


# Schlussbericht

## Bibliotheksversion

<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Batteriel Ingenieure GmbH
<b>Förderkennzeichen:</b>	03ETE028G
<b>Vorhabensbezeichnung:</b>	NeuroBatt – Neuronale Netzwerke zur Zustandsüberwachung von Batterien; Teilvorhaben: BMS zur Zustandsüberwachung von Batterien mittels neuronaler Netzwerke
<b>Datum Zuwendungsbescheid:</b>	15.02.2023
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.03.2021 bis 29.02.2024
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.03.2021 bis 29.02.2024
<b>Autoren:</b>	Dominik Schulte, Markus Niessen, Christoph Basler
<b>Projektträger:</b>	PTJ Jülich
<b>Fördergeber:</b>	<p>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</p> <p>Gefördert durch:</p>  <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</p> <p>aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages</p>

Aachen, 30.08.2024

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>VORHABEN</b>	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
<b>2</b>	<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG</b>	<b>6</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung	6
2.1.1	Modulkonstruktion	6
2.1.2	Batteriemanagementsystem und Datenerfassung	9
2.2	Zahlenmäßiger Nachweis	11
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	11
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	12
2.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens	12
2.6	Veröffentlichungen	12
<b>3</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>13</b>

# 1 Vorhaben

Verbundprojekt: NeuroBatt – Neuronale Netzwerke zur Zustandsüberwachung von Batterien, TV:  
Realisierung eines sensorintegrierten Demonstrator-Moduls

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Teilvorhaben „Realisierung eines sensorintegrierten Demonstrator-Moduls“ zielt auf die konzeptionelle Entwicklung und technische Umsetzung eines mit optischen Sensorelementen ausgestatteten Batteriemoduls ab. In diesem Zusammenhang bildet die Entwicklung eines Modulmanagementsystems, das über geeignete Schnittstellen zur Implementierung der optischen Sensorwerte in die elektrische Steuerungseinheit verfügt, den wesentlichen Arbeitsschwerpunkt. Neben den optischen Sensordaten sollen auch dynamische Impedanzwerte, die eine Echtzeitanalyse der Zellen im Betrieb ermöglichen, vom System erfasst werden. Auf diese Weise sollen auftretende Kapazitätsverluste frühzeitig detektiert und die Steuerung der Zellen optimiert werden.

Basierend auf einer Anforderungsanalyse an die Hard- und Softwarekomponenten des Systems soll zunächst eine geeignete Architektur für ein Basis-Modul mit Schnittstellen zur Analyse der faseroptischen Sensordaten entwickelt werden. Dazu sollen die einzelnen Komponenten umfassenden elektro-chemischen Charakterisierungs- und Belastungstests unterzogen werden. Diese Tests bilden die Grundlage zur technischen Umsetzung eines vollausgestatteten Sensor-Demonstrator-Moduls, in dem die Komponenten auf Systemebene zusammengeführt und um die optische Sensorik und das entsprechende Subsystem zur Auslesung der Sensordaten ergänzt werden. Durch die Implementierung von optischen Sensorwerten und KI-basierten Modellen in das Batteriemanagementsystem (BMS) soll eine frühzeitige Detektion von Degradationsprozessen ermöglicht werden, die zum Ausfall der Zellen und im schlimmsten Fall zum thermischen Durchgehen (engl. thermal runaway) führen können.

Abschließend soll durch die Entwicklung potenzieller Use-Cases ein umfassendes Verwertungs- und Vermarktungskonzept des entwickelten Systems erstellt werden.

## 1.2 Voraussetzungen

Die Arbeiten der BatterieIngenieure GmbH wurden komplett am Firmenstandort Hüttenstr. 5, 52068 Aachen durchgeführt.

Während der Projektlaufzeit wurde auch auf bestehende Ressourcen (Computer, Software, Prüfkreise, Arbeitsplatz Elektrik) zurückgegriffen.

