

# Abschlussbericht für das Verbundprojekt

## Modulare Hochleistungsbatterien in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)



<b>Zuwendungsempfänger:</b> Stöbich technology GmbH Pracherstieg 5, 38644 Goslar	<b>Förderkennzeichen:</b> 03ET6107D
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)	
<b>Teilvorhabenbezeichnung:</b> Passive Sicherheitssysteme für wassergekühlte, modulare Lithium-Batteriemodule in mobilen Anwendungen	
<b>Ansprechpartner:</b> Marc Dinse Mail: <a href="mailto:m.dinse@stoebich-technology.de">m.dinse@stoebich-technology.de</a> Tel.: +49 (0) 5321 5708 - 1807	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 11/2016 bis 07/2020	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.11.2016 bis 31.07.2020	

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhalt

1	Eingehende Darstellung der Ergebnisse.....	4
1.1	TP 1.5 – Brandschutzkonzept .....	4
1.2	TP 3.5 – Überprüfung der Modulsicherheit im Fehlerfall (bis zum Abuse) .....	9
1.2.1	Schadgasfilter .....	9
1.2.2	Modulebene .....	17
1.2.3	Gesamtsystem .....	26
1.3	TP 3.6 – Bewertung und Optimierung des Sicherheitsverhalten .....	27
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	28
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten .....	29
4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	30
5	Relevante Ergebnisse Dritter .....	31
6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	32
6.1	Erfolgte Veröffentlichungen: .....	32
6.2	Geplante Veröffentlichungen: .....	32

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Enex-C-Zwischenlage in projektspezifischer Sonderkonfektion .....	4
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Moduls mit Brandschutzlagen .....	5
Abbildung 3: EneX-C in der Gesamtbatterie .....	7
Abbildung 4: Aufbau Strömungswiderstandsmessung .....	10
Abbildung 5: Havariebehälter zur Gasentnahme im Brandofen des BSTZ.....	11
Abbildung 6: Gasentnahme aus dem Versuchsbehälter .....	11
Abbildung 7: Messung von Kohlenmonoxid vor und nach dem Filter .....	12
Abbildung 8: Versuchsaufbau mit Positionierung der Thermosensoren und Legende .....	13
Abbildung 9: Behälter von Innen kurz vor Versuchsstart.....	14
Abbildung 10: Ausgasende Zellen im Versuchsbehälter .....	15
Abbildung 11: Temperaturverlauf 17 - 60 Minuten .....	16
Abbildung 12: Ausgebrannte Batteriemodule nach Versuch .....	17
Abbildung 13: Anordnung Thermosensoren und Kontaktierung Zelle .....	19
Abbildung 14: Temperaturverlauf während des Ladevorgangs ohne Brandschutz.....	21
Abbildung 15: Modul ohne Brandschutzlagen nach dem Versuch im Brandofen .....	21
Abbildung 16: Temperaturverlauf gesamter Versuch ohne Brandschutz .....	22
Abbildung 17: Temperaturverlauf während der Havarie ohne Brandschutz .....	22
Abbildung 18: Modul mit Brandschutzlagen nach dem Versuch .....	24
Abbildung 19: Temperaturverlauf während der Havarie mit Brandschutz.....	25
Abbildung 20: Direkter Vergleich der Module mit und ohne Brandschutz.....	25

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gemessene Gase .....	16
Tabelle 2: Messergebnisse der Gasmessung .....	17
Tabelle 3: Übersicht Thermosensoren Modulversuch .....	19
Tabelle 4: Zyklisierung der Zelle ohne Zwischenlagen .....	20
Tabelle 5: Zyklisierung der Zelle mit Zwischenlagen.....	23
Tabelle 6: Projektkosten .....	28

## 1 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

### 1.1 TP 1.5 – Brandschutzkonzept

Die Erstellung des Brandschutzkonzeptes erfolgte in Abhängigkeit des für den Modulaufbau verwendeten Zelltyps in Zusammenarbeit mit der AKASOL AG. Es wurde eine Entscheidung getroffen, die zu einer parallelen Entwicklung eines modulinternen und -externen Konzeptes führen sollte. Im Rahmen verschiedener Projekttreffen wurden die Abmessungen und Gewichte der Einzelzellen diskutiert und definiert, um den verfügbaren Platz für Brandschutzmaßnahmen zu erkennen. Der Energieinhalt je Einzelzelle (SoC=100 %), als Grundlage für die Berechnung der notwendigen thermischen Absorption im Falle des Zellkurzschlusses, wurde benannt. Vermutete Gasmengen im Falle der Havarie wurden abgeschätzt. Unter Berücksichtigung aller Details wurde im Rahmen verschiedener Arbeitstreffen mit der Firma K.TeX GmbH die geeignete ENEX-C-Zwischenlage ausgewählt. Der Kühltemperaturbereich von 95 °C – 150 °C, die Materialstärke von 3 mm und Positionen zur Wärmeeindämmung zwischen den Zellen sind definiert. Das modulinterne Brandschutzkonzept steht damit zu Beginn des 2. Quartals 2017 zur Umsetzung bereit. Das modulexterne Brandschutzkonzept befindet sich zu diesem Zeitpunkt in der Entwicklung und Abstimmung.

#### Modulinternes Brandschutzkonzept

Nach interner Prüfung verschiedener Brandeindämmungs- und Kühlmöglichkeiten wird seitens der Stöbich technology GmbH der Beschluss gefasst, die Zwischenlage ENEX-C einzusetzen. Diese wird als passiver Abstandshalter je zwischen zwei Zellen und den Modulkasten gelegt. Jede Einzelzelle grenzt demnach an der rechten und linken Längsflanke jeweils an eine ENEX-C-Zwischenlage, dargestellt in Abbildung 1. Für das verwendete Material gibt der Hersteller einen Kühltemperaturbereich von 95 – 150 °C und eine Energieaufnahme von 1600 kJ/kg an.



Abbildung 1: Enex-C-Zwischenlage in projektspezifischer Sonderkonfektion

Im fehlerfreien Betrieb der Batterie dient die Zwischenlage der Vibrationsdämpfung und der festen Platzierung der Einzelzellen im Modulkasten. Für den Zellkurzschlussfall wird ENEX-C auf den Kühltemperaturbereich von 95 °C – 150 °C abgestimmt und beginnt bei Übertemperaturen mit der Freisetzung des kristallin gebundenen Wassers. Dieser Verdunstungs- und Verdampfungsprozess absorbiert die infolge des Zellkurzschlusses freigesetzte Wärmeenergie innerhalb der spezifischen Verdampfungsenthalpie des Wassers. Es entsteht Wasserdampf, welcher unter Druck in den Modulkasten entweicht. Dieser durchmischt sich mit den entstehenden toxischen, hoch brennbaren Gasen der dissoziierenden Einzelzelle, welche sich im Inneren auf bis zu 700 °C aufheizt. Die ENEX-C-Zwischenlage dämmt diese hohe Temperatur ein und verhindert ein Überhitzen der Nachbarzellen. Somit wird ein „Thermal Runaway“ des gesamten Moduls vermieden. Zudem werden die hoch brennbaren Gase vorgekühlt, um die Gefahr des Entzündens zu reduzieren. Ohne Volumenstromaustritt würde sich ein zerstörerischer Druck im Inneren des Modulkastens aufbauen. Das entstehende Schadgas, ein Gemisch aus Gasen und Wasserdampf, angereichert mit Ruß, Funken und Aerosolen muss also austreten können.

Im Laufe des Projektes wurden zwei Arten von Modulen aufgebaut. Es gibt Module mit 46 Ah-Zellen und mit 53 Ah-Zellen. Beide Module haben die gleichen Außenmaße, aufgrund eines Keramik-Separators in einer der Zelle ergibt sich die unterschiedliche elektrische Ladung. Im mobilen Bereich steht die Reichweite und somit die Energiedichte im Zentrum der Überlegungen, weswegen die 53 Ah-Zellen bei gleichem Bauraum eigentlich bevorzugt werden. Der Separator aus Keramik macht die 46 Ah-Zelle jedoch aus sicherheitstechnischer Sicht stabiler, denn diese ist durch den verwendeten Separator resistenter gegen ein Durchgehen der einzelnen Zellen.

Die Herausforderung bestand nun darin, dass das 53 Ah Modul trotz der größeren Energiemenge genauso sein soll, wie das Modul mit 46 Ah Zellen. Wie bereits beschrieben, soll das durch den modulinternen Brandschutz realisiert werden. Dafür werden Zwischenlagen aus EneX verwendet, durch die die Propagation von Zelle zu Zelle vermieden werden sollen. Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines Moduls mit Pouchzellen und Zwischenlagen. Dieser Aufbau beschreibt auch den Endzustand des modulinternen Brandschutzes der Module mit 53 Ah. Zellen und Zwischenlagen wurden in 2018 aufgebaut und sollen im Teilprojekt 3.5 verifiziert werden.



Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Moduls mit Brandschutzlagen

## **Modulexternes Brandschutzkonzept**

Im Falle der Einzelzellen-Havarie entsteht also eine definierte Menge aus Schadgas im Inneren des Moduls. Dieser Volumenstrom könnte nun ohne weitere Maßnahmen aus dem Modulkasten durch einen Austritt ungefiltert in den Batteriekasten geleitet werden. Dies hätte eine Kontamination aller noch funktionierenden Module innerhalb der Batterie zur Folge. Durch das Druckausgleichselement des Batteriekastens könnte sich der Druck dann abbauen und das Schadgas würde ungefiltert in die Umwelt entweichen. Dieses Vorgehen ist nicht empfehlenswert, da toxische, korrosive und leicht entzündliche Gase den Batteriekasten durchströmen und sich hier mit Sauerstoff vermischen, was eine Explosion mit anschließendem Brand zur Folge hätte. Als Brandschutzmaßnahme kam also nur die kontrollierte Führung zur Filterung und Abkühlung des Schadgases in Frage, bevor es in die Umwelt austreten darf. Dafür wurden zwei verschiedene Konzepte evaluiert.

