

## Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: <b>Solfas Technologie GmbH</b>	Förderkennzeichen: <b>16EMO0263</b>
Vorhabenbezeichnung: „Einfluß von SiC-Wechselrichtern auf die Lebensdauer von Traktionsbatterien (SiCWell)“	
Teilvorhaben: Entwicklung eines Batterietestsystem	
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.09.2018 bis 30.11.2022</b>	
Berichtsdatum <b>29.09.2023</b>	
Vorgelegt beim Projektrträger:  VDI/VDE Innovation + Technik GmbH  Steinplatz 1  10623 Berlin	
Vorgelegt durch:  <b>Clemens Wache</b>  <b>E-Mail:</b> <a href="mailto:wache@solfas.com">wache@solfas.com</a>  <b>Telefon:</b> <b>+49 3091603201</b>	

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Teilprojekt

### **Gesamtziel des Projektes:**

Zielsetzung des Projektes ist es, durch Untersuchung der Auswirkungen von schnell schaltenden SiC Leistungshalbleitern auf die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie Lebensdauermodelle zu erarbeiten, die eine optimale Systemauslegung ermöglichen.

Die Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH (SOLFAS) im Jahr 2018 bezogen sich auf mehrere Punkte in den Arbeitspaketen AP 1, AP 2 und AP 6. Diese werden nachfolgend dokumentiert.

### **1.1. Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH im Arbeitspaket 1.b (Planung der Lebensdauertests, Spezifikation der zu untersuchenden Parameter)**

Basierend auf den in AP 1.a von der Daimler AG (DAIMLER) ermittelten Batteriezellen und den zur Verfügung gestellten Parametern für das Batterieersatzschaltbild und den von der Technischen Universität Berlin - Fachgebiet Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik (TUB-EET) ermittelten Anforderungen für die Lebensdauertests wurden von SOLFAS die Anforderungen für das zu realisierende Testsystem mit überlagerten Rippelströmen ermittelt.

Dabei wurden die Anforderungen für Lebensdauertests hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit und einer von SOLFAS angestrebten universellen, skalierbaren und effizienten Lösung mit den Projektpartnern diskutiert und angepasst. Die angestrebten Parameter für Gleichstrom und überlagerte Wechselstromamplitude sowie Frequenz wurden durch Berechnung und Simulation mit den vorgegebenen Batteriedaten überprüft.

Die von TUB-EET und DAIMLER geplanten Einzelmessungen und Testsequenzen wurden bei der Entwicklungsplanung für ein Umschaltsystem für automatische Check-Up Messungen berücksichtigt. Dies wurde zusammen mit den anderen Testparametern in die Technische Spezifikation des Testsystems für Rippelströme aus AP 1.c übernommen.

## **1.2. Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH im Arbeitspaket 1.c (Spezifikationen für das Testsystem Batterie)**

Für die Durchführung der Alterungstests wurde ein spezielles Testsystem benötigt. Mit dem Testsystem müssen die Zellen zyklisch belastet werden können, gemäß den spezifizierten Gleich- und Wechselströmen aus AP 1.b. Die Komponenten des Testsystems müssen zudem eine stetige Überwachung der zellrelevanten Parameter sowie die in AP 1.b spezifizierten Check-Ups erlauben. Basierend auf den geplanten Lebensdauertests, Check-Ups und den Daten über die zur Verfügung stehenden Zellen sind die technischen Spezifikationen an das Testsystem wie Strom- und Spannungsbereich, Genauigkeiten, Datenerfassung etc. festgelegt worden.

Gemeinsam mit dem Fachgebiet Mess- und Diagnosetechnik der TU Berlin (TUB-MDT) und TUB-EET wurde ein Lastenheft für ein Batterietestsystem erstellt, mit dem Zellen bei gleichzeitiger Überlagerung von Gleichströmen und hochfrequenten Wechselströmen zyklisiert werden können.