## 1.3 Planung und Ablauf

Die Firma BatterieIngenieure GmbH ist dem Konsortium während der Projektlaufzeit beigetreten und hat die Arbeiten eines Projektpartners übernehmen, der aus dem Projekt ausgeschieden ist. Die ursprüngliche Projektlaufzeit für die BatterieIngenieure GmbH ist 01.03.2021 bis 31.08.2023, das Projekt wurden noch bis zum 28.02.2024 verlängert.

## 1.4 Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Zentrale Aufgabe eines Batterie-Management-Systems (BMS) ist es, den sicher Betrieb einer Li-Ionen Batterie zu ermöglichen. Dazu muss das BMS Spannungs-, Strom- und Temperaturwerte messen, überwachen und auswerten. Sollte es hier zu Verletzungen der Betriebsparameter, die in der Regel im Zelldatenblatt angegeben sind, kommen, so muss das BMS den Betrieb der Batterie verhindern bzw. einschränken. Die Verwendung eines solchen BMS ist aktueller Stand von Wissenschaft und Technik. Das BMS kann somit auf äußere Einflussfaktoren wie Temperatur und elektrische Leistung reagieren. In den meisten Fällen übernimmt das BMS auch die Diagnostik, um beispielsweise den Ladezustand und die Alterung zu bestimmen. Dies erfolgt nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik meistens durch Algorithmen, die die Zustände bestimmen. Besonders bei der Bestimmung der Alterung erfolgt dies aktuell noch deutlich fehlerbehaftet. Jedoch hat auch die Bestimmung des Alterungszustands einen Einfluss auf die Sicherheit der Batterien, daher ist die genaue Ermittlung des Alterungszustands von sehr hoher Relevanz. Ferner können aktuelle Batterie-Management-Systems interne Fehler wie beispielsweise Einzelzelldefekte, wenn überhaupt, nur mit einer sehr unzureichenden Genauigkeit erkennen.

Der in diesem Projekt verfolgte Ansatz geht somit über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik hinaus. Ein BMS, wie es oben beschrieben wurde, dient als Grundlage. Jedoch werden, durch die innovativen neuen Messverfahren mit optischen Sensorelementen sowie der dynamischen Impedanzspektroskopie, neue und genauere Messverfahren die Funktionen des BMS unterstützen bzw. ergänzen.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurde sehr eng mit den übrigen Partnern im Konsortium zusammengearbeitet, dies sind:

- Algorithmica Technologies GmbH, 61231 Bad Nauheim
- BatterieIngenieure GmbH, 52068 Aachen
- Custom Cells Itzehoe GmbH, 25524 Itzehoe
- Frequenz Energy-as-a-Service GmbH, 10179 Berlin
- FiSens GmbH, 38126 Braunschweig
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut HHI, 38640 Goslar

Darüber hinaus gab es keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder Unternehmen.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung

Wesentliche Arbeitsthemen der Firma BatterieIngenieure GmbH waren die Entwicklung einer Elektronik zum sicheren Betrieb von Modulen sowie zur Datenerfassung, die Konzepterstellung der Batteriemodule, der Aufbau von Batteriemodulen sowie die Durchführung diverser Prüfungen zur Datengenerierung. Die Daten wurden an die Projektpartner zur weiteren Bearbeitung und Analyse übergeben.

#### 2.1.1 Modulkonstruktion

Im Rahmen des Projektes Neurobatt liegen die grundlegenden Anforderungen an das Batteriemodul in der elektrischen und mechanischen Kontaktierung der Zellen. Weiterhin muss das Modul die Integration von elektrischen und optischen Sensoren erlauben, die innerhalb des Projektes vorgesehen sind.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Module in 12s1p und 6s1p Konfiguration entwickelt, realisiert und getestet. In allen Modulen wurden baugleiche Pouch-Zellen verbaut, die vom Projektpartner produziert wurden.

