



# SCHLUSSBERICHT

## Verbundprojekt SEE-2L, Teilvorhaben BAM

### Teil I: Kurzbericht

---

<b>Förderkennzeichen</b>	13N15493
<b>Zuwendungsempfänger</b>	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Unter den Eichen 87 12205 Berlin
<b>Vorhabenbezeichnung</b>	SEE-2L - Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher in der Second Life Anwendung
<b>Teilvorhaben</b>	Aufbau eines Großversuchsstandes sowie Realisierung von Brandversuchen mit elektrischen Energiespeichern im Bereich bis 500 kWh
<b>Projektlaufzeit</b>	01.02.2021 – 30.04.2023
<b>Projektleiter TV BAM</b>	Dr.-Ing. Rico Tschirschwitz Fachbereich 2.1 „Sicherheit von Energieträgern“ +49 30 8104 4412 rico.tschirschwitz@bam.de
<b>Wissenschaftlicher Mitarbeiter</b>	Christopher Bernardy Fachbereich 2.1 „Sicherheit von Energieträgern“ +49 30 8104 5494 christopher.bernardy@bam.de

## 1. Stand der Forschung und Aufgabenstellung

Lithium-Ionen Batterien (LiB) werden aktuell in großer Anzahl in verschiedensten Anwendungen genutzt, u.a. im Bereich der Elektromobilität sowie als stationäre Speicher. Unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass die meisten der aktuell in Verwendung befindlichen LiB unter bestimmten Bedingungen thermisch durchgehen können (engl. Thermal Runaway, TR). Ursache für den TR kann z.B. eine mechanische Beschädigung, äußere Wärmeeinwirkung oder ein Überladen der LiB sein.

Es gibt weltweit eine Vielzahl von Arbeitsgruppen und Forschungseinrichtungen, welche an der Weiterentwicklung der Batterietechnologie im Allgemeinen und der Sicherheit von Batterien im Speziellen forschen. Ein Großteil der Untersuchungen zum TR von LiB findet dabei auf Zellebene statt. Versuchsmöglichkeiten auf Modul- oder Batterieebene gibt es in deutlich geringerem Umfang.

Ziel des Vorhabens war es daher, diese Versuchsinfrastruktur aufzubauen. Damit soll die Möglichkeit geschaffen werden, TR-Versuche mit Batteriespeichern im größeren Maßstab durchzuführen. Mit den Versuchen soll unter anderem untersucht werden, inwieweit sich gefährliche Zustände vor einem TR erkennen lassen, um eine Propagation des TR auf größere Speichergeometrien zu verhindern. Weiterhin soll untersucht werden, mit welchen maximalen Auswirkungen bei einem TR zu rechnen ist, um hinreichende Sicherheitsmaßnahmen treffen zu können. Darüber hinaus soll anhand der Ergebnisse eine Bewertung möglich sein, wie Batteriespeicher aus Sicht des baulichen Brandschutzes oder auch der Perspektive der Prozess- und Anlagensicherheit zu betrachten sind. Der Fokus der Untersuchungen soll dabei auf bereits gebrauchten Batterien, sogenannten Second-Life-Batteriespeichern, liegen.

Über allen Fragestellungen steht das übergeordnete Ziel, die Nutzung der Batterietechnologie insgesamt sicherer zu gestalten und dadurch sowohl die Akzeptanz als auch die nachhaltige Verwendung zu fördern.

## 2. Ablauf des Vorhabens

Wie eingehend erläutert, gibt es bereits sehr viele wissenschaftliche Untersuchungen zum thermischen Durchgehen von LiB auf Zellebene. Um diese Untersuchungen für die im Vorhaben geplanten experimentellen Untersuchungen besser nutzen zu können, wurden die vorhandenen Daten in einem ersten Schritt strukturiert ausgewertet. Die aufbereiteten Literatordaten wurden in einer Metadatenstudie zusammengefasst und im „Journal of Energy Storage“ open access publiziert:

Rappsilber, Tim; Yusfi, Nawar; Krüger, Simone; Hahn, Sarah-Katharina; Fellingner, Tim-Patrick; Krug von Nidda, Jonas; Tschirschwitz, Rico: "Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries", in: Journal of Energy Storage, Volume 60 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106579>.

Parallel dazu wurde mit der Beschaffung der Komponenten sowie dem Aufbau des Großversuchsstandes begonnen. Dieser wurde auf dem Testgelände Technische Sicherheit der BAM errichtet. Wesentliche Meilensteine dabei waren die Fertigstellung des Fundamentes (07/21), der Aufbau der Side-Door-Container (09/21), die Fertigstellung des infrastrukturellen Aufbaus mit Zuwegung und Messcontainer (01/22) sowie der Abschluss der messtechnischen Instrumentierung des Versuchsstandes (05/22). Der fertiggestellte Versuchsstand ist in Abbildung 1 dargestellt.

Auf 96 Kanälen können sowohl Temperatur als auch Spannung gemessen werden. Auf weiteren 48 Kanälen können zusätzlich sehr schnelle Temperaturvorgänge mit einer höheren Abtastrate aufgezeichnet werden. Über gekühlte Wägezellen am Proben Tisch kann der Massenabbrand während eines Versuches ermittelt werden, in einer ersten Konfiguration im Bereich bis 1,4 t. Für die Dokumentation der Versuche wurde ein IP-Kamerasystem mit 6 Kameras (3 im Versuchs-

stand, 3 in der Umgebung) installiert. Für die qualitative Analyse der beim TR freigesetzten Gase wurde ein FTIR-Spektrometer mit einem heizbaren Probennahmesystem für heiße Rauchgase installiert. Dieses System ist zusätzlich mit einem paramagnetischen Sauerstoffanalysator ausgerüstet. Als weitere Gasmesssysteme wurden 2 Diodenlaserspektrometer für Fluorwasserstoff verbaut.



Abb. 1: Großversuchsstand zur Untersuchung der Auswirkungen des TR von LIB auf dem BAM TTS.