1) Die Montage eines Druckausgleichskanals zum Abführen des Schadgases über ein geeignetes Brandschutztextil (Funken- und Brandhemmung) an jedes Modul. Dieser Kanal leitet das Schadgas durch den Batteriekasten zum Filter. Während des Filterns wird das Schadgas weitestgehend neutralisiert und auf  $\sim 30^{\circ}\text{C}$  abgekühlt bevor es an die Umwelt abgegeben wird.

2) Der Verschluss jedes Moduls mit einem speziellen, durchströmungsfähigen Brandschutztextil zur Filterung und Abkühlung des entstehenden Schadgases. Aus dem Modulkasten entweicht das Schadgas also bereits in teilneutralisierter Form in den Batteriekasten. Von dort aus gelangt es über das Druckausgleichselement in die Umwelt. Eine geringe Kontamination im Batterieinneren wird zwar stattfinden, diese kann jedoch durch Reinigung bei Batteriereparatur entfernt werden.

Aufgrund dieser Vorüberlegungen wurden, in Zusammenarbeit mit der AKASOL AG, Anforderungen an das modulexterne Brandkonzept definiert. Die weitere Auslegung des modulexternen Brandschutzkonzepts orientierte sich die Stöbich technology an den Gefahrenstufen bei Batteriefehlern nach EUCAR. Hier erfolgt eine Einteilung in sieben verschiedene Gefahrenstufen, wobei das entwickelte Schutzsystem mindestens die Anforderungen an das „Hazard Level 4“ erfüllen soll. Das bedeutet, dass keine Flammen und kein Feuer aus dem Gesamtsystem austreten dürfen und dass es nicht zu einer Explosion und einem unkontrollierten Bruch der Außenhülle kommen darf. Diese Anforderung war eine zentrale Forderung vom Projektpartner AKASOL AG. Unabhängig von diesem Projekt wird diese Anforderung jedoch auch immer öfter an Batteriesysteme gestellt, die im öffentlichen Verkehr, insbesondere bei der Beförderung von Personen im ÖPNV zum Einsatz kommen.

Der Austritt von Funken und Flammen soll bereits auf Modulebene unterbunden werden. Dafür werden die Module an einer definierten Öffnung mit einem Funken- und Flammenfilter ausgerüstet. Dieser Filter sorgt dafür, dass die Gase kontrolliert entweichen können, was einem Überdruck im Modulgehäuse entgegenwirkt, die Funken und Flammen jedoch im Modulgehäuse zurückgehalten werden. Darüber hinaus sorgt der Filter auch dafür, dass der flüssige Elektrolyt und feste Stoffe zurückgehalten werden.

Aufgrund der kompakten Bauweise des Gesamtsystems ist eine umfangreiche Ausstattung mit Brandschutzmaterialien nicht wirklich möglich. Einzig die Toträume des Batterietrags, die montage- oder konstruktionsbedingt entstehen, können genutzt werden. Diese Toträume sind

möglichst klein zu halten, damit sich im Batterietrog keine entzündliche Atmosphäre bilden kann. Die Idee ist, sie mit einem nicht brennbaren Material zu füllen, das im besten Fall Teile der von den in der Havarie befindlichen Zellen aufnimmt. Für die Verfüllung eignet sich ebenfalls EneX, jedoch nicht nur in eingeschweißter Plattenform, sondern auch als eine Art Granulat. Neben der positive Eigenschaften in Bezug auf den Brandschutz, die durch den Einsatz von EneX als Granulat einhergehen, sind Vibrationsdämpfung und die Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit weitere gewünschte Nebeneffekte. EneX kann als eine Art Kondensatpuffer dienen. Kondenswasser, das durch Temperaturschwankungen entsteht, kann so aufgenommen und bei höheren Temperaturen wieder abgegeben werden.

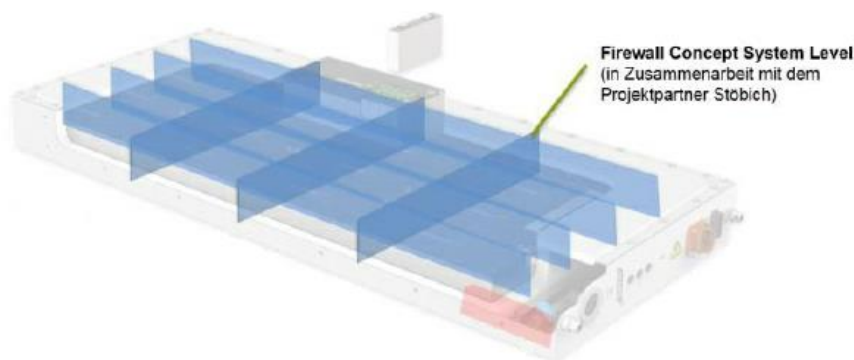


Abbildung 3: EneX-C in der Gesamtbatterie

### **Brandschutzkonzept zu Umgebungsbränden**

Der Umgang mit Umgebungsbränden außerhalb der Batterie kann nur durch eine thermisch Isolierende Kapselung abgesichert werden. Diese muss leicht und kostengünstig bei geringem Volumenbedarf sein. Sie sollte die bestehende Batteriewanne von innen als Beschichtung ergänzen. Die Tätigkeiten in diesem Umfeld während der Projektanlauf-phase bezogen sich auf Vorüberlegungen und die Recherche von Schäumen, Isolations-lagen und ENEX-Konzepten.

Durch den zusätzlichen Eintrag von EneX, zur Verringerung der Toträume wird auch der Widerstand gegen Umgebungsbrände erhöht (vgl. modulexternes Brandschutzkonzept). Kommt es zu einer Erhitzung des Batterietrogs durch einen Umgebungsbrand, so wird das EneX auch ohne eine direkte Beklemmung ab der Grenztemperatur von etwa 95°C aktiviert. Kommt es zu einer längeren Wärmeeinwirkung von außen, so wird auch das EneX, welches in den Modulen verbaut ist zu einer Kühlung der Zellen beitragen, sodass eine Selbstentzündung durch die thermische Einwirkung herausgezögert wird. Zuletzt wird auch die aktive Kühlung der Zellen, solange sie denn funktionsfähig ist, einer Selbst-entzündung entgegenwirken.

## **Schadgasfilter**

Im Laufe des zweiten Projekthalbjahres wurde die Neuauslegung des Schadgasfilter und die Integration in das Batteriesystem bearbeitet. Das Hauptaugenmerk lag dabei in der chemischen Weiterentwicklung, aber auch in der konstruktiven Auslegung des Filters. Ziel war es, die Kosten der Filtermaterialien gering zu halten, die Wirkung des Filters dabei mindestens auf gleichem Niveau zu halten sowie den benötigten Bauraum und das damit zusammenhängende Gewicht zu verringern.

Durch eine erneute Untersuchung der Schadgase, die während einer Havarie auftreten, wurden die bisher verwendeten Filtermaterialien teilweise in Frage gestellt. Insbesondere die beiden sehr kostenintensiven Filterstoffe Kaliumpermanganat und aktiviertes Aluminium sollten im Zuge der Neuauslegung ersetzt werden.

Das Kaliumpermanganat sollte bei der bisherigen Filterauslegung den CO Gehalt des Abgases reduzieren sowie andere Bestandteile durch Oxidation entschädigen. Aktiviertes Aluminium wurde in erster Linie zur Reduktion von Fluorwasserstoff verwendet. Die Funktion des Aluminiums basierte hauptsächlich auf basischen Inhaltsstoffen, die säureneutralisierend (z. Bsp. Fluorwasserstoffsäure) wirken sollten. Diese Funktionen sollen im neuen Filterkonzept Hydroxide von Alkalimetallen übernehmen. Die absorbierende Wirkung der Aktivkohle soll beibehalten werden, die Funktion muss jedoch optimiert werden. Dazu ist es erforderlich, die Schadgastemperatur zu reduzieren, was durch eine Neuordnung der Filtermaterialien erreicht wird. Wichtig ist, dass der neu ausgelegte Schadgasfilter mindestens die Anforderungen erfüllen soll, die auch schon an das alte Konzept gestellt wurden. Dabei orientiert sich die Stöbich technology GmbH an den „Immediately Dangerous To Life or Health“ Referenzwerten. Die Konzentration der schädlichen Stoffe in betroffenen Bereichen sollte also so gering sein, dass eine Flucht aus betroffenen Bereichen innerhalb von 30 Minuten möglich ist, ohne schwere oder bleibende Schäden davonzutragen.

Als zusätzliche Anforderung soll der Schadgasfilter auch die Konzentration von Kohlenmonoxid reduzieren. Das Kohlenmonoxid, als eine Komponente des Schadgases ist deshalb so gefährlich, weil es ein geruchloses und nicht sichtbares Gas ist, das von den roten Blutkörperchen bis zu 200-mal stärker gebunden wird als Sauerstoff. Dadurch wird der Sauerstofftransport im Blut verhindert, was wiederum zum Tod durch Erstickung führt. Bereits geringe Konzentrationen führen zu Kopfschmerzen und Schwindelanfällen. Höhere Konzentrationen von über 3.000 ppm führen zu Übelkeit, Bewusstlosigkeit und schließlich zum Tod innerhalb von 30 Minuten.