Da sich von der Art der Polfahnenkontaktierung viele konstruktive Bedingungen ableiten, wurde diese zuerst festgelegt. Hierfür sind mehrere Verfahren bekannt und bei industriellen Anwendungen gebräuchlich. Beispielhaft zu nennen sind das Verschrauben auf Platinen und eine Bolzenverbindung, wodurch jeweils aber die Polfahne durchlöchert und damit deren Leitfähigkeit negativ beeinflusst wird. Bei industriell gefertigten Batteriemodulen werden die Polfahnen häufig miteinander verschweißt, wofür eine entsprechend maschinelle Ausstattung benötigt wird. Für die Konstruktion einzelner Prototypen ist dieses Verfahren nicht verhältnismäßig und der zeitliche und kostentechnische Aufwand nicht gerechtfertigt. Deshalb wurde sich in diesem Projekt für eine zerstörungsfreie, gestapelte Polfahnenverbindung entschieden. Als *proof of concept* dient ein Konferenzpapier [1].

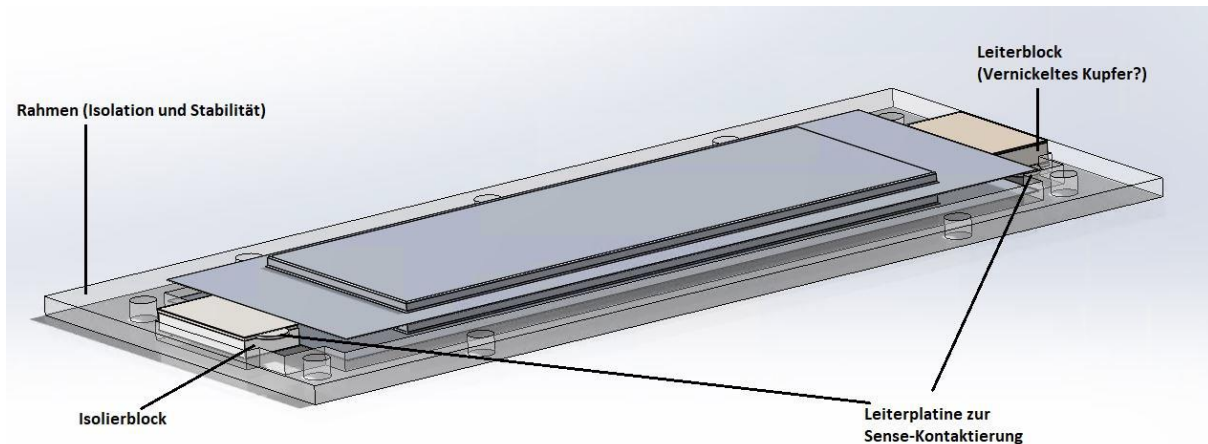


Abbildung 1: Prinzipskizze der gestapelten Polfahnenverbindung

In obiger Abbildung ist das Grundprinzip der Polfahnenkontaktierung graphisch dargestellt. Die Pouch-Zellen werden jeweils um 180° gedreht aufeinandergestapelt. Zwischen den Polfahnen liegt alternierend ein Isolations-, und ein Leiterblock, um die gewünschte 12s1p-bzw. 6s1p-Konfiguration zu erzeugen. Dabei kontaktiert der Leiterblock an seinen Seiten jeweils eine Aluminium-Polfahne und eine Nickel-Polfahne, was die Materialauswahl aus Gründen der reinmetallischen Kontaktkorrosion problematisch macht. Hierfür wurde ein vernickelter Kupferblock verwendet. Der Potentialunterschied von Nickel gegenüber den Materialien der Polfahnen ist gering genug, um eine solche Kontaktkorrosion weitestgehend zu unterbinden. Die Ausprägung dieses Effektes ist abhängig von der geleiteten Stromstärke. Der Kupferkern des Leiterblocks gewährleistet eine optimale Leitfähigkeit. Um Kontaktwiderstände zu vermeiden, wurde die Verbindung von Kupfer und Nickel des Leiterblocks stoffschlüssig realisiert.

Um die gesamte Konstruktion während der Montage stabil zu halten, wurden Rahmenelemente aus dem Kunststoff ABS verwendet, die in einem 3D-Drucker gefertigt wurden. Diese Elemente isolieren zusätzlich das Modul nach außen und schützen die Zellen im finalen Aufbau vor äußerlichen Krafteinwirkungen.