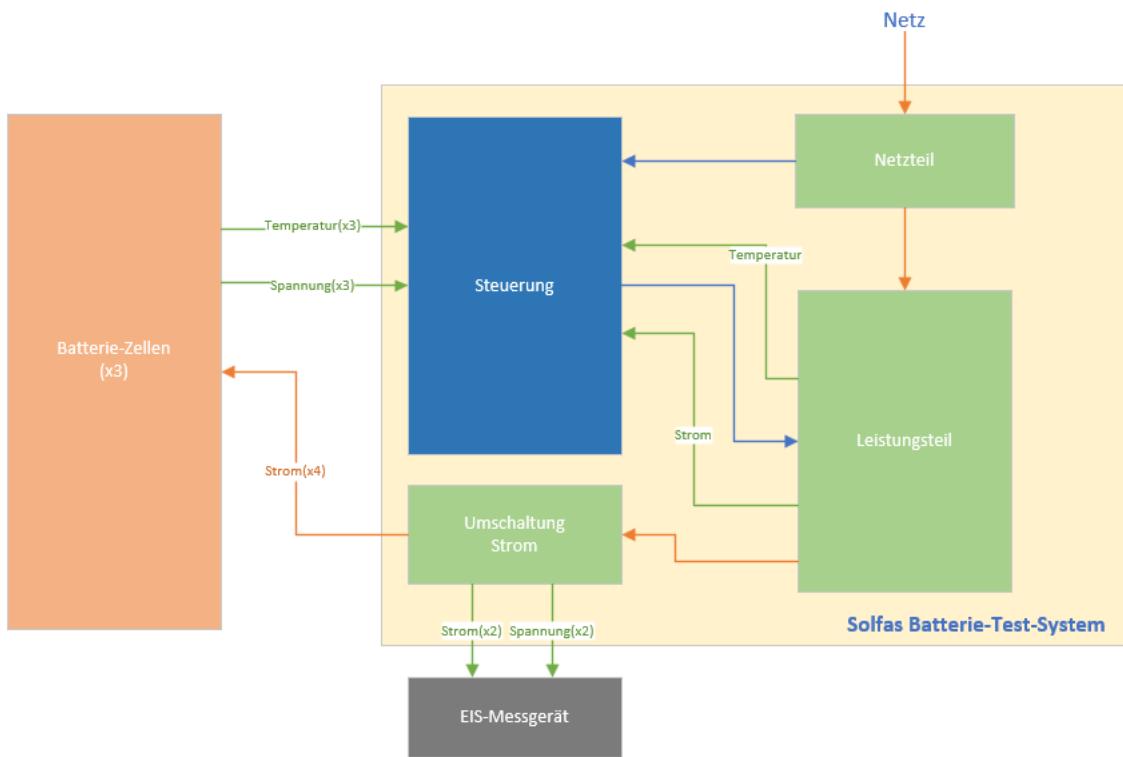
Die Parameter für Gleichstrom- und überlagerte Wechselstromamplitude wurden überprüft und unter Berücksichtigung der geplanten Schaltungstopologie und einer sinnvollen Auslegung der Systemleistung in eine Spezifikation für Ausgangsspannungen überführt. Dies gewährleistet, dass die Spezifikation unabhängig von den Batteriezelle und Ihrer parasitären Induktivität ist. Damit wurde auch die maximale Verlustleistung auf ein technisch akzeptables Niveau festgelegt.

Das System soll das Laden und Entladen von Batteriezellen im programmierbaren Zyklus ermöglichen. Die Regelung kann dabei auf konstanten Strom oder Spannung erfolgen. Die Bedingung für die Zyklenumkehr ist einstellbar, es sind Zellspannung, Ladungsmenge oder Zellstrom möglich.

Zyklische, automatische Zell-Check-Ups sollen durch eine Umschaltung ermöglicht werden. Dabei können eine Kapazitätsbestimmung und ein Pulstest durchgeführt werden. Eine Impedanzspektroskopie soll mit einem externen Messgerät durchgeführt werden.

Die Steuerung des Systems soll mit einer Software auf dem PC erfolgen. Die Kommunikation erfolgt dabei über Ethernet. Der Aufbau soll mit mehreren Kanälen im Schaltschrank erfolgen.

Für die Sensorik zur Überwachung und Messung sind 3x Spannungsmessung, 1x Strommessung und 3x Temperatursensor (PT100) vorgesehen.



### 1.3. Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH im Arbeitspaket 2.a (Entwicklung des prototypischen Testsystems)

In AP 2.a entwickelt die SOLFAS das Batterietestgerät mit optionalen Wechselströmen auf Basis des unter AP 1.c zusammengestellten Lastenheftes.

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war es, zwei voll funktionsfähige Prototypen zu entwickeln. An diesen Prototypen sollten Tests und Messungen an Batteriezellen durchgeführt werden, so dass bei der späteren Vervielfältigung etwaige Probleme behoben sind. Während der Entwicklung begleiteten uns die jeweiligen Institute von der TU-Berlin.