Für den zu entwickelnden Filter sollen Chemikalien eingesetzt werden, die die Konzentration des Kohlenmonoxids, durch eine katalytische Reaktion stark reduzieren. Zu erwähnen ist noch, dass der Filter entsprechend der entstehenden Gase ausgelegt werden muss. Um den Filter möglichst klein und damit auch leicht zu gestalten, dürfen bei einer Havarie nur wenig Schadgase entstehen. Es ist also sehr wichtig, den internen Brandschutz so auszulegen, dass möglichst wenig Zellen in den thermal runaway gehen.

## **Geplanter Ablauf der Havarie mit Brandschutzkonzept**

Es kommt durch einen Fehler zum Durchgehen einer Zelle in einem Modul. Die Temperaturen, die während der Havarie entstehen, werden durch die EneX-Lagen zwischen den Zellen soweit unter Kontrolle gebracht, dass die anderen Zellen im Modul nicht in einen thermisch



kritischen Bereich kommen. Die Schadgase, die aus der havarierten Zelle austreten werden durch eine definierte Öffnung geleitet, sodass sich kein kritischer Druck im Modulgehäuse aufbaut. Funken und Flammen, sowie feste und flüssige Stoffe, die aus der havarierten Zelle austreten, werden durch die Funken- und Flammensperre im Modul gehalten. Die schädlichen Gase treten jedoch in den Batterietrog ein und werden durch das EneX Granulat weiter gekühlt. Durch den steigenden Druck im Batterietrog öffnet sich eine Überdruckklappe und die Gase werden durch den Filter geleitet, der sich entweder direkt am Batterietrog befindet oder mit einem Schlauch mit diesem verbunden ist. Der Filter reinigt die Gase und hält Stäube sowie Schwermetalle zurück und die gefilterten Gase werden gezielt abgeleitet. Dieser theoretische Ablauf einer Havarie soll im Arbeitspaket 3.5 überprüft werden.

## **1.2 TP 3.5 – Überprüfung der Modulsicherheit im Fehlerfall (bis zum Abuse)**

### **1.2.1 Schadgasfilter**

Die Weiterentwicklung des Schadgasfilters erfolgt durch die Ergebnisse der verschiedenen Versuche. Es werden Schadgasmessungen durchgeführt, um die ursprünglichen, teilweise sehr teuren Filtermaterialien durch günstigere Materialien zu ersetzen.

Um die Filterwirkung genau zu beurteilen, mussten geeignete und genauere Messmethoden für die Schadgase gefunden werden. Bisher wurden die Gase bei den Brandversuchen durch Aktivkohleröhrchen geleitet. Später wurde dann im Labor untersucht, welche Stoffe in der Aktivkohle hängen geblieben sind. Diese Art der Messung zeigt jedoch keine zeitliche Konstante. Es ist nicht nachvollziehbar, zu welchem Zeitpunkt welche Gase auftreten und ob die eingefangenen Gase tatsächlich die maximale Konzentration darstellen oder ob es durch Durchmischung mit der Umgebungsluft zu einer Verdünnung kommt. Deshalb wurde nach einer geeigneten Methode zur kontinuierlichen Messung von Schadgasen gesucht. Ein erfolgversprechendes Messverfahren wurde an der TU Braunschweig gefunden.

Nachdem die Anordnung der Filtermaterialien noch einmal überarbeitet wurde, wurde ein intensiverer Blick auf das entstehende Kohlenmonoxid gelegt. Bisher wurde das CO zwar mit betrachtet, jedoch wurde die der sehr toxischen Wirkung der Schadgasgemische seitens der Stöbich technology GmbH unterschätzt. Nach einer erneuten und weitergehenden Analyse mit diesen Gasgemischen zeigte sich, dass eine Behandlung des Schadgases in jedem Fall unerlässlich ist. Deshalb wurde dieser Bereich noch stärker vorangetrieben.

### **Strömungsmessungen**

Bevor die neuen Filtermaterialien durch aufwendige Gasmessungen verifiziert wurden, wurden verschiedene Vorversuche bezüglich der Durchströmbarkeit der Materialien durchgeführt. Die Sorge bestand darin, dass die neuen Materialien stärker verdichtet werden, wodurch sich der Strömungswiderstand im Filter erhöhen könnte. Das wiederum hätte zur Folge, dass der Druck in den Modulen durch das Ausgasen der Zellen steigt und es zum unerwünschten Bersten des Modulgehäuses kommt.

Die Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau zur Überprüfung des Strömungswiderstands der Filtermaterialien. Dazu werden die verschiedenen Filtermaterialien in ein Kunststoffrohr gefüllt und anschließend verdichtet. Mit Hilfe eines Kompressors werden die verschiedenen

Kammern des Versuchsaufbaus mit Luft durchströmt. Durch eine kleine Austrittsöffnung am Ende der Messstrecke wird gleichzeitig ein definierter Druck im Rohr aufgebaut.



Abbildung 4: Aufbau Strömungswiderstandsmessung

In den verschiedenen Kammern wurde dann der Druck gemessen und miteinander verglichen, um eine Aussage über den Druckabfall im Filter und somit auch über den Strömungswiderstand treffen zu können. Es zeigt sich, dass auch mit den neuen Filtermaterialien kein erwähnenswerter Strömungswiderstand auftritt, der zu einem erhöhten Druck im Modulgehäuse oder im Batterietrog führen könnte.

Nach einigen Versuchen zeigte sich, dass der geringe Strömungswiderstand nicht für größere Filtersysteme übernommen werden kann. Je größer das Filtersystem wird, desto schlechter kann das Schadgas den Filter durchströmen.

Um das zu verbessern, werden die Filtermaterialien jetzt in Textiltaschen untergebracht, die versetzt zueinander im Filtergehäuse angeordnet werden. Die dadurch entstehenden Zwischenräume sorgen dafür, dass sich das Schadgas in diesem Bereich ausbreiten kann, wodurch nachströmendes Gas leichter durch die Filtertaschen gelangen kann.

### **Validierung der Filterwirkung**

Die Versuche zur Validierung der Filterwirkung wurden in für den Einsatzzweck angefertigten Havariebehältern durchgeführt, in denen eine zuverlässige Gasentnahme vor und nach dem Filter sichergestellt werden kann. Bei den Behältern handelt es sich um ASP-Behälter, die zugekauft und dann für den Einsatzzweck um- und ausgebaut. Die Behälter wurde so erweitert, dass das Filtermaterial einfach eingefüllt und entnommen werden kann und sich leicht reinigen lassen. Damit ist eine mehrfache Verwendung möglich.

Der Behälter ist so konstruiert, dass entstehende Schadgase nur über einen definierten Gasweg entweichen können. In diesem Gasweg wird der neu ausgelegte Filter installiert. So ist sichergestellt, dass die Gase den Filter passieren und an definierten Stellen Gase für die Messung abgesaugt werden können. Wichtig ist eine Abdichtung des Versuchsbehälters, damit die entstehenden Gase durch die Bohrungen entweichen, an denen die Schadgase für die Messung abgesaugt werden.



Abbildung 5: Havariebehälter zur Gasentnahme im Brandofen des BSTZ

Die Schadgase treten durch einen Spalt im oberen Bereich des Behälters ein, durchlaufen den mit Filtergranulat gefüllten Zwischenraum und treten im unteren Bereich wieder aus. Damit soll eine gleichmäßige und großflächige Durchströmung des Filters sichergestellt werden, auch wenn Stäube und andere Ablagerungen im Laufe der Havarie Teile des Filters zusetzen.



Abbildung 6: Gasentnahme aus dem Versuchsbehälter

## CO-Messungen

Neben den Messungen der Kohlenwasserstoffe und Halogenverbindungen wurde auch ein Vorversuch zur CO-Messung durchgeführt. Für den Kleinversuch wurden Pouchzellen mit einer Kapazität von ca. 40 Ah verwendet. Die Zellen wurden überladen, um sie gezielt in die Havarie zu treiben. Als Versuchsumgebung diente ein kleinerer Behälter, aus dem jedoch auch gezielt Schadgase entnommen werden konnten. Als Messinstrument diente ein preisgünstiges CO-Messgerät mit einem Messbereich von 0 ppm bis 1.000 ppm und einer Genauigkeit von  $\pm 10$  ppm.



Abbildung 7: Messung von Kohlenmonoxid vor und nach dem Filter

Bei der Messung vor dem Filter zeigt das Messgerät, wie im linken Bild der Abbildung 7 zu sehen, den Fehler „LO“ an. Das zeigt, dass der Maximalwert von 1.000 ppm überschritten ist. Die zweite Messung nach dem Filtermaterial zeigt eine Konzentration von 370 ppm. Mit diesem Vorversuch wurde gezeigt, dass die erstmals eingesetzten Chemikalien eine Wirkung in Bezug auf die CO-Konzentration haben. In einem weiteren, genaueren Versuch soll gemessen werden, wie hoch die CO-Konzentration vor und nach dem Filter ist, um damit eine stichhaltige Aussage über die Wirkung der Filtermaterialien bezogen auf das Kohlenmonoxid treffen zu können.

Nach der Durchführung verschiedener Vorversuche mit anschließender Bewertung und Überarbeitung des Filteraufbaus und der Zusammensetzung, wird in einem umfangreichen Versuch die Wirkung des neu ausgelegten Filters getestet. Die Vorversuche zeigten bereits,

dass die Filterwirkung erfolversprechend ist. Dies musste jedoch noch durch genauere und professionellere Messmethoden belegt werden.