Nach der messtechnischen Instrumentierung wurde mit dem experimentellen Probetrieb des Versuchstandes und einer ersten Versuchsserie begonnen (ab 06/22). In zwölf Einzelversuchen wurden die Auswirkungen des TR quantifiziert. Hier wurden unter anderem Versuche mit Modulen aus Automobilantriebsbatterien (2,65 kWh und 6,85 kWh) durchgeführt. Zur Initiierung wurden die Prüfmuster geheizt bzw. überladen. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie wurde in Form eines Artikels im Journal „RSC Advances“ der Royal Society of Chemistry open access publiziert:

Tschirschwitz, Rico; Bernardy, Christopher; Wagner, Patrick; Rappsilber, Tim; Liebner, Christian; Hahn, Sarah-K.; Krause, Ulrich: „Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules“, in: RSC Advances, Issue 30 (2023), <https://doi.org/10.1039/d3ra02881j>.

In den Versuchen konnte auch gezeigt werden, dass es bei der Initiierung teilweise keinerlei Anzeichen für einen bevorstehenden TR gibt und es auch bei kleineren Modulen im Zuge des TR zu einer nachfolgenden Gasexplosion kommen kann.

### 3. Wesentliche Ergebnisse

Die wesentliche Zusammenarbeit im Projekt erfolgte mit den Verbundpartnern der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) und der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb). Weitere Zusammenarbeit bestand mit den assoziierten Partnern des Vorhabens. Die wesentlichen Ergebnisse wurden in insgesamt 4 Journalbeiträgen mit Peer-Review-Verfahren publiziert. Neben den zwei bereits unter Abschnitt 2 aufgezählten Publikationen umfasst dies zwei Artikel bei „Batteries“ (DOI: 10.3390/batteries8050041 und DOI: 10.3390/batteries9060300).

Darüber hinaus wurden das Projekt und einige Ergebnisse auf Konferenzen vorgestellt, z.B. der EUSAS Konferenz 2023 in Frankfurt/Main oder dem 31. EVU-Kongress in Limassol/Zypern. Außerdem wurden einige Versuchsvideos adressatengerecht zugeschnitten und online über den YouTube-Kanal der BAM zur Verfügung gestellt (verlinkt auf der Projekthomepage der BAM: <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/SEE-2L/see-2l.html>).



# SCHLUSSBERICHT

## Verbundprojekt SEE-2L, Teilvorhaben BAM

### Teil II: Eingehende Darstellung

---

<b>Förderkennzeichen</b>	13N15493
<b>Zuwendungsempfänger</b>	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Unter den Eichen 87 12205 Berlin
<b>Vorhabenbezeichnung</b>	SEE-2L - Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher in der Second Life Anwendung
<b>Teilvorhaben</b>	Aufbau eines Großversuchsstandes sowie Realisierung von Brandversuchen mit elektrischen Energiespeichern im Bereich bis 500 kWh
<b>Projektlaufzeit</b>	01.02.2021 – 30.04.2023
<b>Projektleiter TV BAM</b>	Dr.-Ing. Rico Tschirschwitz Fachbereich 2.1 „Sicherheit von Energieträgern“ +49 30 8104 4412 rico.tschirschwitz@bam.de
<b>Wissenschaftlicher Mitarbeiter</b>	Christopher Bernardy Fachbereich 2.1 „Sicherheit von Energieträgern“ +49 30 8104 5494 christopher.bernardy@bam.de

## Inhalt

1.	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	3
1.1	Charakterisierung des thermischen Durchgehens anhand wissenschaftlicher Daten .....	3
1.2	Aufbau Großversuchsstand .....	4
1.3	Experimentelle Untersuchungen .....	9
1.4	Wissenstransfer.....	13
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	13
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten .....	13
4.	Voraussichtlicher Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	14
5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	15
6.	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	15
6.1	Erfolgte Veröffentlichungen .....	15
6.2	Geplante Veröffentlichungen .....	16
7.	Literaturverzeichnis .....	16

# 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

## 1.1 Charakterisierung des thermischen Durchgehens anhand wissenschaftlicher Daten

Beim thermischen Durchgehen (engl. thermal runaway, TR) von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) kann es zur Freisetzung von großen Mengen an Wärme und Gasen kommen. Die Gase können sowohl toxisch als auch entzündlich sein, im Gemisch mit einem Oxidator auch explosionsfähig. Bewertungskriterien hinsichtlich des Gefährdungspotentials bei einem TR sind in diesem Zusammenhang die Wärmefreisetzungsrate (engl. heat release rate, HRR) bzw. die freigesetzte Gesamtwärmemenge (eng. total heat release, THR) sowie die freigesetzte Gasmenge und deren Zusammensetzung.

Wichtige Datenbanken für wissenschaftliche Publikationen sind unter anderem das „Web of Science“ von Clarivate oder auch „Google Scholar“. In diesen Datenbanken lassen sich sehr viele wissenschaftliche Publikationen zu freigesetzten Gasen und Wärmemengen beim TR von LIB finden. Herausfordernd in diesem Zusammenhang ist die Heterogenität der vorhandenen Daten. Ursächlich dafür sind zum einen die sehr vielfältigen Batterie(zell)typen mit Variationsparametern wie Zellgeometrie, Kathodenchemie, Ladezustand (engl. State of Charge, SOC) oder auch gespeicherter, elektrischer Energie. Zum anderen gibt es keine standardisierten Bestimmungsmethoden für die freigesetzten Gas- und Wärmemengen von LIB beim TR. Daher wurden in einer umfangreichen Literaturstudie experimentell ermittelte Daten für die freigesetzte Wärme- und Gasmenge aus 76 wissenschaftlichen Publikationen gesammelt und hinsichtlich der verschiedenen Variationsparameter differenziert. Darüber hinaus wurden die Werte auf die gespeicherte elektrische Energie bezogen, um hier eine vom Energieinhalt unabhängige Aussage treffen zu können. Diese Metadatenstudie wurde in Form eines Review-Artikels im „Journal of Energy Storage“ open access publiziert [1]:

Rappsilber, Tim; Yusfi, Nawar; Krüger, Simone; Hahn, Sarah-Katharina; Fellingner, Tim-Patrick; Krug von Nidda, Jonas; Tschirschwitz, Rico: „Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries“, in: Journal of Energy Storage, Volume 60 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106579>.

Als exemplarisches Einzelergebnis sind in Abbildung 1 alle Versuche dargestellt, in denen die freiwerdende Gesamtgasmenge experimentell bestimmt wurde.