Hierfür wurde die Entwicklung der Hardware für die einzelnen Schaltungen, d.h. Sensoriken, Umschaltungen und Steuerungen/Regelungen, abgeschlossen und wenn nötig noch simulativ oder durch entsprechende Testaufbauten validiert. Besonders wurde hier auf die Simulation und den Vorabtest der Lade- und Entladeansteuerung geachtet. Neben einer Gleichstromamplitude, musste der Leistungsentwurf auch in der Lage sein frequenzabhängige Wechselstromanteile, frequenz- und amplitudenstabil abbilden zu können.

In Zusammenarbeit mit den beiden Instituten EET und MDT der TU-Berlin wurde ein Softwarelastenheft erstellt, um die späteren Funktionalitäten des Batterietestgerätes (Sinuszyklisierer) zu gewährleisten. Dieses Lastenheft wurde während der Entwicklung der Software von beiden Projektpartnern stets angepasst, ergänzt und erweitert.

Die Entwicklung der Embedded Steuerung begann bereits vor der Produktion der Prototypen. Mit Hilfe eines Solfas internen Entwicklungskits konnten viele Konzepte und Vorgaben aus dem Lastenheft umgesetzt werden.



In der Embedded Steuerung wurden grundlegende und erweiterte Sicherheitsfunktionen implementiert. Des Weiteren wurden Messdatenerfassungen, -auswertung, Fehlerbehandlung und unterschiedliche Regelungsalgorithmen umgesetzt. Neben den fundamentalen Aufgaben eines Zyklisierers, wurde eine komplexe, individualisierbare und skalierbare Ablaufsteuerung zur vollautomatischen, unbeaufsichtigten Zyklisierung von Batteriezellen implementiert. Während der ganzen Entwicklung der Steuerung stand Solfas einzelne Batteriezellen und Zellstapel zur Verfügung, um eine Praxisnahe Entwicklung zu gewährleisten.

Durch die verspätete Fertigstellung im November 2019 der Prototypen wurden die ersten Tests und Messungen bei Solfas vor Ort durchgeführt. Diese beinhalteten Messungen an Einzelzellen und an Zellstapel. Hierfür stand uns eine Testmatrix zur Verfügung, die von uns

abgearbeitet wurde. Die Messwertauswertung wurde vom Institut EET der TU-Berlin durchgeführt. Nach der Messwertauswertung mussten noch einige Soft- und Hardwareoptimierungen durchgeführt werden, um die Signalqualität der Messwerte zu verbessern.

Die Hardwareentwicklung des Prototyps konnte im Dezember 2019 abgeschlossen und die Vervielfältigung der Kanäle angestoßen werden.

#### **1.4. Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH im Arbeitspaket 2.b (Bau weiterer Testsysteme)**

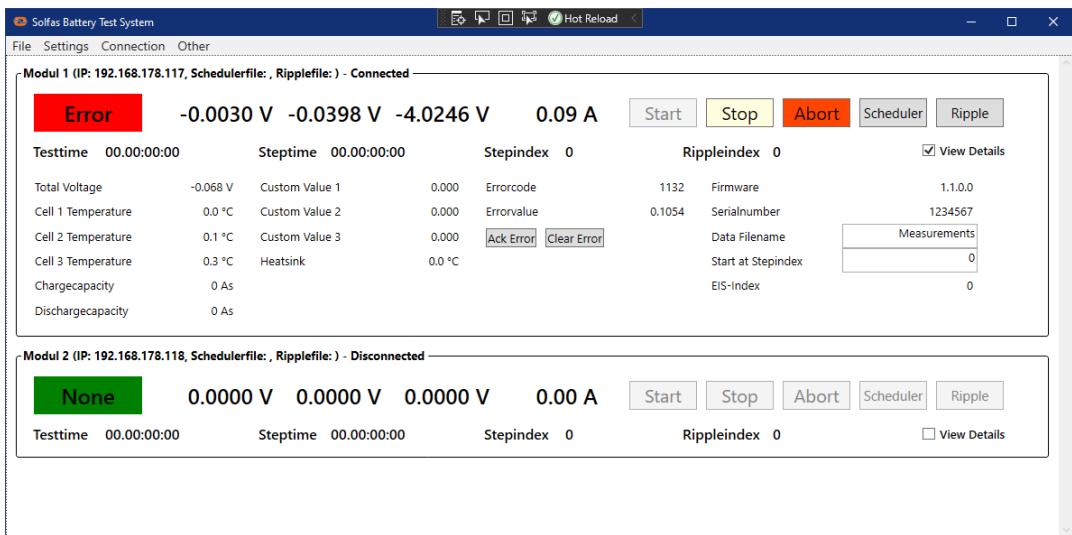
Für die Vervielfältigung der Batterietestgeräte und die Verkabelung der nötigen Schaltschränke ist die Firma SEM Schaltschrankbau GmbH ist zuständig. Hierfür wurden alle nötigen Unterlagen unsererseits zusammengetragen und an die Firma übergeben. Des Weiteren standen wir bei etwaigen Fragen zur Verfügung.