Insgesamt werden Batterien mit einem Energieinhalt von etwa 10,5 kWh im Versuchsbehälter platziert. Die daraus resultierende Gasmenge entspricht etwa 14.280 – 28.560 Litern. Entsprechend der Gasmenge wird die Größe des Filters ausgelegt. Für einen Versuch werden etwa 150 kg Filtermaterial verwendet. Es soll untersucht werden, ob die neue Filterzusammensetzung die Konzentration der schädlichen Gase reduziert werden und wann eine Sättigung des Filters einsetzt, sodass absehbar ist, wann die Wirkung nachlässt.

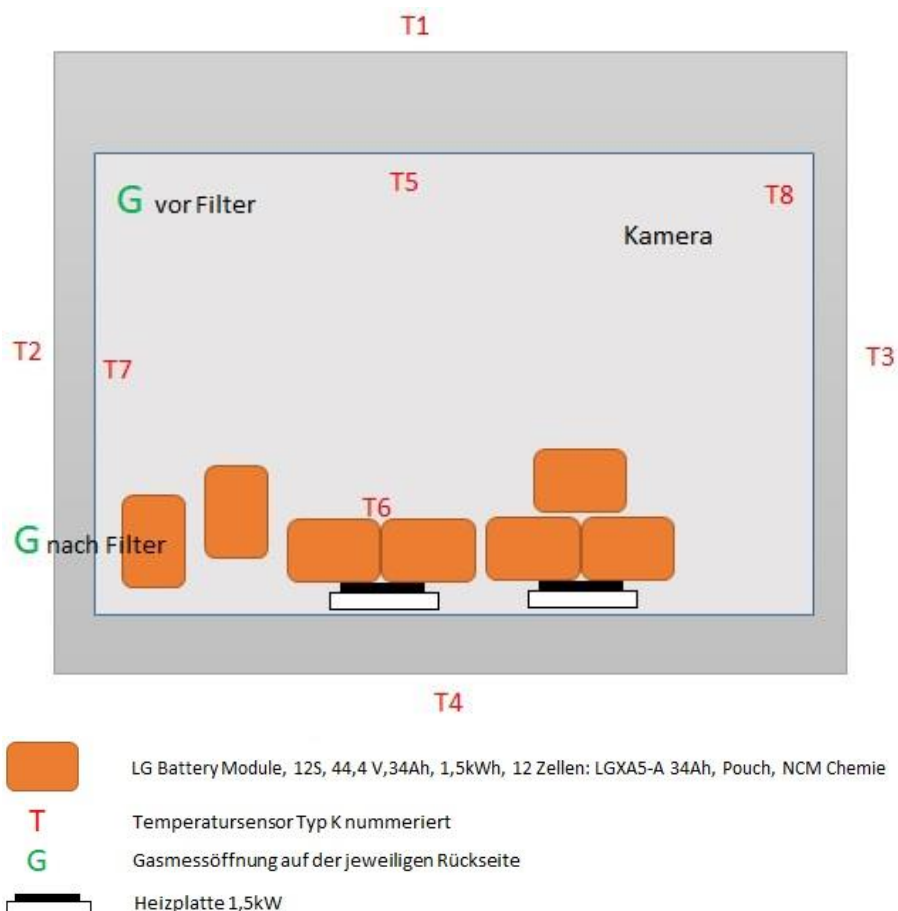


Abbildung 8: Versuchsaufbau mit Positionierung der Thermosensoren und Legende

Um die Havarie der Batterie optisch sowie akustisch nachvollziehen zu können, ist eine Kamera und Beleuchtung im Versuchsbehälter platziert. Zum einen ist eine Kamera im Inneren des Versuchsbehälters angebracht. Diese soll Informationen über die ersten Minuten der Havarie sammeln. Weitere Kameras dokumentieren das Verhalten des Behälters von außen.



Abbildung 9: Behälter von Innen kurz vor Versuchsstart

Der Brandversuch wurde im Mai 2019 am Batterie- und Sensoriktestzentrum, das von der TU Clausthal betrieben wird, durchgeführt. Die Messung der Schadgase wurde durch Mitarbeiter der TU Braunschweig begleitet. Abbildung 10 zeigt das Ausgasen der ersten Zellen etwa 15 Minuten nach dem Einschalten der Heizplatten, die als thermischer Trigger dienen. Dies sind auch die letzten Aufnahmen der Kamera, da die Temperaturen durch die Entzündung der Schadgase kurz nach dem Ausgasen so stark ansteigen, dass die Funktion der Kamera nicht mehr gegeben ist.



Abbildung 10: Ausgasende Zellen im Versuchsbehälter

Zur Messung der entstehenden Schadgase sind zwei Probeentnahmeöffnungen, eine vor dem Schadgasfilter und eine nach dem Schadgasfilter, vorgesehen und mit Schläuchen an einer schaltbaren Ventileinheit angeschlossen. Die Ventileinheit hat die Funktion, den jeweils zu messenden Gasstrom zum Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) zu leiten. Am Versuchstag stand nur ein FTIR zur Verfügung, trotzdem sollten die Schadgase vor und nach dem Filter gemessen werden. Durch das Umschalten der Ventile können die gefilterten und ungefilterten Schadgase zwar nicht parallel gemessen werden, es war jedoch möglich, an beiden Messstellen am gleichen Versuchstag zu messen und die Wirksamkeit des Filters damit zu überprüfen.

Es wurde während der Messung durch das FTIR Gas angesaugt, dass nach Vorgabe des Messplans bzw. des zu messenden Events durch die elektromagnetisch betätigte Ventileinheit der FTIR zugeleitet wurde. Die Umschaltzeiten wurden dokumentiert. Primäres Ziel der Messung war es, die Rückhaltung toxischer und korrosiver Bestandteile durch den Filter zu quantifizieren. Die gemessenen Gase können aus der Tabelle 1 entnommen werden. Schwerpunkt der Messung waren verschiedenen Kohlenwasserstoffe, speziell Aromaten, sowie Flusssäure. Desweiteren wurde die Emission von Kohlenstoffmonoxid sowie Kohlenstoffdioxid beobachtet.

Tabelle 1: Gemessene Gase

Name / Bezeichnung	Summenformel	Abkürzung
Kohlenstoffmonoxid	CO	CO
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Flusssäure	HF	HF
Methan	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Kohlensäureethylmethylester, Ethylmethylcarbonat	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	EMC
Ethylencarbonat	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	EC
Kohlensäuredimethylester, Dimethylcarbonat	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	DMC
Kohlensäurediethylester, Diethylcarbonat	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	DEC

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe während des Versuchs. Daraus lässt sich rückschließen, dass der Großteil der Module in thermisch durchgegangen ist.

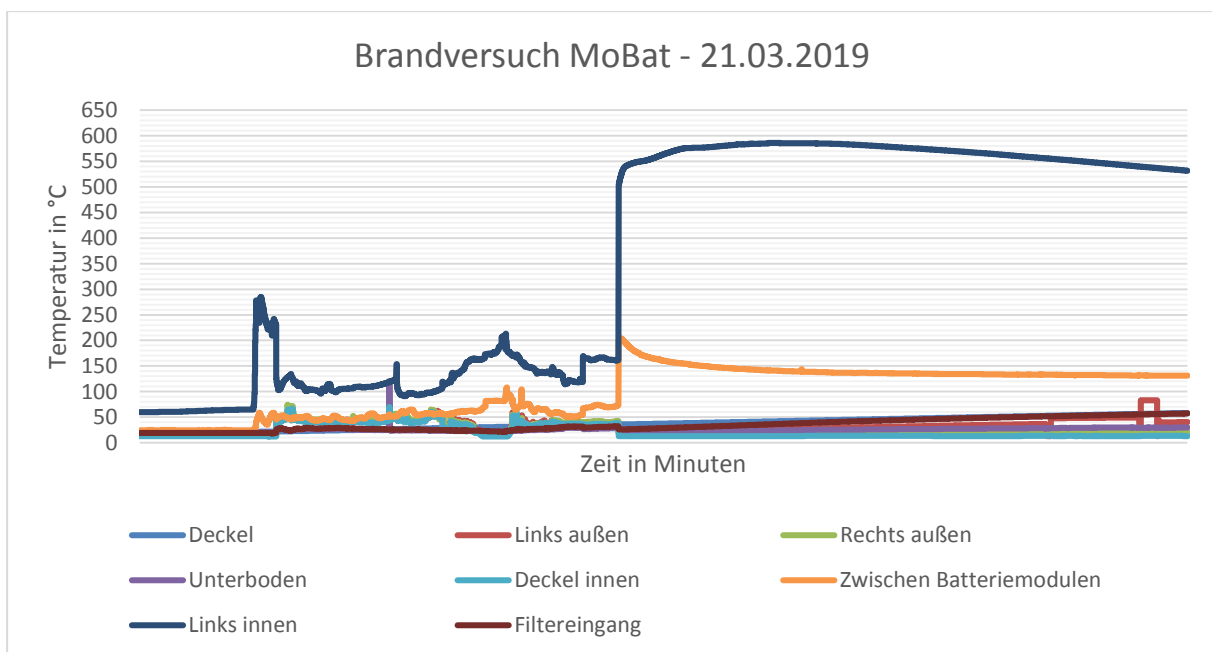


Abbildung 11: Temperaturverlauf 17 - 60 Minuten

Auch die im Anschluss an den Brandversuch durchgeführte Begutachtung der Module zeigt, dass der Großteil der Batteriemodule abgebrannt ist. Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine ausreichend große Menge an Schadgasen freigesetzt wurde und auch genügend Gas für eine aussagekräftige Messung vorhanden war.