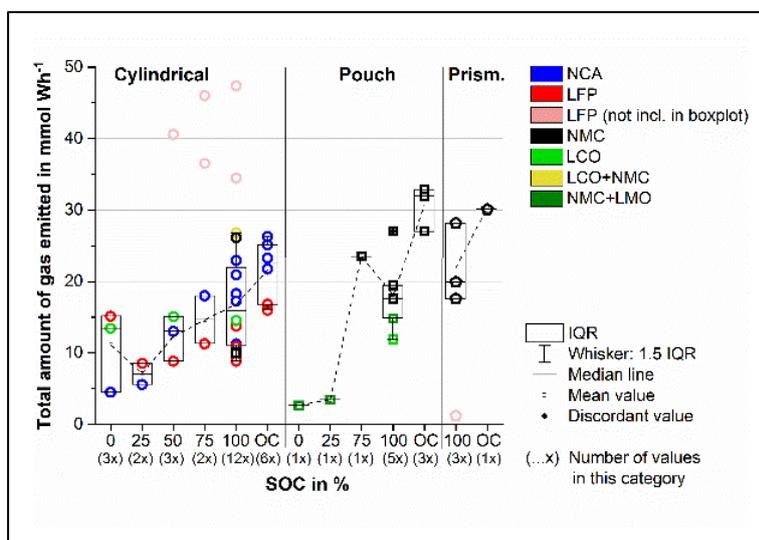


Abb. 1: Emittierte Gesamtgasmenge beim TR von LIB-Zellen in Abhängigkeit vom Kathodenmaterial, dem SOC und der Zellgeometrie, aus [1].

Die Übersicht umfasst 43 Einzelversuche mit LIB-Zellen mit 6 verschiedenen SOC, 3 verschiedenen Zellgeometrien sowie 6 verschiedenen Kathodenmaterialien. Es wird gut ersichtlich, dass bei einem TR nahezu unabhängig der einzelnen Variationsparameter mit ca. 10 mmol bis 30 mmol freiwerdendem Gas pro gespeicherter Wh Energie gerechnet werden muss. Dies entspricht bei einer Temperatur von 25 °C in etwa einer Menge von 0,25 l bis 0,75 l pro gespeicherter Wh. Bei einem Modul von 6 kWh entspricht dies einer freiwerdenden Gasmenge von 1500 l bis 4500 l.

Weitere Einzelergebnisse, unter anderem zur THR sowie zum Anteil von Einzelgasen am freigesetzten Gas, z. B. Kohlenstoffmonoxid oder Fluorwasserstoff, sind der entsprechenden Publikation zu entnehmen [1]. Der wesentliche Mehrwert der Metadatenstudie besteht darin, dass diese eine große Bandbreite an LIB mit unterschiedlichsten Variationsparametern sowie verschiedensten Bestimmungsverfahren abdeckt. Mit weiteren experimentellen Untersuchungen im Bereich von TR zu LIB wird man nur schwer eine größere Vielfalt an Prüfmustern untersucht bekommen. Daher kann mit den Ergebnissen der Metadatenstudie zum einen der Versuchsaufwand verringert werden, da in den anstehenden Versuchen weniger Parameter variiert werden müssen. Außerdem können Ergebnisse im Nachgang mit der umfangreich aufgearbeiteten Datenmenge der Metastudie validiert werden.

## 1.2 Aufbau Großversuchsstand

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine Großversuchsstand konzipiert und aufgebaut. Standort des Versuchsstandes ist das Testgelände Technische Sicherheit der BAM in Baruth/Mark. Infrastrukturelle Anforderungen an den Versuchsstand waren, die Möglichkeit einen Sperrkreis von 100 m einrichten zu können sowie eine Zugänglichkeit mittels Gabelstapler. Die äußere, infrastrukturelle Errichtung des Großversuchsstandes ist in der folgenden Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zeitliche Abfolge Aufbau Großversuchsstand.

Nr.	Abbildung	Datum, Baufortschritt
1.		15.02.2021 – Bauplatz

Nr.	Abbildung	Datum, Baufortschritt
2.		15.04.2021 – GPS-Vermessung, Abstecken der Fundamentkonturen
3.		27.04.2021 – Anlieferung 120 t Recyclingmaterial
4.		06.05.2021 – Fundament ausgehoben
5.		01.06.2021 – Recyclingmaterial eingebracht

Nr.	Abbildung	Datum, Baufortschritt
6.		30.06.2021 – Mineralgemisch verdichtet, Anlieferung Betonplatten
7.		29.07.2021 – Kiesbett eingebracht, Betonplatten Versuchsfläche gelegt
8.		31.08.2021 – Anlieferung zweier Side-Door-Container mit je herausgetrennter Rückwand
9.		08.12.2021 – Betonplatten Zufahrtsweg gelegt

Nr.	Abbildung	Datum, Baufortschritt
10.		<p>10.01.2022 – Anlieferung Messcontainer mit verstärktem Boden (850 kg/m<sup>2</sup>, notwendig für Löschanlage und Löschwasserreservoir)</p>
11.		<p>26.01.2022 – Einbau zweiter Stahlwannen (je 850 kg) für den Grundwasserschutz in den Löschanlagen</p>
12.		<p>30.03.2022 – Aufbau Abluftstrang: Ablufthaube im Versuchstand, Abluftverrohrung, Lüfter für heiße Rauchgase</p>

Wesentliche Verzögerungen gab es bei den Angebotsabgaben für die Side-Door-Container (Lieferkettenverschiebung durch Coronapandemie) sowie hinsichtlich der Lieferzeit für den Messcontainer (20 Wochen). Infrastrukturell war der Versuchstand im März 2022 fertiggestellt. Die Beschaffung der wesentlichen messtechnischen Komponenten wurde parallel zum infrastrukturellen Aufbau durchgeführt. Auch hier kam es bei einigen Systemen zu gesteigerten Lieferzeiten gegenüber der Vor-Corona-Zeit.