Die folgenden Abbildungen zeigen das entwickelte Batteriemodul.

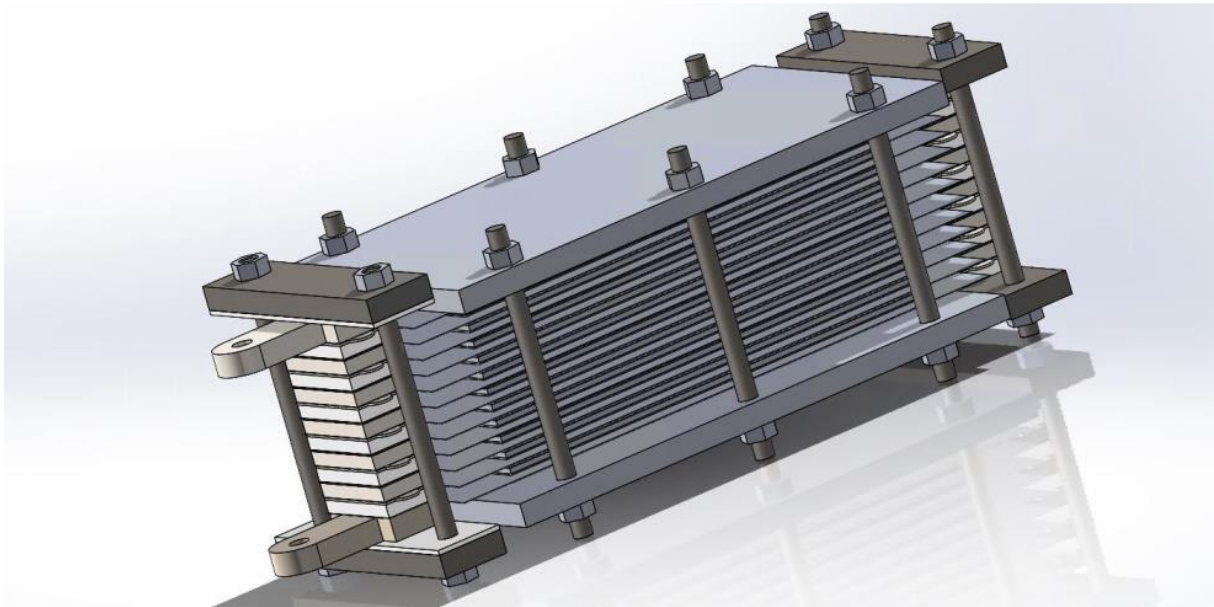


Abbildung 2: Seitenansicht des 12s1p Batteriemodul: 3D-Modell mit ausgeblendeten ABS-Rahmen