Für die Vervielfältigung der Batterietestgeräte und die Verkabelung der nötigen Schaltschränke war die Firma SEM Schaltschrankbau GmbH zuständig. Die fertigen Module wurden im 2. Quartal 2020 geliefert und vor Ort verkabelt.

#### **1.5. Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH im Arbeitspaket 2.c (Überarbeitung und Anpassung Testsysteme)**

In enger Zusammenarbeit mit der TU-Berlin wurden die aufgebauten Testsysteme in Betrieb genommen und Anpassungen bzgl. der Software durchgeführt. Folgende Softwareanpassungen und Optimierungen wurden durchgeführt:

- Regleranpassungen und - optimierungen
- Reglerentwurf
- Ablaufsteuerung
- Anpassungen an der Bediensoftware
- Fehlerbeseitigungen



Die TU-Berlin unterstützte uns mit den entsprechenden Testaufbauten im Labor, der Auswertung der aufgenommenen Messdaten und der Evaluierung der Messdaten.

Durch den Coronaausbruch im Jahr 2020 war nur ein bedingter Laborzugang möglich. Außerdem kam es zu Kurzarbeit, Homeoffice und Homeschooling. Dies führte zu weiteren Verzögerungen während der Inbetriebnahmezeit.

Die ersten Zyklisierungen konnten im 3. Quartal 2020 gestartet werden. Nachfolgend wurde durch die TU-Berlin weitere Module an die Zellen angeschlossen und die Zyklisierung gestartet.

Im Laufe des Jahres 2021 wurde in Zusammenarbeit mit der TU-Berlin (FB EET und MDT) weitere Softwareanpassungen und Optimierungen durchgeführt. Dies betraf die Firmware der Zyklisiergeräte und die der Steuerrechner.

Durch die Fachbereiche EET und MDT der TU-Berlin wurde Messdaten aufgenommen und diese entsprechend ausgewertet. Dadurch konnten Optimierungen und bessere Funktionalitäten in der Software identifiziert und entsprechend umgesetzt und angepasst werden.

Durch eine gleichzeitige Überprüfung der neuen Software an einem Teststand mit Zellen, konnte eine zeitnahe Überprüfung stattfinden und dadurch ein fehlerfreier Betrieb der Sinuszyklisierer sichergestellt werden.

Im 4. Quartal 2021 erfolgte die Übergabe der Softwarepakete an die TU-Berlin. Hiermit ist die TU-Berlin in der Lage, weitere Anpassungen und Optimierungen durchzuführen.

Die Arbeiten an diesem Arbeitspaket waren damit abgeschlossen.

## **1.6. Projektbeiträge der Solfas Technologie GmbH im Arbeitspaket 6.a (Aufbau Umrichterbasiertes Testsystem und Langzeitmessung)**

In Zusammenarbeit mit dem Institut LE der TU-Berlin wurde ein Ansatz ausgearbeitet, um sogenannte Ripplesets für den Rippeltest auf der Steuerung zu hinterlegen und abzurufen. Problematisch hierbei ist der begrenzte Speicherplatz auf der Steuerung. Durch eine entsprechende Komprimierung der Vorgabewerte für die Ripplesets, konnte eine Speichereffiziente Lösung gefunden werden. Nach Anpassungen und Tests an der Embedded Steuerung konnte dieser Ansatz unsererseits bestätigt werden. Dadurch konnten die Rippletests mit in die Steuerung der Batterietestgeräte integriert werden, wodurch kein zusätzliches System für die Generierung der Ripple notwendig wird.

