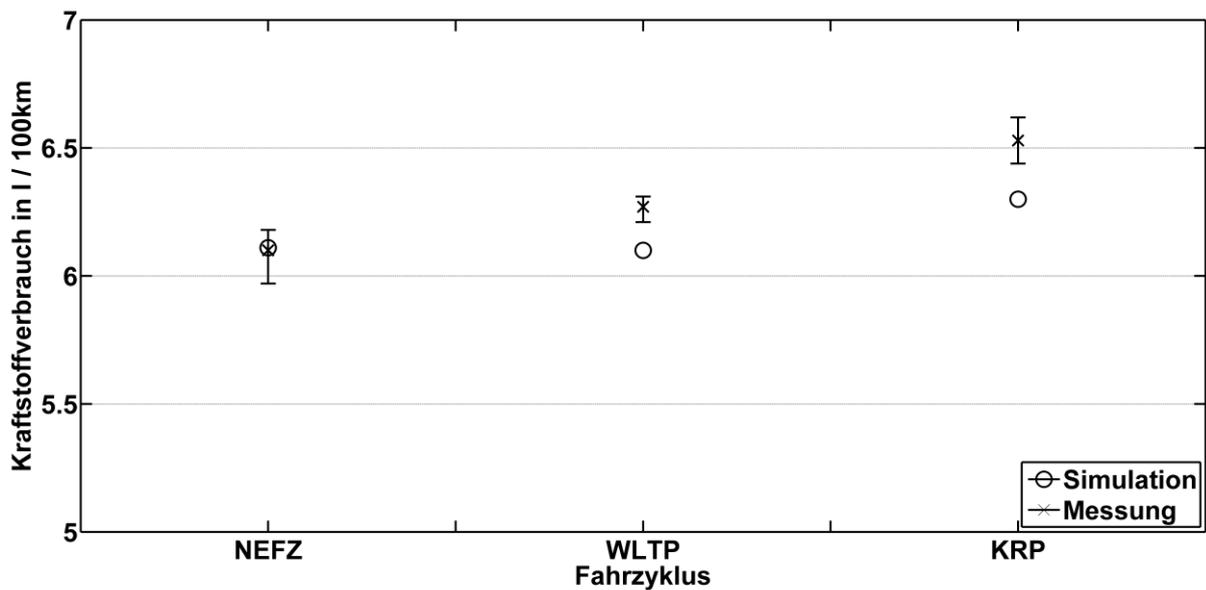


Bild 8: Verbrauchsergebnisse der Simulation und Prüfstandsvermessung

Die dargestellten Fehlerbalken zeigen die minimal und maximal gemessenen Verbrauchswerte im Vergleich zu den Simulationsergebnissen. Mit „x“ gekennzeichnet ist das arithmetische Mittel der Verbrauchsmessung und ihm gegenübergestellt der simulativ ermittelte Verbrauchswert, mit „o“ gekennzeichnet.

Die Auswertung zeigt eine Übereinstimmung der in der Simulation ermittelten Verbrauchswerte mit den Werten aus der Prüfstandsmessung. Die Abweichung im ungünstigsten Fall beträgt weniger als 2% und validiert das Simulationsmodell.

## 5. Untersuchungsergebnisse

Die Auswirkungen der vorgestellten dynamischen Betriebsstrategien bei Einsatz einer LFP-Starterbatterie auf den Kraftstoffverbrauch sind in Tabelle 1 dargestellt. Das Potential zur Kraftstoffeinsparung wie hier vorgestellt liegt in der Reduktion des Generatormoments während der Zugphasen des Fahrzeugs. Dies resultiert in einer geringeren elektrischen Abgabeleistung des Generators und entsprechenden Spannungs- und Stromabgabe und beeinflusst die im Energiebordnetz gespeicherte Energiemenge. Um einen validen Vergleich der Strategien zu ermöglichen, ist es somit notwendig, eine SOC-Neutralität während des Zyklus zu gewährleisten. Dies schließt eine Verfälschung der Ergebnisse durch zusätzliche Erzeugung oder Verbrauch elektrischer Energie aus. Während die Strategie „prädiktive SOC Regelung“ durch geschickte Wahl der Parameter eine SOC-Neutralität gewährleistet, wird dies beim herkömmlichen Energiemanagement in Kombination mit der Blei-Säure-Batterie durch eine Regelung auf einen festen Spannungswert erreicht.