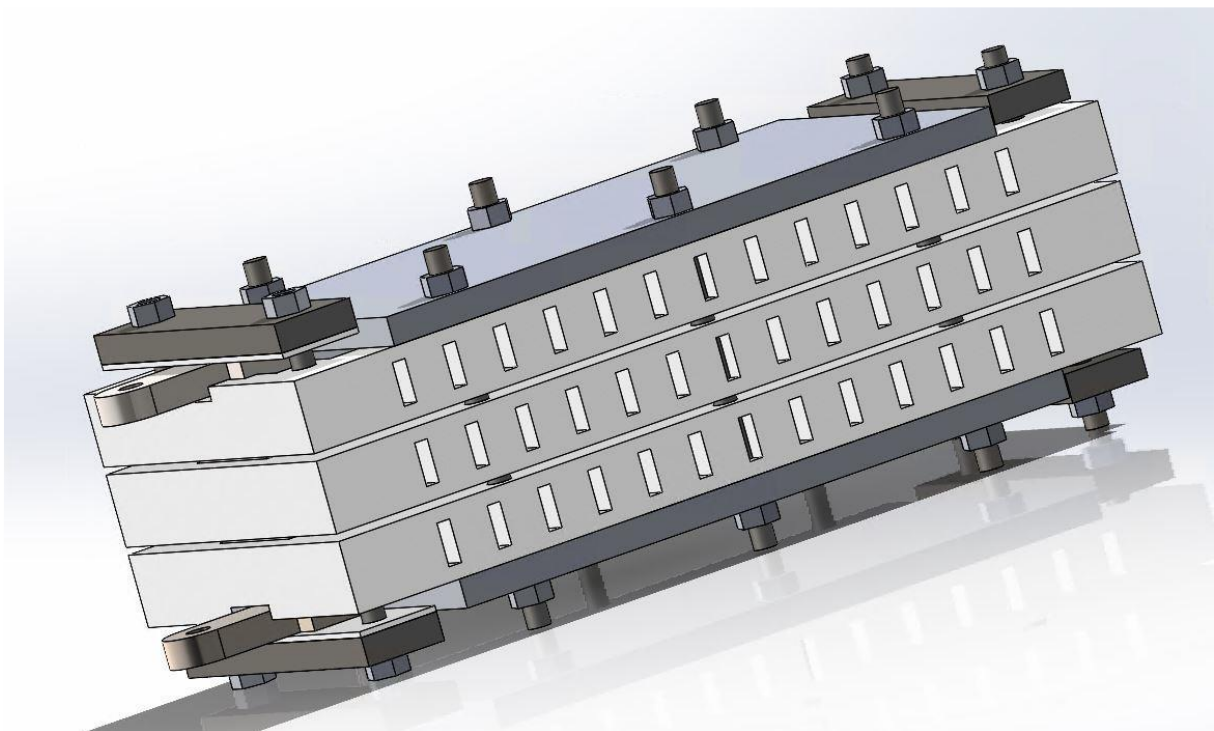
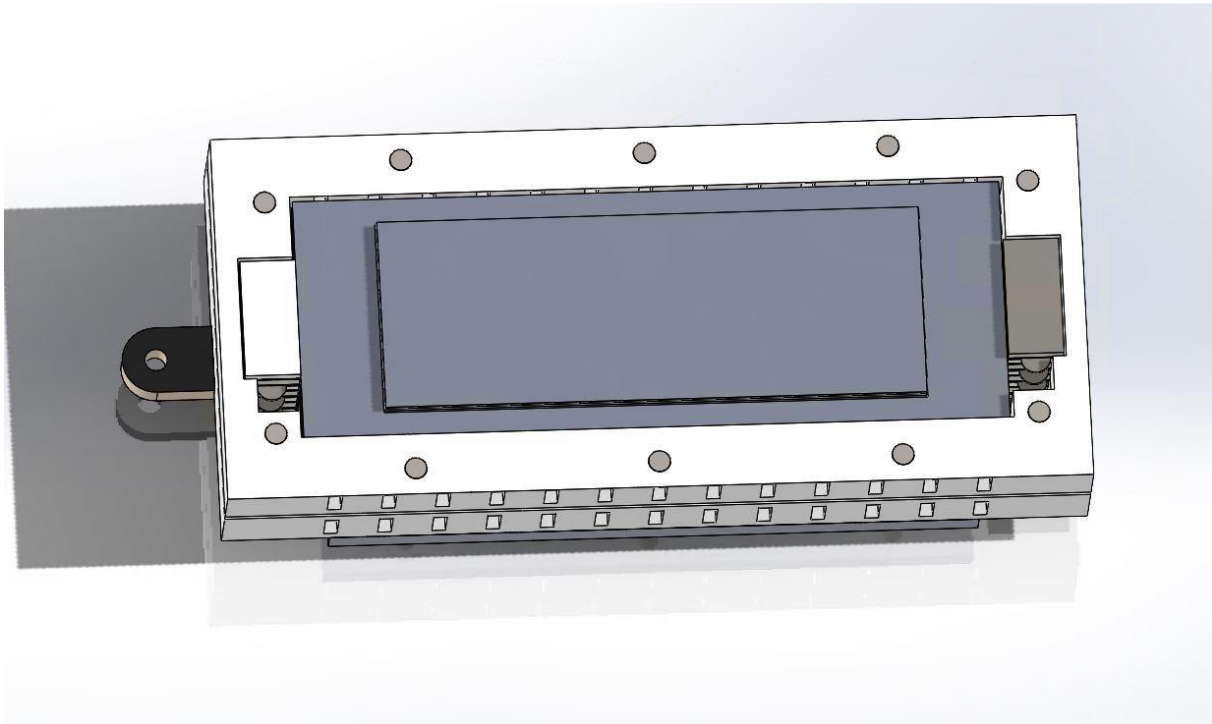