Die im Versuchstand verbaute Messtechnik ist in Abbildung 2 dargestellt. Darüber hinaus sind die Messsysteme, welche während der Versuche im Messcontainer (vgl. Tabelle 1: Nr. 10, weißer Container) verbaut sind, in Abbildung 3 dargestellt. Die wesentlichen Elemente des messtechnischen Aufbaus sind:

- Ein FTIR (Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer) für heiße Rauchgase mit integriertem Sauerstoffanalysator (Abb. 2: Nr. 2-4, Abb. 3: links, 1 - 5)
- Zwei Diodenlaserspektrometer (DLS) für Fluorwasserstoff (HF) ein System im Versuchsstand (Abb. 2: Nr. 5 + 6), ein System am Auslass des Abgasstranges, je auf Stativ mit Präzisionsausrichtkopf
- Ein Messsystem zur Datenerfassung, bestehend aus zwei Datenlogger Keysight DAQ970A mit je drei 16-Kanal Messkarten DAQM902A (Abb. 3: Nr. 8) für Temperatur (Abb. 2: 8 + 9), Spannung und Wägezellen
- Ein Messsystem, bestehend aus einem 64-Kanal Datenerfassungssystem Keysight U2355A und drei 16-Kanal Temperaturmessverstärkersysteme J.E.T. SAB-1 für schnellere Temperaturvorgänge (Abb. 3: rechts, 10 + 11)
- Ein Probentisch (Abb. 2: Nr. 1) mit 4 Biegestab-Wägezellen, Messbereich je 350 kg (Abb. 2: Nr. 7, Abb. 3: Nr. 9), Messwerterfassung über Datenlogger Keysight DAQ970A und Messkarte DAQM902A (Abb. 3: mittig, Nr. 8)
- IP-Kamerasystem Basecom mit Recorder (Abb. 3: mittig, Nr. 6 + 7) und drei Kameras im Versuchsstand (u.a. Abb. 2: Nr. 10) sowie 3 Kameras für den Umgebungsbereich

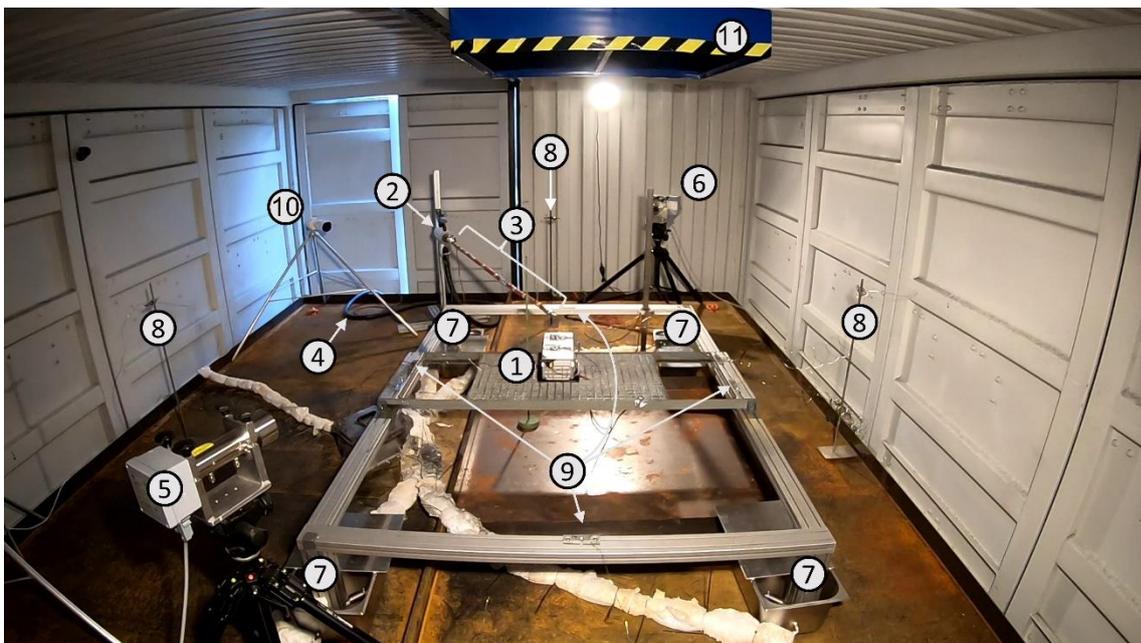


Abb. 2: Messtechnischer Aufbau innerhalb des Großversuchsstandes: Probentisch mit Prüfmuster (2,65 kWh-Modul) (1), heizbare Probennahmeeinrichtung für FTIR mit Vorfiltersonde (2), Probennahmelanze (3), Probennahmeleitung (4), Diodenlaserspektrometer für HF mit Sender (5) und Empfänger (6), Wägezellen in Kühlbehältern an jedem Fuß des Probentisch (7), Thermoelemente Typ K in Abständen von 2 m (8) und 1 m (9) zum Prüfmuster, IP-Kameras (10) und Ablufthaube (11), aus [2].

Die messtechnische Implementierung war im Mai 2022 abgeschlossen. Dies beinhaltete neben dem eigentlichen Aufbau auch Vor-Ort-Schulungen für das FTIR (12/2021) und die DLS (02/2022). Nicht realisiert werden konnte der Einbau einer Hochdruckwassernebellöschanlage. Seitens potenzieller Lieferanten einer Löschanlage wurde aufgezeigt, dass eine technische Projektierung einer Anlage erst nach Fertigstellung des Versuchsstandes zielführend ist. Im Folgenden haben die Ausschreibung und Vergabe ca. 5 Monate gedauert (bis 01/2023). Die Lieferzeit lag mit 32 Wochen ebenfalls deutlich über der avisierten Lieferzeit im Antrag aus der Vor-Corona-Zeit. Daher konnte die Löschanlage nicht wie ursprünglich geplant im Rahmen des

Vorhabens beschafft werden. Die Anlage wurde letztendlich über Haushaltsmittel der BAM beschafft und nach weiteren Lieferverzögerungen Ende Oktober 2023 verbaut. Ein weiterer großer Punkt bei der Beschaffung, neben den Materialien für den Großversuchsstand, waren die Prüfmuster für die experimentellen Untersuchungen. Eine Herausforderung hinsichtlich dieser Beschaffung war, dass es für Second-Life-Batterien, welche