Abbildung 12: Ausgebrannte Batteriemodule nach Versuch

Die Schadgasmessung ergibt vor dem Filter einen Anstieg von allen gemessenen Gasen. Im Vergleich dazu sind die Nachfilterwerte wesentlich geringer. Teilweise sind die Messwerte so gering das mit keinem nennenswerten Austritt von schädlichen Gasen zu rechnen ist. Das Ziel, den Filter neu auszulegen und ihn dadurch kostengünstiger und kleiner zu gestalten, ohne die Funktion zu beeinträchtigen ist damit erreicht.

Tabelle 2: Messergebnisse der Gasmessung

Gemessenes Gas	Messwert ohne Filter [mg/m <sup>3</sup> ]	Messwert mit Filter [mg/m <sup>3</sup> ]
CO	60.000	8.000
CO <sub>2</sub>	70.000	11.000
HF	3	0
CH <sub>4</sub>	7.469	263
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	16.047	0
EMC	2.264	22
EC	38	19
DMC	26.005	250
DEC	277	0

### 1.2.2 Modulebene

Es wurden verschiedene Szenarien ausgearbeitet, in denen es zur Entzündung der Batterie kommen könnte. Dieses Vorgehen soll dazu dienen, die richtige Art der Havarieauslösung für die Brandversuche zu finden. Unter folgenden Umständen kann es im Betrieb eines

Linienbusses zur Havarie kommen. Mechanische Einwirkung durch Unfall des Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern, Beschädigung durch Hagelschlag, Sturm-schäden durch Äste oder Bäume, Beschädigung der Batterie durch die Missachtung von Durchfahrthöhen. Thermische Einwirkungen durch Sonneneinstrahlung, Brandstiftung, Funkenflug durch Schleif- oder Schneidarbeiten in der Nähe der Batterie, Brand von in der Nähe befindlichen Fahrzeugen oder Gebäuden, Kabelbrand durch die Leistungselektronik / Elektrik der Batterie. Elektrische Einwirkungen durch fehlerhafte Batterie-Management-Systeme (BMS), Hochspannung bei Blitzschlag oder ein äußerer Kurzschluss durch Metallteile die auf die Batterie gelangen.

Da die Schnellladung von Traktionsbatterien im Vordergrund aller Untersuchungen in diesem Verbundprojekt stehen und um ein möglichst reales Szenario abzubilden wurde die Entscheidung getroffen, ein Fehlverhalten eines BMS während einer Ladung nachzubilden. Somit wurde als Triggermethode für die Abuseversuche bei den Modulen eine Zelle aus dem mittleren Bi-Pack eines aus 53 Ah Zellen bestehenden Moduls gezielt überladen. Im Gegensatz dazu wurde für die Versuche auf Ebene der Batteriesysteme eine Nagelpenetration als Trigger eingesetzt. Damit wird eine mechanische Beschädigung des Gesamtsystems simuliert.

Durch das Überladen wird der größtmögliche Schaden, der von einer Zelle ausgehen kann simuliert. Bei der Zerstörung durch Überladen stellt sich ein höherer Ladezustand ein, als es im praktischen Einsatz der Batterie der Fall ist. Während die Batterie üblicher-weise nicht mehr als 100 % SoC hat, wird der SoC beim Überladen je nach Zelltyp auf 130 – 160 % SoC angehoben, bis es zu einem Brandereignis kommt. Durch die übermäßig hohe Energie, die in der Zelle gespeichert ist, fällt die Reaktion wesentlich stärker aus, als es im alltäglichen Betrieb der Fall wäre. Das Schutzsystem wird also mit einem schlimmeren Szenario getestet, als es im Serieneinsatz der Fall wäre.

Bereits zu Beginn des Projekts wurden die Module mit der Glasfaseroptik des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts versehen, um die Dehnung und die Temperatur der Zellen bei den Versuchen zu überwachen. Zusätzlich sollen Temperatursensoren vom Typ K Referenzwerte zur faseroptischen Messung liefern. Die Messpunkte können der Tabelle 3 und Abbildung 13 entnommen werden. In der Abbildung sind ebenfalls die Anschlüsse für die Überladung in Rot dargestellt. Die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung dieser Versuche erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Energiespeichertechnologien.

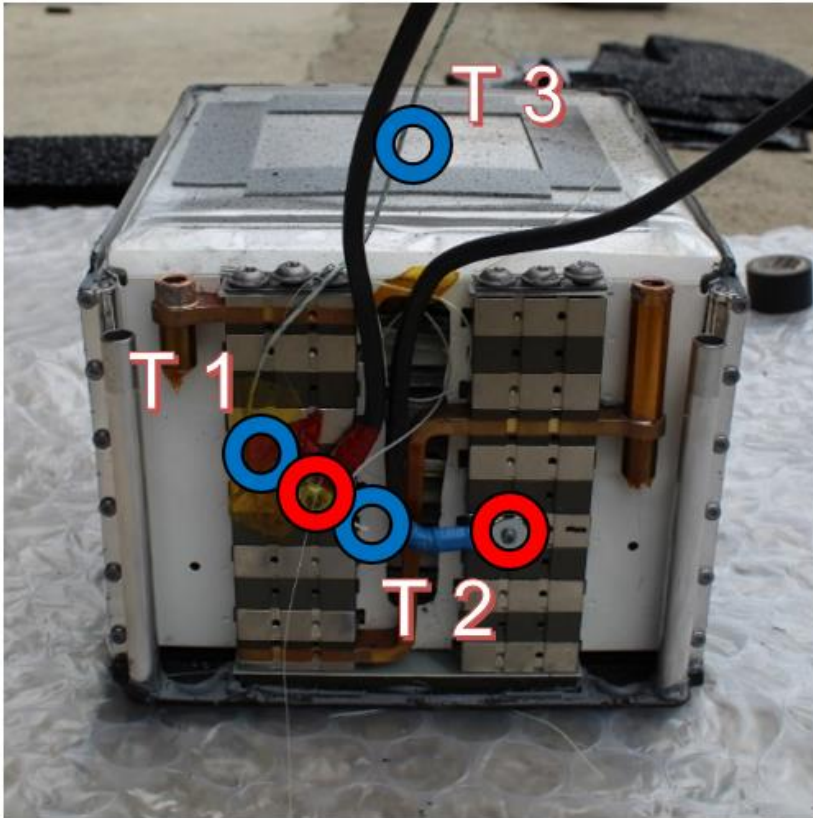


Abbildung 13: Anordnung Thermosensoren und Kontaktierung Zelle

Tabelle 3: Übersicht Thermosensoren Modulversuch

Sensor	Platzierung
T1	+ Pol des „Havarie-Moduls“
T2	Freier Raum im Modul, Mittig zwischen Anode und Kathode
T3	Deckel, Mittig

Für die Versuche wurden zwei Module vorbereitet. In einem Modul sind Brandschutzwischenschichten und Glasfasersensorik verbaut, im zweiten Modul ist nur die Glasfasersensorik verbaut. Die Zwischenlagen haben Wasser in kristallinen Festkörper gebunden. Das Wasser wird bei einer Aktivierungstemperatur von etwa 95 °C aus der festen Form gelöst und geht bei 100 °C in die Dampfphase über. Dadurch entsteht eine große Menge Wasserdampf und es wird eine sehr gute Kühlwirkung erzielt. Solange Kühlmaterial vorhanden ist, sollte sich im Idealfall eine Temperatur von max. 100 °C einstellen. Diese geringe Temperatur reicht aus, um alle anderen Zellen in einem Zustand zu halten, in dem der Separator im Inneren der Zelle unversehrt bleibt. Dadurch soll ein Brand der umliegenden Zellen im Modul verhindert werden. Die Havarie begrenzt sich dann nur auf die Zelle, die durch einen Fehlzustand in der praktischen Anwendung in Brand gerät.

Die verwendeten Module bestehen aus 12 in Reihe geschalteten Pouch-Zellen und einem entsprechenden Gehäuse. Die Zellen haben eine Kapazität von jeweils 53 Ah. Bei einer Nennspannung von 48 V entspricht dies einem Gesamtenergieinhalt von 2,544 kWh. Die

Zellen sind in Bi-Packs angeordnet. Vor Durchführung der Versuche wurden alle Zellen der beiden Module auf einen Ladezustand von 50 % gebracht. Danach wurden die oberen Zellen des mittleren Bi-Packs auf einen SoC von 100 % geladen, um anschließend in 5 % Schritten bis zur Havarie mit einer Stromrate von 1C überladen zu werden.

### Brandversuch auf Modulebene ohne Brandschutz

In dem nachfolgenden Verlaufsprotokoll sind die Ladeschritte für das Modul ohne Brandschutzlagen dargestellt. Die Zelle wurde bis zu einem Ladezustand von 175 % SOC geladen und ist dann während des letzten Ladeschrittes in die Havarie übergegangen.

Tabelle 4: Zyklisierung der Zelle ohne Zwischenlagen

Ladezyklus	Ladestatus	Uhrzeit	SOC
1	An	16:08 Uhr	50 %
	Aus	17:00 Uhr	120 %
2	An	17:23 Uhr	120 %
	Aus	17:26 Uhr	125 %
3	An	17:36 Uhr	125 %
	Aus	17:39 Uhr	130 %
4	An	17:49 Uhr	130 %
	Aus	17:52 Uhr	135 %
5	An	18:02 Uhr	135 %
	Aus	18:05 Uhr	140 %
6	An	18:15 Uhr	140 %
	Aus	18:18 Uhr	145 %
7	An	18:28 Uhr	145 %
	Aus	18:31 Uhr	150 %
8	An	18:41 Uhr	150 %
	Aus	18:44 Uhr	155 %
9	An	18:54 Uhr	155 %
	An	18:57 Uhr	160 %
	An	19:00 Uhr	165 %
	An	19:03 Uhr	170 %
	Aus	19:06 Uhr	175 %

In der Abbildung 14 sind Temperaturverläufe der thermischen Sensoren für den Ladevorgang beschrieben. Die rote Linie im Diagramm zeigt deutlich, dass sich die Zelle beim Laden erwärmt und wieder abkühlt, wenn nicht geladen wird.