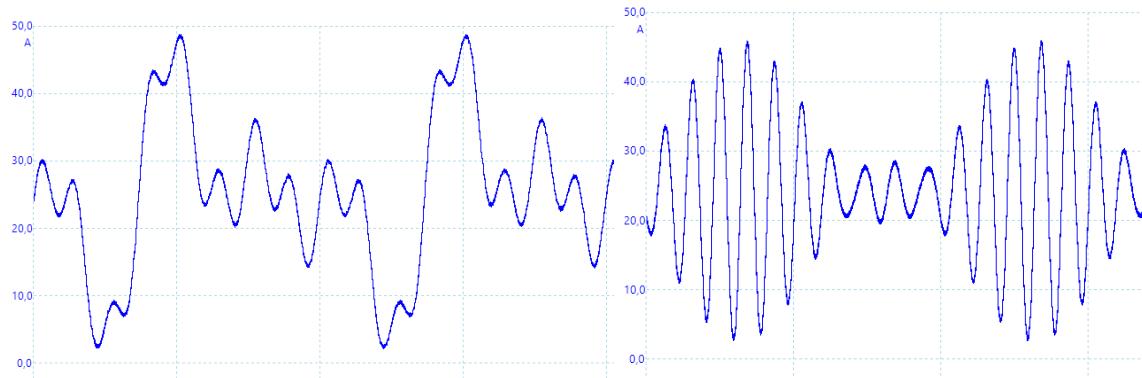
Erste, praxisnahe Tests an Zellen konnte die Funktionsweise des Ansatzes bestätigen. Handlungsbedarf bestand noch bei der Reglergeschwindigkeit, Reglerdynamik und Genauigkeit der einzelnen Stromrippel.

Durch den Lockdown ab Winter 2020 verschob sich die Weiterentwicklung bis in das Jahr 2021. Nach weiteren Tests im Labor musste der bis dahin bestehende Reglerentwurf für den Stromrippel verworfen werden. Dieser berücksichtigte nicht die einzelnen Amplituden der Rippel, wodurch zu große Ungenauigkeiten auftraten.

Als Lösung wurde auf eine Amplitudenbestimmung im Frequenzbereich zurückgegriffen, um anschließend die einzelnen Amplituden unabhängig voneinander zu regeln. Hierfür musste die Firmware der Module angepasst werden und die Funktionalität des Reglers anhand von Messdaten erneut validiert werden. Mit Hilfe des Fachgebietes LE der TU-Berlin, konnte die Implementierung optimiert werden. Auch die Reglerdynamik und -geschwindigkeit wurde verbessert.

Nach verschiedenen Softwareoptimierungen und Auswertungen von Messdaten in Kooperation mit der TU-Berlin, konnte die Reglerdynamik und -geschwindigkeit optimiert werden.

Seit August 2021 ist die Softwareentwicklung für die Rippletests abgeschlossen und erfüllt alle Anforderungen für die Durchführung der Tests.



## 2. Einsatz von Ressourcen

### 2.1. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Die Arbeiten verliefen ungefähr gemäß dem Arbeitsplan. Aufgrund des verschobenen Projektstarts liegt jedoch eine Verzögerung um 2-4 Wochen vor.

Während der Detailplanung zusammen mit TUB-EET wurde festgestellt, dass die Zeitplanung für die Arbeitspakete AP 2.b (Bau weiterer Testsysteme) und AP3.b (Tests mit überlagerten Rippeln) überarbeitet werden muss. Der AP 3.b kann erst starten wenn alle Testsysteme aus AP2.b zur Verfügung stehen.

Die Planung dafür wurde zusammen mit TUB-EET überarbeitet, es wurde nicht damit gerechnet, dass das zu weiteren Verzögerungen im Projektablauf führt.

Eine Übersicht der tatsächlich in den einzelnen Arbeitspaketen erbrachte Arbeitsleistung im Vergleich zu der vorab geplanten Arbeitsleistung kann aus der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Durch den verzögerten Start der Zyklisierungen und den langsamer als angenommen alternden Zellen, waren die Zyklisierkanäle noch länger als im ursprünglichen Projektplan angenommen in Betrieb. Aus dem laufenden Betrieb ergeben sich für Solfas damit weiterhin Erkenntnisse, um die Zyklisierer weiterentwickeln und optimieren zu können.

Bedingt durch den mehrfachen Lockdown und die dadurch resultierenden Einschränkungen konnten die Entwicklung von AP6.a (Aufbau Umrichterbasiertes Testsystem und Langzeitmessung) nicht im Jahr 2020 fertiggestellt werden und verschob sich bis in das 1. Quartal 2021.