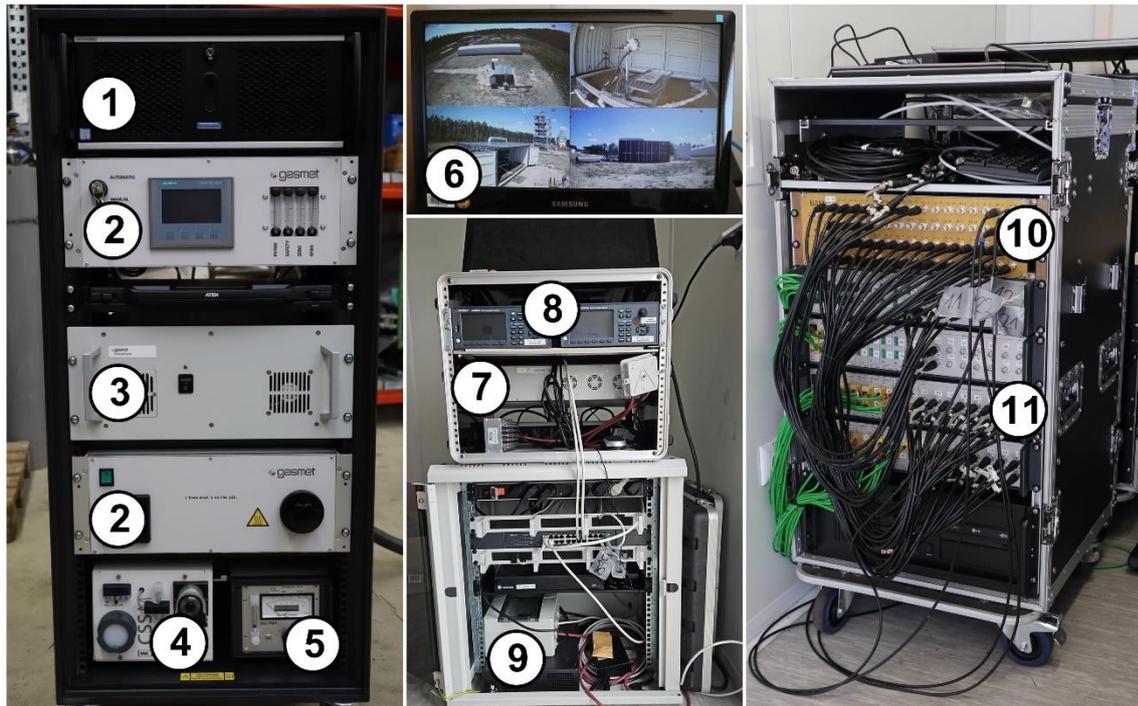


Abb. 3: Messtechnischer Aufbau innerhalb des Messcontainers (Tabelle 1: Nr. 10), links: FTIR-System mit Rechner (1), Probennahmesystem (2), FTIR (3), Messgaskühler (4), paramagnetischer Sauerstoffanalysator (5), mittig: Bascom IP-Kamerasystem mit Anzeige (6) und Recorder (7), zwei Datenlogger Keysight DAQ970A (8), elekt. Anschluss für Wägezellen (9), Datenlogger Keysight U2355A (10), drei Temperaturmessverstärkersysteme J.E.T. SAB-1 (11).

im First-Life im Bereich der Elektromobilität im Einsatz waren, keinerlei Plattformen bzw. Angebote für den Kauf im größeren Maßstab gibt. Über umfangreiche Rechercharbeit konnte ein deutscher Automobil-OEM gefunden werden, über den 40 Automobilantriebsbatterien käuflich erworben werden konnten. Die einzelnen Batterien wurden disassembliert und die Einzelmodule extrahiert. Die Einzelmodule wurden für die Versuche verwendet.

### 1.3 Experimentelle Untersuchungen

Im Abschnitt 1.2 wurde der Aufbau des Großversuchsstandes dargestellt, welcher im Mai 2022 abgeschlossen war. Ab Juni 2022 wurde der experimentelle Betrieb am Versuchsstand aufgenommen. Die erste Versuchsserie umfasste dabei 12 Einzelversuche, um die Auswirkungen beim thermischen Durchgehen von Batteriespeichern verschiedener Größe zu quantifizieren. In Tabelle 2 sind die durchgeführten Tests mit den jeweiligen Versuchsparametern aufgeführt. Die Versuchsserie wurde mit Versuchen auf Einzelzellebene begonnen, um zu Beginn Versuche durchzuführen, deren Auswirkungen sehr sicher beherrscht werden können und deutlich unterhalb der Auslegungsgrenzen des Versuchsstandes liegen. Weiterhin sollte mit diesen Einzelzellversuchen eine Validierung der Messtechnik erfolgen, insbesondere der Gasmesstechnik. Der Vorteil von Validierungsversuchen auf dieser Ebene ist, dass die als Prüfmuster verwendeten Zellen verhältnismäßig günstig sind, im Vergleich zu den Modulen aus den Versuchen 7 bis 12. Nach den Einzelzellversuchen wurde im weiteren Versuchsprogramm ein scal-up der Prüfmuster durchgeführt. Neben 2 Versuchen mit Zellstapeln, bestehend aus je drei Zellen, wurden drei

Versuche mit kleineren Modulen (2,65 kWh, ca. 13 kg) und drei Versuche mit größeren Modulen (6,85 kWh, ca. 31 kg) durchgeführt. Alle getesteten Zellen/Module hatten eine NMC-Kathode (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide) und zu Versuchsbeginn einen SOC von 100 %. Das thermische Durchgehen wurde durch Erwärmen der Zellen/Module durch kommerzielle Heizplatten initiiert. Lediglich in einem Versuch (vgl. Tabelle 2: Versuch 11) wurde das thermische Durchgehen durch Überladen initiiert. Im Rahmen der Versuche wurden eine Reihe von Größen messtechnisch erfasst, anhand derer die Auswirkungen beim thermischen Durchgehen quantifiziert werden können. Dazu zählen neben der qualitativen Zusammensetzung der freigesetzten Gase auch die Temperaturwirkung im Nahbereich, das Auftreten von Fragmenten sowie die Abschätzung von potenziellen Gasexplosionen. Darüber hinaus konnte eine Vielzahl von Daten gewonnen werden, die die Initiierung und den Ablauf des thermischen Durchgehens der Speicher quantifizieren. Hierzu sind insbesondere die Zeiten bis zum TR, das optisch wahrnehmbare Ausgasen vor dem eigentlichen TR sowie der Masseverlust durch die Reaktion zu nennen.

Tabelle 2: Versuchsserie zur Quantifizierung der Auswirkungen beim thermischen Durchgehen.