Abbildung 3: Seitenansicht Batteriemodul 3D-Modell



*Abbildung 4: Schnittansicht von oben Batteriemodul 3D-Modell*

Für die Außenkontaktierung haben die abschließenden Leiterblöcke entsprechende Überhänge zur Befestigung von Kabelschuhen.

### 2.1.2 Batteriemanagementsystem und Datenerfassung

Elementar für die Sicherheit von Batteriespeichersystemen mit Lithium-Ionen Zellen ist das BMS (Batteriemanagementsystem). Es übernimmt die grundsätzlichen Überwachungsfunktionen der Zellen auf Zell und Packebene. Hierzu zählt vor allem der Überladeschutz (d.h. Schutz vor Überspannung an jeder einzelnen Zelle), der Tiefentladeschutz (d.h. Schutz vor Unterspannung an jeder einzelnen Zelle), sowie der Schutz vor zu hohen Strömen (d.h. Überstromschutz in Lade- und Entladerichtung sowie der Kurzschlusschutz). Diese grundlegenden Funktionen sollten in jedem BMS vorhanden sein. Ihre jeweilige Implementierung kann auf verschiedene Weisen erfolgen (Für den Kurzschlusschutz z.B. Halbleiterschalter oder Sicherungen). Zusätzlich verfügen fast alle BMS über einen Temperatursensor, der vor allem bei Ladevorgängen die Temperatur der Zellen misst. Die Auswertung wird bei kleinen Batteriepacks jedoch meistens den externen Ladegeräten überlassen. Auf ein Angleichen der Ladestände der Zellen wird meist bei sehr kleinen Packs verzichtet. Je größer das Batteriepack, umso aufwendiger ist das BMS gestaltet und es übernimmt zunehmend mehr Funktionen. So verfügen diese BMS über eine genaue Strommessung sowie einer Kommunikationsschnittstelle. Spannungen, Ströme und der berechnete SOC (Ladestand) werden der Anwendung mitgeteilt. Ein Angleichen der Ladestände ist fast immer vorhanden. Mehrere Temperatursensoren überwachen das Zellpack zu jedem Zeitpunkt. Noch größere Packs werden „Intelligent“ ausgeführt und verfügen über

Alterungsprognosen. Außerdem werden Angaben zur aktuell verfügbaren Lade- und Entladeleistung gesendet, welche anhand des SOC, die Temperatur und den SOH (Gesundheitszustand) berechnet.

Bei der BatterieIngenieure GmbH gibt es bereits ein selbst entwickeltes BMS. Dieses diente als Grundlage für die weitere Entwicklung bzw. Anpassung für dieses Projekt.

Zunächst wurde eine Analyse über die auf dem Markt existenten fertigen Messbauteilen zur Spannungsmessung durchgeführt. Speziell zur Überwachung von Lithium Zellen wurden von den großen Chipherstellern viele sehr kompakte Chips entwickelt, welche vom Messbereich, Auflösung und einer integrierten Funktionalität zum Ladungsausgleich der Zellen exakt auf die Anwendung der Messung der Batteriepackgrößen angepasst sind. Diese sind jedoch extrem auf Sicherheit, weniger auf Geschwindigkeit des Messens ausgelegt. Nach der Recherche konnten somit lediglich drei Chips überhaupt die Anforderung an die Geschwindigkeit zur Innenwiderstandsbestimmung mittels Impedanzspektroskopie möglicherweise erfüllen, welche ebenfalls in annehmbarer Zeit bei den größeren Distributoren beschafft werden können. Nach genauerer Betrachtung wurde der „BQ76PL536A“ Lithium-Ion Batterie Monitor Chips von Texas Instruments ausgewählt, der 3 bis 6 Zellen in Serie gleichzeitig messen kann. Es werden zwei Chips verwendet, die jeweils 6 Zellen messen. Zum Testen der Kommunikation und der erreichbaren Geschwindigkeiten wurde eine kleine Platine entwickelt. Diese verfügt über den „BQ76PL536A“ Chip und der benötigten galvanischen Isolation der digitalen Signale, so dass die Kommunikation mit dem Mikrokontroller ebenfalls getestet werden kann.