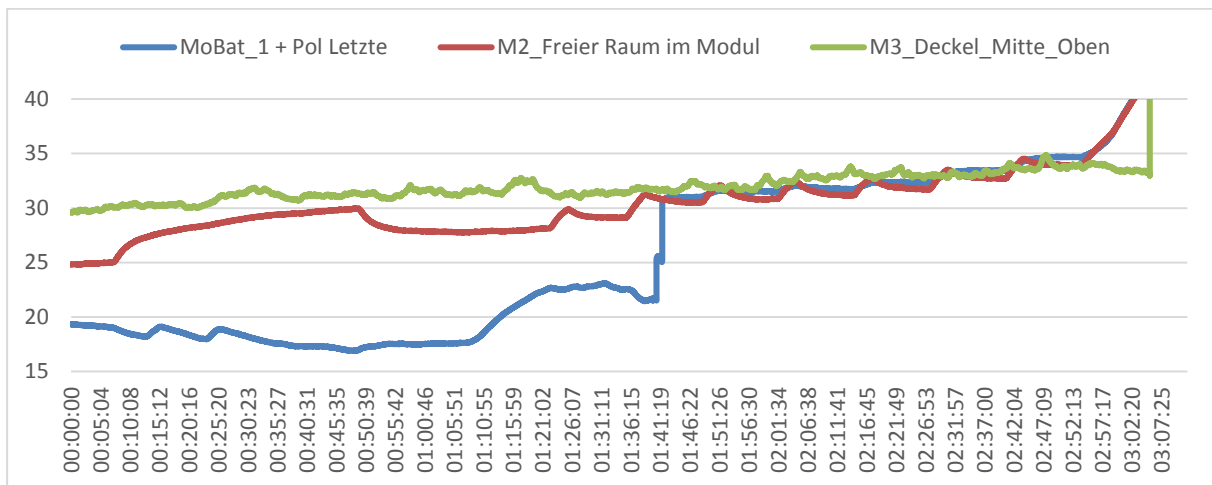


Abbildung 14: Temperaturverlauf während des Ladevorgangs ohne Brandschutz

Abbildung 15 zeigt das Modul ohne Brandschutz nach dem Versuch. Das gesamte Modul ist verschmort und verrußt. Die Zellen sind teilweise stark überdehnt. Die inneren Lagen der Zellen sind zu sehen. Alle Kunststoffteile am Modul sind verbrannt oder zumindest verschmort. Die Isolierungen aller am Modul befestigten Kabel sind ebenfalls nicht mehr vorhanden. Rückstände von Klebeband oder anderen Befestigungen sind nicht vorhanden. Alle Zellen im Modul haben eine Spannung von 0,0 Volt. Die Versuchsumgebung um das Modul ist sehr stark verschmutzt. Es finden sich große Mengen an Feststoffen und Rußpartikeln, die aus der Batterie ausgetreten sind und sich großflächig im Brandofen verteilen.



Abbildung 15: Modul ohne Brandschutzlagen nach dem Versuch im Brandofen

Der Start der Havarie wird durch das Ausgasen der ersten Zelle und durch den Temperaturpeak des Sensors M2 in Abbildung 16 und Abbildung 17 angezeigt. Gleich zum Beginn der Havarie tritt eine Temperaturspitzen von knapp 1.000 °C auf. Die gesamte Havarie dauert mehr als 60 Minuten. In dieser Zeit kommt es zu einer kontinuierlichen Erwärmung des Moduls. Es kommt aber auch immer wieder zu Temperatursprüngen auf bis zu 700 °C. Nach dem Ausgasen der letzten Zelle dauert es knapp zwei Stunden, bis sich die Ausgangstemperatur wiedereingestellt hat.

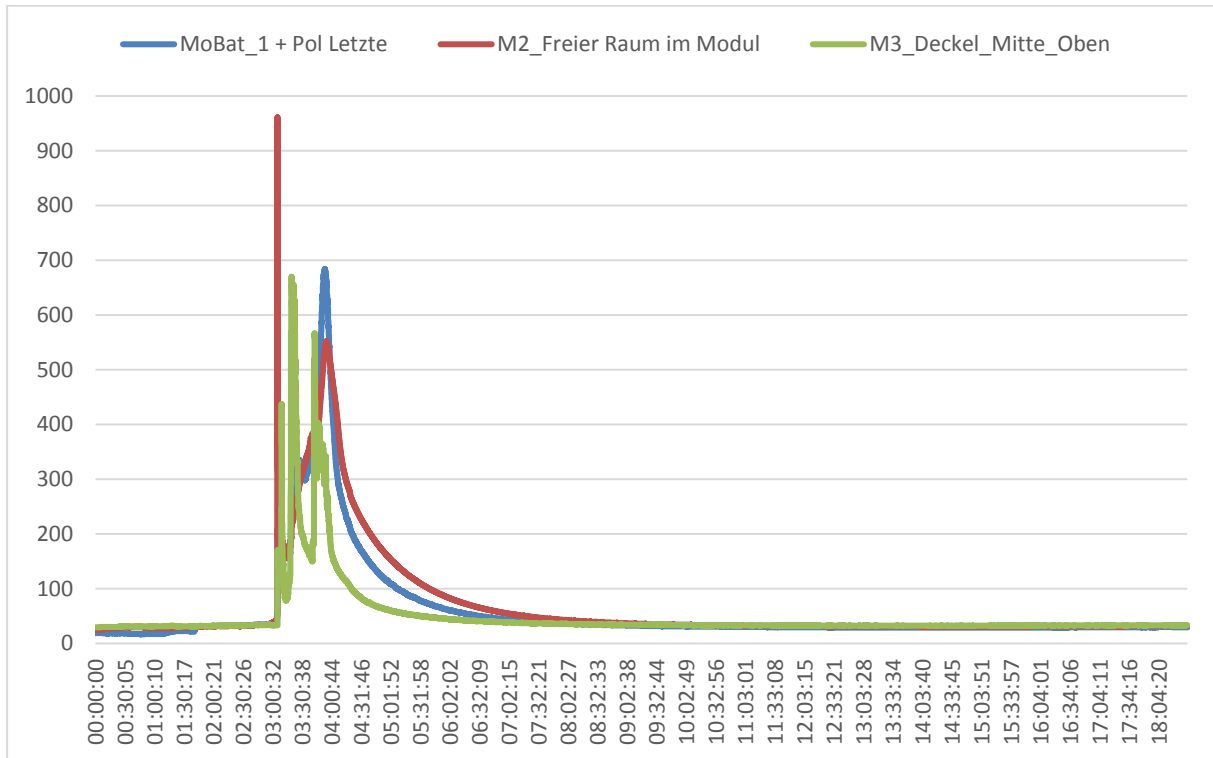


Abbildung 16: Temperaturverlauf gesamter Versuch ohne Brandschutz

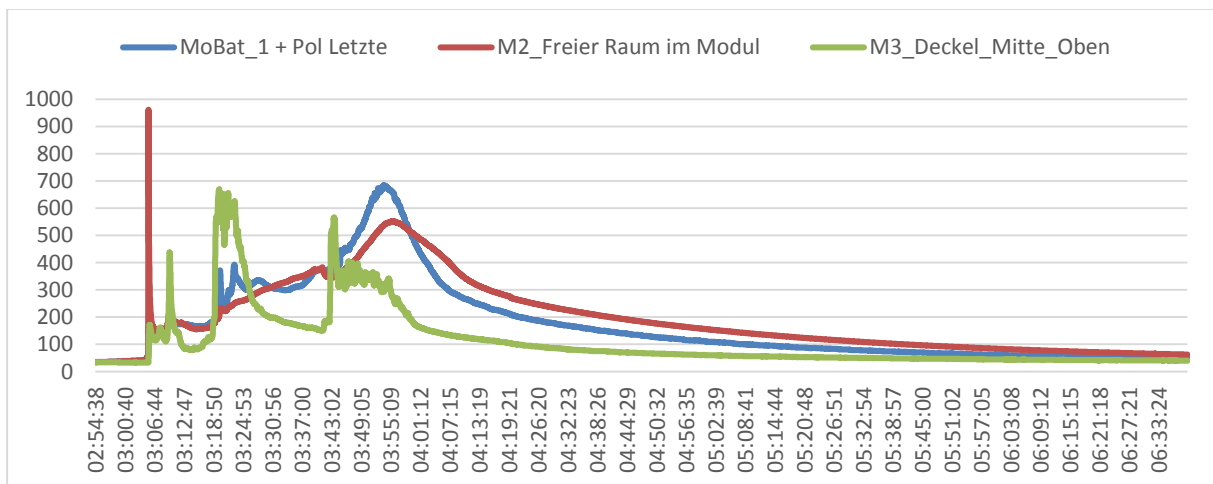


Abbildung 17: Temperaturverlauf während der Havarie ohne Brandschutz

### Brandversuch auf Modulebene mit Brandschutz

Nach dem Versuch des Moduls ohne Brandschutzlagen wurde ein identischer Versuch mit dem Modul, in welches Brandschutzlagen eingebracht wurden durchgeführt. Auch bei diesem Versuch wurde eine Zelle in der Mitte des Moduls in mehreren Schritten überladen. Der Verlauf dieses Versuches ist im nachfolgenden Verlaufsprotokoll abgebildet. Die Zelle ging kurz nach dem Abschalten des 11. Ladevorgangs in die Havarie.