Arbeitspakete	Geplant in PM <sup>1</sup>	Geleistet in PM
AP 1.b	0,5	0,5
AP 1.c	2,0	2,0
AP 2.a	9	8,5
AP 2.b	4	3
AP 2.c	4	4
AP 6.a	9	11
<b>Summe</b>	<b>28,5</b>	<b>29</b>

<sup>1</sup> Personenmonate

Position	Bewilligung	Ist
Material	19.054,00 €	13.693,39 €
Reisekosten	4.750,00 €	34,80 €

### **3. Fortschreibung des Verwertungsplans.**

Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des Zuwendungsempfängers brauchen nicht offenbart zu werden):

- Erfindungen/Schutzrechte und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten,**

Es wurden weder Schutzrechte angemeldet noch in Anspruch genommen.

- Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt),**

Es ergeben sich keine Änderungen zum Antrag.

- Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen,**

Es ergeben sich keine Änderungen zum Projektstart.

- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse.**

Es ergeben sich keine Änderungen zum Projektstart.

## Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: <b>Solfas Technologie GmbH</b>	Förderkennzeichen: <b>16EMO0263</b>
Vorhabenbezeichnung: „Einfluß von SiC-Wechselrichtern auf die Lebensdauer von Traktionsbatterien (SiCWell)“	
Teilvorhaben: Entwicklung eines Batterietestsystem	
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.09.2018 bis 30.11.2022</b>	
Berichtsdatum <b>29.09.2023</b>	
Vorgelegt beim Projektrträger:  VDI/VDE Innovation + Technik GmbH  Steinplatz 1  10623 Berlin	
Vorgelegt durch:  <b>Clemens Wache</b>  <b>E-Mail:</b> <a href="mailto:wache@solfas.com">wache@solfas.com</a>  <b>Telefon:</b> <b>+49 3091603201</b>	

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 1. Darstellung des Projektergebnisses

### **Ursprüngliche Aufgabenstellung:**

Zielsetzung des Gesamtprojektes ist es, durch Untersuchung der Auswirkungen von schnell schaltenden SiC Leistungshalbleitern auf die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie Lebensdauermodelle zu erarbeiten, die eine optimale Systemauslegung ermöglichen.

Die Aufgabe der Solfas Technologie GmbH bestand darin, ein Batterietestsystem zu entwickeln, mit dem es möglich ist, die genannten Untersuchungen durchzuführen.

Das Batteriesystem sollte in der Lage sein, die Batteriezellen bei gleichzeitiger Überlagerung von Gleichströmen und hochfrequenten Wechselströmen zu zyklisieren.

### **Ablauf des Vorhabens und Ergebnisse:**

Um die Aufgabenstellung zu realisieren wurde ein Gerät entwickelt, das den Anforderungen entspricht. Hierfür wurden im Vorfeld Testaufbauten, Simulationen und Berechnungen durchgeführt, um die benötigte Hardware zu definieren und zu validieren. Dies umfasste u.a. die Spannungs- und Strommessung, das Regelungskonzept, die Kühlung, die Größe des Leistungsteils und die Umsetzung der softwareseitigen Steuerung.

Anschließend konnte mit dem eigentlichen Bau des Gerätes begonnen werden. Hierfür wurden Schaltpläne, Platinen, Dokumentationen und Anweisungen erstellt. Mit Hilfe des ersten Prototyps wurden die definierten Funktionen nochmals getestet, teilweise optimiert und abschließend validiert. Nachdem alle notwendigen Komponenten des Gerätes funktionsfähig waren, konnte die Vervielfältigung der Geräte in Auftrag gegeben werden. Dies umfasste den Bau weiterer Batterietestsystem, deren Integration in ein 19“ Schaltschrank und dessen Verkabelung.

Parallel zum Hardwareentwurf und -fertigung wurde die benötigte Software des Gerätes entwickelt, um die Geräte mit Hilfe eines PC's ansteuern zu können.

Sowohl die Hardware- und Softwareentwicklung geschah immer in enger Zusammenarbeit mit den entsprechenden, teilnehmenden Forschungseinrichtungen der TU-Berlin, um die Zielsetzung des Gesamtprojektes zu erreichen.

Abschließend konnte die Aufgabenstellung realisiert werden und das Batterietestsystem erfolgreich in Betrieb genommen werden.