Nr.	Getestete Einheit			Anzahl Zellen	Elektr. Konfig.	Nominell gespeicherte elektr. Energie [kWh]	Masse [kg]	Methode TR Initiierung
	Zelle	Drei-Zellen-Stapel	Modul					
1	X	-	-	1	-	0.0525	0.26	Thermisch
2	X	-	-	1	-	0.0525	0.26	Thermisch
3	X	-	-	1	-	0.0525	0.26	Thermisch
4	X	-	-	1	-	0.0525	0.26	Thermisch
5	-	X	-	3	-	0.1575	0.78	Thermisch
6	-	X	-	3	-	0.1575	0.78	Thermisch
7	-	-	X	12	3S4P	2.65	13.0	Thermisch
8	-	-	X	12	3S4P	2.65	13.2	Thermisch
9	-	-	X	12	3S4P	2.65	12.7	Thermisch
10	-	-	X	24	8S3P	6.85	30.8	Thermisch
11	-	-	X	24	8S3P	6.85	30.9	Überladen
12	-	-	X	24	8S3P	6.85	31.1	Thermisch

Die Ergebnisse dieser ersten Versuchsserie wurde in Form eines Artikels im Journal „RSC Advances“ der Royal Society of Chemistry open access publiziert [2]:

Tschirschwitz, Rico; Bernardy, Christopher; Wagner, Patrick; Rappsilber, Tim; Liebner, Christian; Hahn, Sarah-K.; Krause, Ulrich: „Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules“, in: RSC Advances, Issue 30 (2023), <https://doi.org/10.1039/d3ra02881j>.

Als exemplarische Ergebnisse werden an dieser Stelle einige Resultate der Gasmessung vorgestellt. Aufgrund seiner Toxizität für den menschlichen Organismus wird in der wissenschaftlichen Literatur vielfach die Freisetzung von HF untersucht und diskutiert, z. B. [3-6]. Daher wurde in den Versuchen ein besonderes Augenmerk auf die Messung von HF gelegt. Dafür wurden 2 verschiedene Verfahren verwendet: zum einen das FTIR und zum anderen zwei DLS. Die Ergebnisse der Messungen mit den zwei unterschiedlichen Systemen sind in Abbildung 4 dargestellt. Zum Schutz der sehr hochwertigen Messtechnik wurde in den Versuchen 10 - 12 keine FTIR-Messung innerhalb des Versuchsstandes durchgeführt, ebenso wie in den Versuchen 10 und 11 kein DLS verwendet wurde.

In den Einzelzellversuchen zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messverfahren. Unabhängig vom Messprinzip wurden nicht mehr als 12 ppm HF gemessen. In den

Versuchen mit den Zellstapeln und den kleineren Modulen liegen die gemessenen Konzentrationen im Mittel über den Einzelzellversuchen, weichen jedoch auch zwischen den zwei Messsystemen deutlich mehr ab (vgl. Abb. 4: z.B. Versuch 8, FTIR Faktor 5 größer gegenüber DLS). In drei Versuchen werden mit dem FTIR höhere Werte bestimmt (Versuche 5, 6, 8), in zwei Versuchen mit dem DLS (Versuche 7, 9). Berücksichtigt werden müssen dabei die unterschiedlichen Messprinzipien zwischen den beiden Systemen. Beim FTIR wird mittels Probennahmesonde an einer bestimmten Stelle die Probe angesaugt (vgl. Abb. 2: Nr. 2). Folglich handelt es sich dabei „nur“ um eine Punktmessung. Mit dem DLS wird hingegen durch Einlinienspektroskopie im nahen Infrarotbereich auf einer Linie (vgl. Abb. 2: zwischen Sender (5) und Empfänger (6)) gemessen. Dementsprechend wird der HF-Gehalt im freigesetzten Gas über eine größere Distanz bestimmt, was prinzipiell erst einmal zu einer höheren Aussagekraft der Ergebnisse führt. Nachteilig bei dem Messprinzip des DLS ist jedoch, dass es sich um ein optisches Verfahren handelt, welches einen hinreichend großen Transmissionsgrad benötigt. Wenn der Rauch optisch zu dicht ist (Transmission < 1%) ist eine Messung mit diesem System nicht mehr möglich. Folglich besteht die Möglichkeit, dass gerade bei sehr starken Gasfreisetzungen eventuell sehr hohe HF-Konzentrationen nicht erfasst werden. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Vor- und Nachteile kann jedoch festgehalten werden, dass der parallele Einsatz beider Systeme einen qualitativ besseren Eindruck über die real vorhandene HF-Konzentration gibt im Vergleich zur Verwendung der einzelnen Systeme. Die höchste gemessene HF-Konzentration über alle Versuche war 76 ppm im Versuch 12 (vgl. Abb. 4).

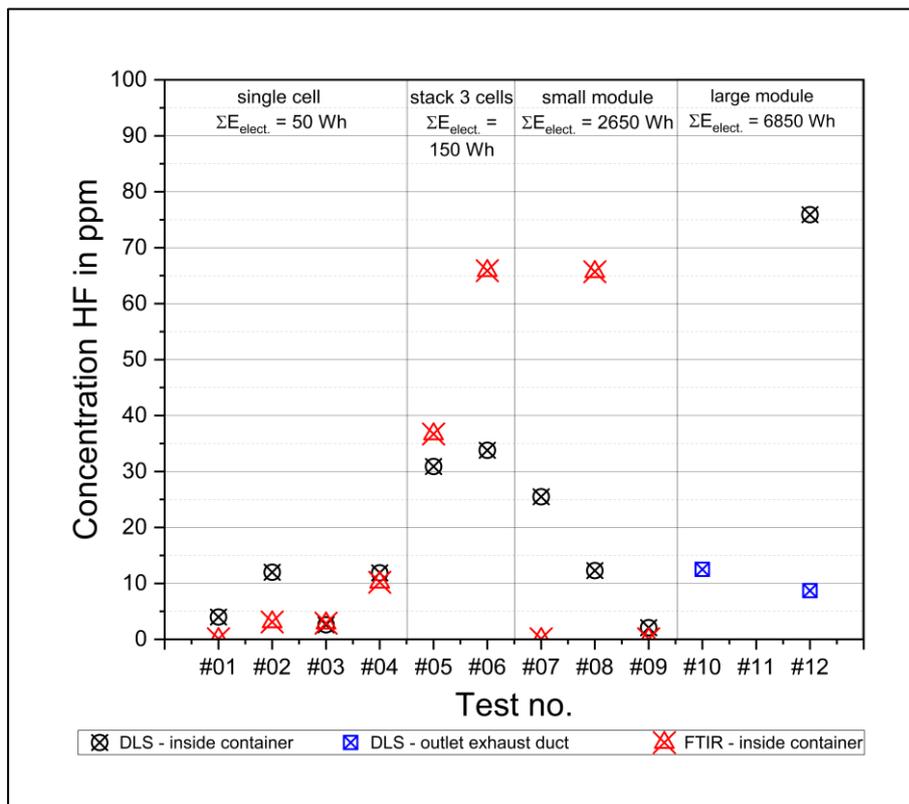


Abb. 4: Maximal gemessene HF-Konzentration im freigesetzten Gas beim TR, Messungen mittels FTIR und DLS, aus [2].