Tabelle 5: Zyklisierung der Zelle mit Zwischenlagen

Ladezyklus	Ladestatus	Uhrzeit	SOC
1	An	18:00 Uhr	50 %
	Aus	18:42 Uhr	120 %
2	An	19:15 Uhr	120 %
	Aus	19:18 Uhr	125 %
3	An	19:28 Uhr	125 %
	Aus	19:31 Uhr	130 %
4	An	19:41 Uhr	130 %
	Aus	19:44 Uhr	135 %
5	An	19:54 Uhr	135 %
	Aus	19:57 Uhr	140 %
6	An	20:07 Uhr	140 %
	Aus	20:10 Uhr	145 %
7	An	20:20 Uhr	145 %
	Aus	20:23 Uhr	150 %
8	An	20:33 Uhr	150 %
	Aus	20:36 Uhr	155 %
9	An	20:46 Uhr	155 %
	An	20:49 Uhr	160 %
	An	20:52 Uhr	165 %
	An	20:55 Uhr	170 %
	An	20:58 Uhr	175 %
	Aus	<b>21:01 Uhr</b>	<b>180 %</b>

Die Abbildung 18 zeigt das Modul mit Brandschutz nach dem Versuch. Es ist gut zu sehen, dass die Zelle, die Überladen wurde, in die Havarie gegangen ist. Die Zelle ist aufgerissen und die inneren Teile der Zelle sind ausgetreten. An der Vorderseite des Moduls sind Rückstände von der Verbrennung in Form von Ruß zu erkennen. Unter dem Deckel finden sich wenige feste Rückstände. Der Deckel selbst, sowie Unter- und Rückseite des Moduls sind unbeschädigt und frei von Verschmutzungen. Die Kabel der Temperatursensoren und auch die Kabel zur Überladung sind unversehrt und auch das Klebeband zur Fixierung der Messkabel auf der Rückseite ist voll funktionsfähig. Auf der Vorderseite ist das Klebeband angeschmort aber teilweise noch vorhanden. Gleiches gilt für die Befestigung des Temperatursensors an der Seite des Moduls. Das in Brand geratene Modul weist eine Spannung von 0,0 Volt auf. Die restlichen Zellen haben zwischen 3,5 – 3,7 Volt und sind damit noch funktionsfähig. Die Versuchsumgebung ist nur in Richtung der ersten Flamme verschmutzt. Es befinden sich einige Feststoffe und Rußpartikel in der Nähe des Moduls.



Abbildung 18: Modul mit Brandschutzlagen nach dem Versuch

In der Abbildung 19 sind ist der Temperaturverlauf des Versuchs mit Brandschutz dargestellt. Die Zelle reißt auf der gegenüberliegenden Seite der Sensoren M1 und M2 auf. Der Sensor M3 befindet sich auf dem Deckel des Moduls. Hier steigt die Temperatur durch die Strahlungswärme der Flammen, die nach vorne aus dem Modul entweichen, schlag-artig an. Im weiteren Verlauf der Verbrennung wird das Modul erwärmt. Das Erklärt den verzögerten Temperaturanstieg der Sensoren M1 und M2. An den Sensoren M1 und M2 ist sehr gut zu erkennen, dass die Temperatur im Modul bereits ansteigt, bevor die Zelle aufreißt und es zur Entzündung der Gase kommt. Nach der einmaligen Entzündung der Gase sinken die Temperaturen gleichmäßig.



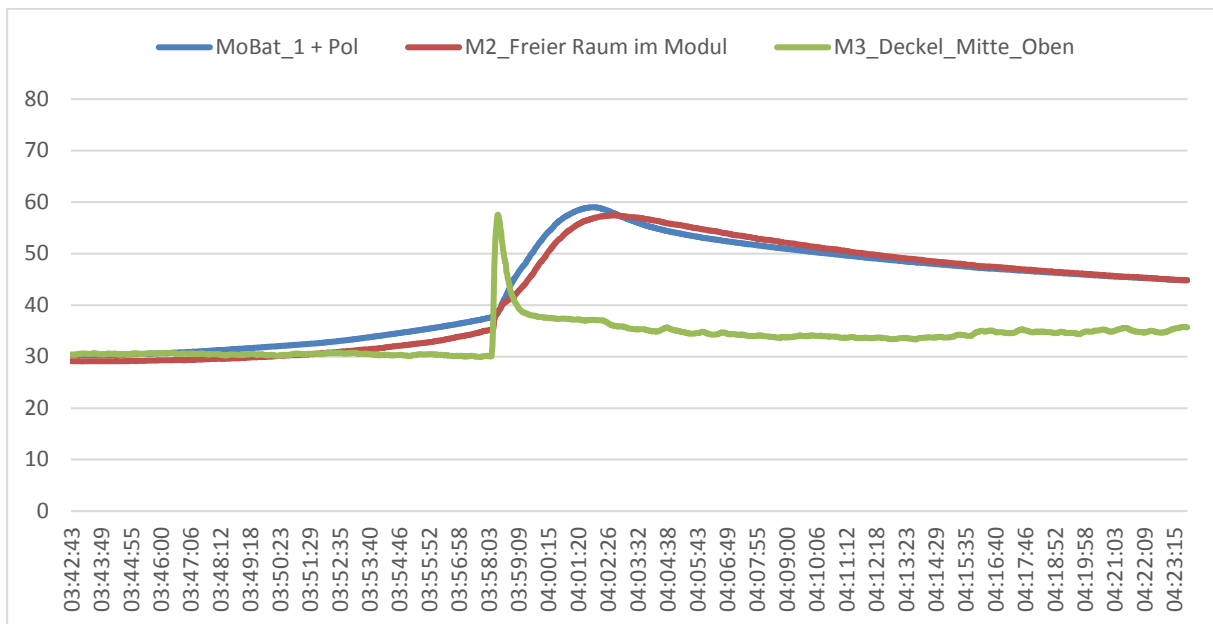


Abbildung 19: Temperaturverlauf während der Havarie mit Brandschutz

### Vergleich der beiden Brandversuche auf Modulebene / Fazit

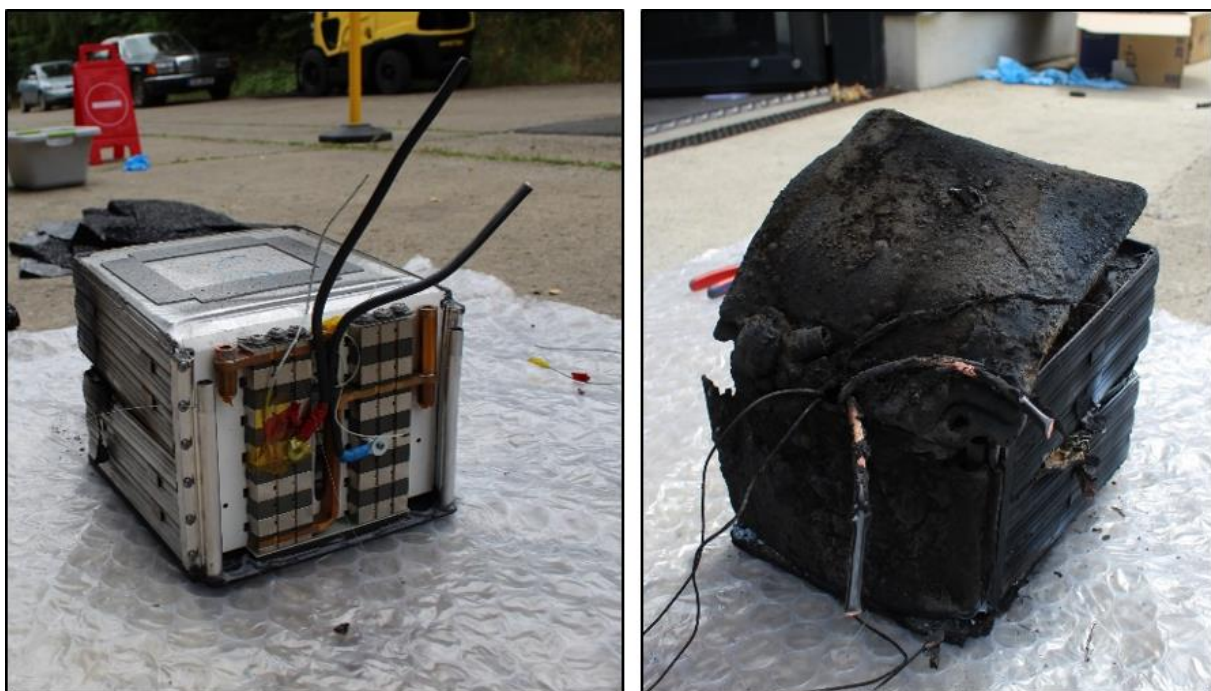


Abbildung 20: Direkter Vergleich der Module mit und ohne Brandschutz

In der Abbildung 20 sind die beiden Module mit und ohne Brandschutz dargestellt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass das Modul ohne Brandschutz starke Verschmutzungen durch Ruß o.Ä. aufweist. Die Zellverbinder sind verschmort, die Ummantelungen der Kabel, die zur Überladung genutzt wurden, sind geschmolzen. Auch der Deckel des Moduls ist geschmolzen. Das Modul ohne Brandschutz zeigt, außer an der Zelle, die absichtlich in die Havarie getrieben wurde, keine Beschädigungen. Der Deckel des Moduls lässt sich

unbeschadet vom Modul abnehmen. Die Zellverbinder sind sauber und unbeschädigt. Das gilt auch für die Kabel auf der Rückseite des Moduls.