Tabelle1: Vergleich der Einsparpotentiale von LFP-Batterie und angepasster Regelungsstrategie

Fahrzyklus	Blei-Säure $\left[ \frac{1}{100\text{km}} \right]$	Prädiktive SOC-Regelung		Prädiktive und adaptive Generatorregelung	
		LFP $\left[ \frac{1}{100\text{km}} \right]$	Potential [%]	LFP $\left[ \frac{1}{100\text{km}} \right]$	Potential [%]
NEDC	6,11	5,97	2,29	5,95	<b>2,62</b>
WLTC	6,10	5,98	1,97	5,96	<b>2,30</b>
KRP	6,30	6,22	1,26	6,20	<b>1,59</b>

Die Gewichtseinsparung der leichteren LFP-Batterie in Kombination mit der ‚prädiktiven SOC Regelung‘ erreichen bereits beachtliches Einsparpotential. Die Erweiterung der Regelungsstrategie durch eine adaptive Generatoransteuerung bringt zusätzliches Einsparpotential. Auffällig ist, entgegen der ersten Erwartungen ein geringes Einsparpotential der dynamischeren Fahrzyklen WLTC und KRP. Die Ursache dafür begründet sich in der begrenzten Generatordynamik des Fahrzeugs zur Vermeidung von Momentsprüngen an der Kurbelwelle. Bis die Generatorleistung zur Rückspeisung der Energie erhöht wurde, ist bei den dynamischen Fahrzyklen der Schubbetrieb meist vorüber und das Rückspeisepotential kann nicht genutzt werden. Das Simulationsmodell, wie auch die Prüfstandsvalidierung wurde für einen betriebswarmen Motor ausgelegt und bietet so die Möglichkeit, direkt vom Kraftstoffver-

brauch auf den CO<sub>2</sub> Ausstoß zu schließen. Mit dem Faktor  $\frac{2,62 \text{ kg CO}_2}{11 \text{ Diesel - Kraftstoff}}$  ergibt sich somit ein CO<sub>2</sub> Einsparpotential zwischen 2,6 g/km und 4,2 g/km.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass es durch einen Wechsel der Starterbatterie-Technologie neben einer deutlichen Gewichtsersparnis auch möglich ist, durch den Einsatz neuer Betriebsstrategien weitere Kraftstoffeinsparungen zu erzielen. Durch eine Entkopplung des Generators vom Dauerbetrieb in Zugphasen und der gezielten Verwendung in Rekuperationsphasen und Bereichen mit besonders effizienter elektrischer Energieerzeugung ist weiteres Einsparpotential realisierbar. Die erzielbaren Ergebnisse bedürfen außer dem Speichertausch und einer Anpassung der Betriebsstrategie keiner weiteren Änderungen am Fahrzeug. Die Begrenzung des Potentials liegt hier zum einen an den Eigenschaften der Blei-Säure-Starterbatterie angepasst und zu klein dimensionierten Generators. Die untersuchte LFP-Batterie ist durchaus in der Lage, bei maximaler Ladespannung Ströme von 400 A und mehr aufzunehmen. Die Verwendung eines Generators mit höherer Leistungsfähigkeit würde sich ohne Berücksichtigung der veränderten Generator-, Batteriewirkungsgrade sowie der Verluste durch die Zuleitungen bei idealer Dynamik direkt proportional auf eine Potentialerhöhung der vorgestellten Strategien auswirken. Eine weitere Begrenzung für die Zyklen höherer Dynamik ergibt sich durch die im untersuchten Fahrzeug träge ausgelegte Ansteuerungsdynamik des Generators. Um plötzliche Lastsprünge im Umfeld der Kurbelwelle zu vermeiden wird der starr mechanisch an die Kurbelwelle gekoppelte Generator in seiner Dynamik begrenzt. Dies hat bei hochdynamischen Fahrzyklen zur Folge, dass Schubphasen bzw. Phasen günstigen Wirkungsgrads zur Erzeugung elektrischer Energie beendet sind bevor der Generator eine entsprechend große Strommenge liefern kann. Daher sollten weitere Untersuchungen den Einfluss einer erhöhten Dynamik in Kombination mit vergrößerter Leistungsfähigkeit des Generators hinsichtlich des Kraftstoffeinsparpotentials zeigen.

## Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts DriveBattery 2015 (Intelligente Steuerungs- und Verschaltungskonzepte für modulare Elektrofahrzeug-Batteriesysteme zur Steigerung der Effizienz und Sicherheit sowie zur Senkung der Systemkosten - AEV-Subprojekt: Optimierung des Energiemanagements von Fahrzeugen mit Lithium-Ionen Starter- und Bordnetz-Batterien) und wurde durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) unter der Subventionsnummer 03 ET6003 I finanziert. Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

## Literatur

- [1] C. Schroeder, *Porsche: Erstmals Starterbatterie mit Lithium-Ionen-Technik lieferbar | Automobil- und Motorentechnik > Aus der Branche > Nachrichten*. Available: <http://www.springerprofessional.de/porsche-erstmals-starterbatterie-mit-lithium-ionen-technik-lieferbar-10908/3946908.html> (2015, Feb. 15).

- [2] BMW AG, *BMW M3/M4 Produktinformation*. München, 2014.
- [3] J. Liebl, "Intelligente Generatorregelung Ein Weg zur Effizienten Dynamik," *ATZ elektronik*, vol. 04/2008, pp. 6–15, 2008.
- [4] E. Karden, P. Shinn, P. Bostock, J. Cunningham, E. Schoultz, and D. Kok, "Requirements for future automotive batteries – a snapshot," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 505–512, 2005.
- [5] M. J. Schindler, *Mehr Batteriesysteme für Mikro-Hybrid Fahrzeuge auf Basis von Blei-Säure und Lithium-Ionen-Technologie*. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] D. U. Sauer, *Optimierung des Einsatzes von Blei-Säure-Akkumulatoren in Photovoltaik-Hybrid-Systemen unter spezieller Berücksichtigung der Batteriealterung*. Dissertation Technische Universität Ulm, 2003.
- [10] 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.
- [11] M. Roscher, *Zustandserkennung von LiFePO<sub>4</sub>-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Herzogenrath: Shaker, 2011.
- [12] 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.
- [13] S. Büchner, *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*, 1st ed. Göttingen: Cuvillier, 2008.
- [14] A. Urlaub, *Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1994.
- [15] F. Winke and Bargende Michael, "DYNAMISCHE SIMULATION VON STADT-HYBRIDFAHRZEUGEN," *Motorzeitung*, vol. 2013, no. 09/2013, pp. 702–709, 2013.
- [16] T. Christ, *Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen*. Düsseldorf: VDI Fortschrittsberichte, 2006.

## **Autoren / The Authors:**

*Daniel Renner, M.Sc., Audi Electronics Venture GmbH Ingolstadt*

*Xiangfeng Zhang, M.Sc., TU Braunschweig*

*Patrick Jansen, M.Sc., Audi Electronics Venture GmbH Ingolstadt*

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

*Dr.-Ing. Werner John, SiL GmbH Paderborn/Leibniz Universität Hannover (TET)*

*Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund (AG Bordsysteme)*