Neben HF wurden mit dem FTIR eine Vielzahl weiterer Stoffe gemessen. Die Ergebnisse für  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$  sind in Abbildung 5 aufgeführt. Es ist klar ersichtlich, dass mit steigender Größe der Prüfmuster auch der Anteil der drei Stoffe im freigesetzten TR-Gas ansteigt. Dieses Ergebnis ist so weit erwartbar, da es sich bei den Stoffen um Produkte der vollständigen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) bzw. unvollständigen ( $\text{CO}$ ) Verbrennung handelt. Wenn die Prüfmuster größer werden, gibt

es folglich auch eine größere Verbrennungsreaktion, wodurch mehr Verbrennungsprodukte freigesetzt werden.

Bemerkenswert ist jedoch eine CO-Konzentration von 5,6 Vol.-% im Versuch 9. Isoliert betrachtet liegt dieser Wert unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) für CO. Diese wird unter atmosphärischen Bedingungen mit 10,9 Vol.-% angegeben [7]. Neben den in Abbildung 5 aufgeführten Stoffen werden eine Vielzahl weiterer Gase freigesetzt, u. a. Kohlenwasserstoffe und Wasserstoff. Die UEG für die Kohlenwasserstoffe und Wasserstoff liegen dabei deutlich unterhalb der UEG von CO. Folglich liegt die UEG für ein Gemisch aus CO sowie Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff auch unterhalb der UEG für CO. Dementsprechend kann ein derart hoher CO-Anteil am freigesetzten Gas in Kombination mit weiteren Brenngasen durchaus ein Gemisch ergeben, welches über der UEG liegt und damit zündfähig ist. Eine solche Gasexplosion, durch das freigesetzte Gas bei TR, konnte im Versuch 7 dokumentiert werden. Die Reaktion füllte dabei das gesamte Volumen des Versuchsstandes aus (ca. 80 m<sup>3</sup>) und war derart heftig, dass es trotz einer als Druckentlastungsfläche angelehnten Tür zu signifikanten Beschädigungen innerhalb des Versuchsstandes kam. Durch die zu geringe Messfrequenz des FTIR (0,2 Hz) in Kombination mit der sehr schnellen Reaktion (Beginn TR bis Gasexplosion ca. 1 s) konnte im Versuch 7 nahezu kein CO erfasst werden (vgl. Abb. 5). Mit diesem Versuchsverlauf konnte gezeigt werden, dass dieses TR-Verhalten von LIB (Gasexplosion nach TR) nicht nur auf Zellebene möglich ist [8, 9], sondern auch darüber hinaus.

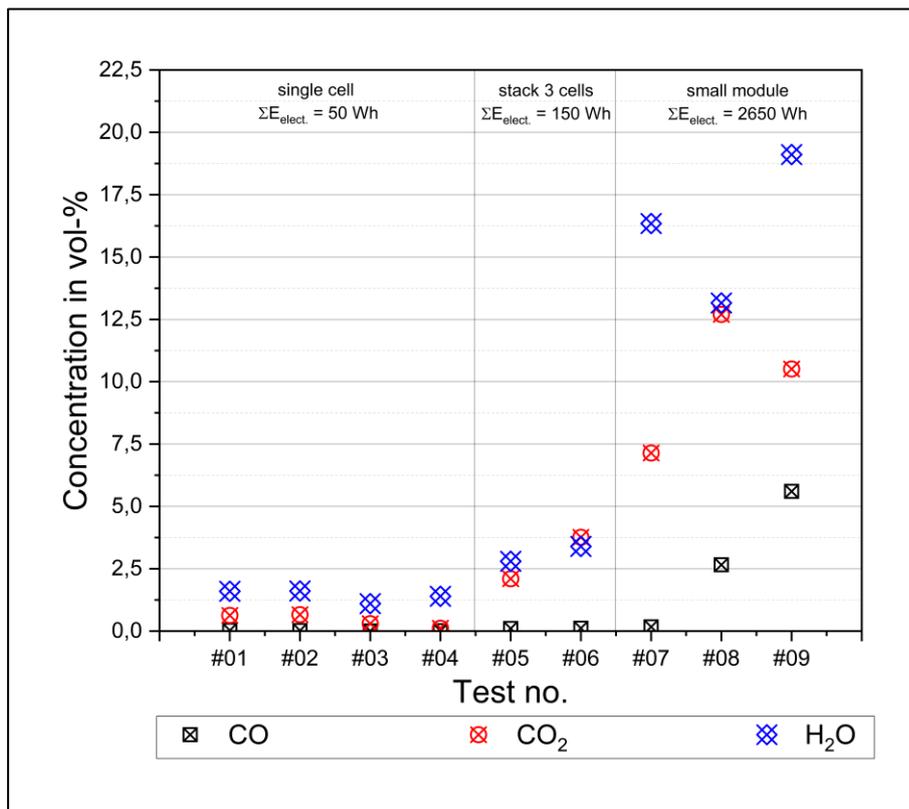


Abb. 5: Maximal gemessene Konzentration für H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> und CO im freigesetzten Gas beim TR, Messung mittels FTIR, aus [2].

Weitere Ergebnisse der Versuchsserie, wie z. B. die thermische Wirkung im Nahbereich, Fragmentierung der Module durch die Reaktion sowie das Verhalten der Zellen/Module bis zum TR und insbesondere während des TR sind der Publikation zu entnehmen [2]. Über diese hier vorgestellten Versuche hinaus waren im ursprünglichen Vorhabenplan noch Löschversuche vorgesehen. Aufgrund der Verzögerungen bei der Beschaffung (vgl. Abschnitt 1.2) konnte die

Löschanlage nicht innerhalb der Projektlaufzeit beschafft und in Betrieb genommen werden. Daher war es nicht möglich die ursprünglich angedachten Löschanlage durchzuführen.