Die Strommessung wird im Groben übernommen, jedoch in der Genauigkeit und Messfrequenz angepasst. Zusätzlich wird eine Temperaturmessung für die Messeinrichtung ergänzt, um Messfehler durch Temperaturänderung zu kompensieren. Des Weiteren hat sich im Projekt gezeigt, dass die Gesamtspannungsmessung und die Strommessung mehr Potenzial bieten.

Die Temperaturmessung wird durch den Chip der Spannungsmessung mit gemessen und bedarf in Zukunft keiner weiteren Messelektronik.

Als Mikrokontroller wird der „LPC54018“ von NXP, ein Leistungsstarker ARM-Coretex M4 verwendet, welcher über eine Gleitkommaarithmetik verfügt und mit 180 MHz Taktfrequenz arbeitet. Durch SDRAM und Flash Speicherchips auf dem BMS steht mit 128 MB genügend Speicher für die Berechnungen zur Verfügung. Die Datenverarbeitung innerhalb des Mikrokontrollers hat nach Optimierungen das Potenzial im Sekundentakt eine Impedanzmessung mit über 4kHz Grenzfrequenz zu ermöglichen.

Ebenfalls wurde die benötigte Software für diese Hardware entwickelt und erprobt. Strom und Spannungsmessungen des Moduls können so mit der geplanten Frequenz von 10 KHz abgetastet werden, Spannungen der einzelnen 12 Zellen wie geplant mit 4 KHz. Tests zeigten, dass Potential für höhere Abtastraten besteht. Das Modul erlaubte Messungen von über 100kHz, die einzelnen Zellen 5-6kHz. Die Messung der acht Temperaturen erfolgt mit 1Hz. Final konnte nach Implementierung der Software, Filter und allen Messungen die Frequenz der Hardwareseitigen Messung ohne weitere hardwaretechnischen Aufwendungen auf 40 kHz Messfrequenz gesteigert werden, wobei gleichzeitig

die Zellspannungen mit 6 kHz und Temperaturen gemessen wurden, und die Datenauswertung mit 1 kHz erfolgte und eine Übertragung der Messwerte an den Mess-PC erfolgte.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden insgesamt 5 Module aufgebaut. Da es sich sowohl bei den Zellen als auch den Modulen um Prototypen handelte, sind die festgestellten Qualitätsschwankungen und Herausforderungen zu erwarten gewesen. Diese reichen von nicht prüfbar Modulen bis hin zu Modulen, die mehrere hundert Zyklen gealtert werden konnten. Ebenfalls erfolgreich konnten die Daten der Glasfasermessungen erfasst und den Projektpartnern zur weiteren Analyse bereitgestellt werden. Dies gilt sowohl für elektrische Alterungsmessungen an Modulen als auch für Sicherheitstests an Zellen.