Die Brandversuche haben gezeigt, dass der Brandschutz in Form von Zwischenlagen funktioniert. Eine Verbreitung der Havarie auf andere Zellen wird, trotz der heftigen Reaktion der Zelle, die mit einer explosionsartigen Verbrennung einhergeht, verhindert. Im Gegensatz dazu gehen im Modul ohne Brandschutz alle Zellen nacheinander in die Havarie und das Modul brennt komplett aus. Überraschend ist die Länge der Havarie, die sich über mehr als eine Stunde erstreckt. Personen in der Umgebung wären durch die immer wieder auftretenden toxischen Gase über den gesamten Zeitraum in Gefahr. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass sich die Flammen auf andere Module oder Bauteile in der Umgebung ausbreiten.

### **1.2.3 Gesamtsystem**

Das Brandschutzkonzept zwischen den Modulen im Batteriegehäuse wurde durch den Projektpartner AKASOL AG in enger Abstimmung mit der Stöbich technology GmbH ausgiebig getestet. Nach mehreren Versuchen, die im Bericht des Projektpartners tiefergehend beschrieben werden, und einigen Verbesserungen, wurde die Wirksamkeit der Zwischenlagen bestätigt. Nach der Havarie eines Moduls breitet sich der Brand nicht weiter im Batterietrog aus. Somit ist ein weiterer Schutzmechanismus in der Gesamtbatterie vorhanden.

### **1.3 TP 3.6 – Bewertung und Optimierung des Sicherheitsverhalten**

Die Brandversuche auf Modulebene und mit dem Gesamtsystem haben gezeigt, dass der Brandschutz in Form von Zwischenlagen den gewünschten Erfolg gebracht hat. Trotz der explosionsartigen Verbrennung mit einer großen Freisetzung von thermischer Energie, wurde der Übergang der Havarie von einer Zelle auf die nächsten verhindert. Das gleiche gilt für den Übergang der Havarie von einem Modul auf das Nächste.

Das Modul mit Brandschutz zeigt, außer an der Zelle, die absichtlich in die Havarie getrieben wurde, keine Beschädigungen. Der Deckel des Moduls lässt sich problemlos abnehmen. Die Zellverbinder sind sauber und unbeschädigt. Das gilt auch für die Kabel auf der Rückseite des Moduls.

Im Vergleich dazu havarierten im Modul ohne Brandschutz alle Zellen. Das Modul und die Umgebung sind sehr stark verschmutzt. Die Zellverbinder sind verschmort, die Ummantelungen der Kabel, die zur Überladung genutzt wurden, sind geschmolzen, ebenso der Deckel des Moduls. Bei diesem Versuch zeigte sich, dass sich die Havarie über mehr als eine Stunde erstreckt und damit ein sehr langer Zeitraum vorhanden ist, in dem eine Personengefährdung gegeben ist.

Die Brandschutzlagen zeigen daher mehrere Vorteile:

1. Die Brandausbreitung auf andere Zellen oder brennbare Materialien, die sich in der Nähe der Batterie befinden wird unterdrückt
2. Die Verschmutzung und Kontamination wurden auf ein Minimum reduziert
3. Die Menge an toxischen und korrosiven Gasen, Stäuben, Partikeln usw. wird drastisch reduziert

Trotz dieser Erfolge ist die Gasmenge, die aus einer Zelle austritt nicht zu vernachlässigen und muss entsprechend behandelt werden, um in der Nähe befindliche Personen ausreichend zu schützen. Um dieses Ziel zu erreichen wurde der Schadgasfilter weiterentwickelt und ausgiebig getestet. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass nach dem Filter Grenzwerte eingehalten werden, die eine Flucht aus betroffenen Bereichen zulässt, ohne dass umstehende Personen schwerwiegende oder bleibende Schäden davontragen.

Insgesamt steht durch die Ausarbeitungen und die Durchführung von Versuchen im Projektzeitraum ein erfolgreiches Sicherheitskonzept zur Verfügung, dass die Brandausbreitung im Fehlerfall verhindert und entstehende Schadstoffe minimiert, sodass Sachgüter und Personen geschützt werden.

Im Laufe des Projekts wurden nach den Brandversuchen und den Versuchen mit dem Schadgasfilter mehrere Verbesserungen vorgenommen, die zur besseren Verständlichkeit in den Kapiteln 1.1 und 1.2 beschrieben werden.

## 2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Projektkosten gliedern sich für die Stöbich technology GmbH in die drei Bereiche Personalkosten, Reisekosten und Materialkosten, wobei die Personalkosten den größten Teil einnehmen.

Tabelle 6: Projektkosten

<b>Kostenart</b>	<b>Ausgaben</b>
Personalkosten	154.962,32 €
Reisekosten	3.640,60 €
Materialkosten	36.387,54 €
<b>Gesamtkosten</b>	<b>194.990,46 €</b>
Bundesanteil	97.269,00 €
Eigenanteil	97.721,46 €

### **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Das Ziel der Stöbich technology GmbH im Projekt war es, ein leistungsfähiges Schutzkonzept auszuarbeiten, dass im Falle eines Fehlzustands einer Batteriezelle und einem damit einhergehenden Brand, das dieses Gefahrenszenario auf die kleinstmöglichen Ebene beschränkt. Damit sollen Sachwerte geschützt aber vor Allem Personenschäden vermieden werden.

Ohne die gute Zusammenarbeit der Projektpartner hätten die erfolgten Arbeiten nicht oder nur sehr zeitverzögert durchgeführt werden können. Die Zusammenfindung des Konsortiums in dieser Form hätte ohne eine Förderung nicht stattgefunden.

Die Stöbich technology GmbH sieht sich immer wieder vor der Herausforderung, Lithium-Ionen-Batterien für Testzwecke zu beschaffen. Ohne Batterien hätte das ausgearbeitete Brandschutzkonzept nicht unter realen Bedingungen getestet werden können. Durch den Projektpartner AKASOL AG, als Batteriehersteller, konnten Batterien bezogen und für Testzwecke genutzt werden. Das wäre ohne die Zusammenarbeit im Projekt nicht möglich gewesen.

Durch die im Projekt angestrebte Schnellladung mit hohen Strömen werden beim Laden auch erhöhte Temperaturen erzeugt, die auf das Batteriesystem als Trigger für einen Brand einwirken können. Diese Ergebnisse wären uns ohne das Projekt nicht zugänglich gewesen und wir hätten das Brandschutzkonzept nicht auf die steigenden Anforderungen auslegen können. Durch die höhere Gefahr eines Brands beim Schnellladen hat das Brandschutzkonzept einen nicht unerheblichen Einfluss auf die erfolgreiche Umsetzung der im Bereich der Schnelladetechnik entwickelten Funktionen auf die Erfüllung des Gesamtprojekts.

#### **4 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Im Projekt wurde neues Wissen im Bereich der Batteriesystemtechnik aufgebaut. Dieses Wissen dient der Stöbich technology GmbH, um den Innovationsvorsprung im Bereich „Sicherheit und Brandschutz im Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien“ aufrecht zu erhalten und die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Unternehmen auszubauen.

Durch die permanente Zusammenarbeit mit Hochschulen, Forschungseinrichtungen und privaten Unternehmen ergeben sich teilweise neue Ideen zur Umsetzung oder Ideen zur Gestaltung von neuen Projekten. Durch die Gespräche, die mit potenziellen Kunden und Partnern während der Projektlaufzeit geführt wurden und auch Ergebnisse der Projektarbeit beinhalteten, wurden weitere Kontakte geknüpft, die auch nach der Projektlaufzeit zu weiteren innovativen Projekten und Produkten führen werden.

Nach Projektende bestehen sehr gute Chancen, die gemachten Erfahrungen und Produkte im Bereich des Brandschutzes für Lithium-Ionen-Speicher für den Erfolg der Stöbich technology einzusetzen. Insbesondere Personentransportmittel mit Elektroantrieben könnten von den Ergebnissen profitieren, um die Fahrgäste ausreichend zu schützen. Aber auch ein Technologietransfer zu anderen Einsatzgebieten, in denen Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt werden, wird angestrebt.

Die funktionalen und wirtschaftlichen Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen und Industrien am Standort Deutschland sind groß. Besonders herausstechend sind die Weiterentwicklungen am Schadgasfilter. Der Filter wird in Zukunft nicht nur als eingeständiges Produkt angeboten, er wird auch in Produkten für den sicheren Transport und die sichere Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Bezüglich der Ergebnisse des Projekts wurden bereits Gespräche mit potenziellen Kunden geführt.

## **5 Relevante Ergebnisse Dritter**

Während der Projektlaufzeit gab es bezüglich des Brandschutzkonzept keine Ergebnisse von Dritten, die den Entwicklung im Projekt entgegengestanden hätten.

## **6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen**

### **6.1 Erfolge Veröffentlichungen:**

“The Effect of Fire Protection Layers on the Safety Behavior of High-Performance Lithium Ion Modules”

Alexander Oberland, Marc Dinse, Nury Orazov, Marcel Thiele, Ralf Bengler

Posterveröffentlichung Kraftwerk Batterie 2020

„Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat)“

BMW Statusseminar Batterien (21. – 22. Juni 2018)

Konsortium MoBat

Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

Vortragender: Dipl.-Ing. Alexander Oberland

### **6.2 Geplante Veröffentlichungen:**

„Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik (MoBat): Abschlussbericht“

EFZN Schriftenreihe

„Parametrierung und Parametrisierung von Modellen für dynamische Anwendungen“

Veröffentlichung (Artikel) geplant im 1. Halbjahr 2021