## 2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die folgende Tabelle zeigt den zahlenmäßigen Nachweis.

	2.1. Ausgaben	Lt. Zuwendungsbescheid		Lt. Abrechnung	
		insgesamt	davon zuwendungsfähig	insgesamt	davon zuwendungsfähig
		EUR	EUR	EUR	EUR
813	Material	69.140,00 €	69.140,00 €	3.580,11 €	3.580,11 €
823	FE-Fremdleistungen	- €	- €		
837	Personalkosten	544.634,00 €	544.634,00 €	125.516,71 €	125.516,71 €
838	Reisekosten	5.250,00 €	5.250,00 €	313,33 €	313,33 €
847	vorhabensp.Abschreibung	108.769,00 €	108.769,00 €	104.845,36 €	104.845,36 €
848	AfA sonstige	- €	- €	- €	- €
850	sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	2.000,00 €	2.000,00 €	- €	- €
856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	- €	- €	- €	- €
860	Verwaltungskosten	- €	- €	- €	- €
881	Selbstkosten des Vorhabens	729.793,00 €	729.793,00 €	234.255,51 €	234.255,51 €
882	Eigenmittel Antragstellers	364.896,50 €	364.896,50 €	117.127,76 €	117.127,76 €
883	Mittel Dritter/Einnahmen			- €	
884	Zuwendungen	364.896,50 €	364.896,50 €	117.127,76 €	117.127,76 €
	<b>Summe</b>			<b>702.766,53 €</b>	<b>702.766,53 €</b>

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Sämtliche durchgeführten Arbeiten wurden mit den Projektpartnern abgesprochen, damit die Zweckdienlichkeit der Arbeiten sichergestellt werden konnte. Ferner wurden die Ergebnisse unserer Arbeit mit den Projektpartnern geteilt. Die Bearbeitung der Themen wurde stets zielorientiert angegangen.

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit**

Durch das Projekt konnte das Wissen bei BatterieIngenieure GmbH im Bereich BMS-Entwicklung mit Techniken, die über den aktuellen Stand hinausgehen, gestärkt werden. Dies kann in zukünftigen Beratungsprojekten eingesetzt werden, um Kunden bei der Entwicklung von Li-Ionen Batterien mit erhöhter Sicherheit zu unterstützen.

## **2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens**

Es ist gelungen, mehrere Module und Zellen mit der Glasfaseroptik erfolgreich zu vermessen. Somit konnten nicht nur Alterungsdaten der Prüflinge gesammelt werden, sondern zeitgleich und über den Stand der Technik hinaus, auch detaillierte Messwerte der Glasfaseroptiken aufzuzeichnen und den Projektpartnern für weitere Analysen zur Verfügung zu stellen.

## **2.6 Veröffentlichungen**

Seitens BatterieIngenieure GmbH gab es hierzu keine Veröffentlichungen.

### 3 Literaturverzeichnis

- [1] R. Odenbach; T. Stefaniak; Dr.-Ing. K. Kuhlmann; Prof. Dr.-Ing. K-H. Grote; *Konstruktion eines Batteriemoduls für Taschenzellen, welches einen individuellen Aufbau, eine Austauschbarkeit der Zellen und eine thermische Konditionierung ermöglicht*; 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage; [https://www.researchgate.net/publication/283500749\\_Konstruktion\\_eines\\_Batterie\\_moduls\\_fur\\_Taschenzellen\\_welches\\_einen\\_individuellen\\_Aufbau\\_eine\\_Austauschbarkeit\\_der\\_Zellen\\_und\\_eine\\_thermische\\_Konditionierung\\_ermoglicht](https://www.researchgate.net/publication/283500749_Konstruktion_eines_Batterie_moduls_fur_Taschenzellen_welches_einen_individuellen_Aufbau_eine_Austauschbarkeit_der_Zellen_und_eine_thermische_Konditionierung_ermoglicht) (September 2015)

## Kontakt

Firma	BatterieIngenieure GmbH
Geschäftsbereich	Testing, Entwicklung und Beratung
Firmenadresse	Hüttenstraße 5 52068 Aachen Germany
Handelsregister	Aachen HRB 19597
Steuernummer	201/5946/4257
Testlabor	Hüttenstraße 1-9 52068 Aachen Germany
Kontakt	Dr. Dominik Schulte <a href="mailto:Dominik.Schulte@batt-ing.de">Dominik.Schulte@batt-ing.de</a> Tel: +49(0)241-91282017 Mobile: +49 (0)171 99 51 353 Fax: +49 (0)241 9903 2765  <a href="http://www.batterieingenieure.de">www.batterieingenieure.de</a>
Qualitätsmanagementsystem gemäß ISO 9001, ISO 14001 and ISO 27001	zertifiziert