## 1.4 Wissenstransfer

Schwerpunkt des Wissenstransfers ist die Publikation der erzielten experimentellen Ergebnisse in einem Journal mit Peer-Review-Verfahren. Dieses Ziel wurde mit dem Artikel „Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules“ im Journal “RSC Advances“ der Royal Society of Chemistry erreicht. Weitere Ergebnisse wurden ebenfalls in Form von Journalbeiträgen mit Peer-Review-Verfahren publiziert [1, 10, 11]. Darüber hinaus wurde das Projekt bzw. Ergebnisse des Projektes auf Konferenzen [12, 13] und in weiteren Artikeln [14, 15] publiziert. Weiterhin werden das Projekt und auch die Projektergebnisse auf der SEE-2L-Projekthomepage der BAM vorgestellt ([Link](#), [16]). Auf dieser Homepage sind ebenso 3 adressatengerecht geschnittene Videos von TR-Versuchen mit Modulen verlinkt (vgl. Tabelle 2: Versuche 7, 11, 12). Diese sind über den YouTube-Kanal der BAM für die Öffentlichkeit frei zugänglich ([Video 1](#), [Video 2](#), [Video 3](#)). Weitere Publikationen sind für die erste Jahreshälfte 2024 geplant. Dazu zählen u. a. ein Vortrag auf der Jahrestagung der vfdb in Magdeburg (06.-08.05.2024, zugesagt) sowie ein Artikel in der vfdb Zeitschrift (zugesagt).

Wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen wurden im Rahmen der Projektarbeit auch für die Projektierung und den Aufbau des dezentralen Demonstrators am IDF NRW (Institut der Feuerwehr Nordrhein-Westfalen) verwendet. Dazu wurden neben regelmäßigen Meetings zur Beschaffung, dem Aufbau sowie dem Start des Versuchsbetriebs auch Vor-Ort-Planungstreffen am Großversuchsstand auf dem BAM TTS realisiert. Der Beginn des Versuchsbetriebs am IDF NRW wurde mit ergänzender Messtechnik unterstützt.

## 2. **Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wesentlichen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind Investitionskosten in Höhe von 265 k€, Personalkosten in Höhe von 112 k€ und Verbrauchsmittel in Höhe von 46 k€. Bei den Investitionskosten sind die größten Positionen das FTIR-System (vgl. Abb. 3: Nr. 1 - 5 sowie Abb. 2: Nr. 2 - 4) mit 147 k€, zwei DLS (vgl. Abb. 2: Nr. 5 - 6) mit 76 k€ sowie die zwei Side-Door-Container und der Messcontainer (vgl. Tabelle 1: Nr. 8 - 10) mit zusammen 25 k€. Die größte Position in den Verbrauchsmaterialien waren die Automobilantriebsbatterien als Prüfmuster mit 42 k€.

Personalmittel wurde gegenüber dem Gesamtfinanzierungsplan in Höhe von 37 k€ nicht abgerufen. Ursächlich war hier ein Ausscheiden des wissenschaftlichen Mitarbeiters 4 Projektmonate vor Projektende. Im Investitionsbereich wurden 62 k€ nicht abgerufen. Wesentlicher Posten bei diesen nicht verwendeten Mitteln ist die Beschaffung der Löschanlage, welche durch Lieferverzögerungen nicht mehr innerhalb des Projektes realisiert werden konnte. Im Zuge der Coronapandemie konnte keine der ursprünglich angedachten Dienstreisen durchgeführt werden. Dementsprechend sind auch keinerlei Reisekosten entstanden.

## 3. **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Ziel des Teilvorhabens der BAM war der Aufbau und die Inbetriebnahme des Großversuchsstandes. Darüber hinaus sollten experimentelle Ergebnisse zu den Auswirkungen beim TR von LIB erzielt und diese Ergebnisse publiziert werden. Um die erforderlichen Arbeiten im Projekt umsetzen zu können wurde über den Großteil der Projektlaufzeit ein wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigt. Mit den Investitionsmitteln wurde ein Großteil der erforderlichen Infrastruktur und Messtechnik für den Versuchsstand realisiert. Darüber hinaus sind durch die BAM in größerem

Maße Eigenmittel für die Unterstützung der Umsetzung des Vorhabens verwendet worden, insbesondere hinsichtlich der baulichen Gestaltung des Fundamentes (vgl. Tabelle 1: Nr. 2 - 7), die nachträgliche Realisierung der Löschanlage sowie open-access-Gebühren für zwei Journalbeiträge [1, 2]. Weiterhin konnte eine Vielzahl bereits vorhandener Infrastruktur und Ausrüstung für das Projekt genutzt werden (z.B. Messwarte, Kabel, Sensorik).

#### **4. Voraussichtlicher Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Sämtliche im Projekt erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in Journals mit Peer-Review-Verfahren veröffentlicht. Es wurde besonders darauf geachtet, dass alle diese wissenschaftlichen Publikationen [1, 2, 10, 11] open-access erfolgten. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse im Nachgang zum Projekt frei verfügbar sind. Als weiteren Weg der Nachnutzung wurden einige Videosequenzen der Versuche adressatengerecht geschnitten und öffentlich über den YouTube-Kanal der BAM zugänglich gemacht (vgl. Abschnitt 1.4, [Video 1](#), [Video 2](#), [Video 3](#)). Für weitere bisher erfolgte und auch noch geplante Publikationen sei auf den Abschnitt 6. „Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse“ verwiesen.

Neben den Publikationen fließen die Ergebnisse auch in die alltägliche Beratungsarbeit der BAM als wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde ein. Im Folgenden dazu zwei Beispiele:

1. Zwei große, europäische Fluggesellschaften haben die BAM hinsichtlich des Batterietransportes in elektrisch betriebenen Krankenfahrrädern in Flugzeugen kontaktiert. Aktuell gibt es insbesondere bei fest verbauten Akkus keinerlei Begrenzungen. Dies kann dazu führen, dass in Flugzeugen Batterien bis zu 4 kWh ohne Weiteres transportiert werden. Hier konnte anhand der Ergebnisse in SEE-2L sehr fundiert dargestellt werden, welche Konsequenzen ein TR von LIB in dieser Größenordnung hat. Ebenso konnte eine fachliche Erörterung begonnen werden, bis zu welchen Grenzwerten unter Einhaltung von bestimmten Sicherheitsvorkehrungen ein Transport von LIB in Flugzeugen möglich ist. Der Vorgang ist aktuell in der weiteren Bearbeitung. Eventuell sollen hier auch noch ergänzende Versuche am Großversuchsstand durchgeführt werden. Das Ziel hier ist, dass es perspektivisch auch Regelungen dazu auf der Ebene der ICAO (International Civil Aviation Organization) gibt.
2. Die untere Wasserbehörde eines Brandenburger Landkreises hatte ein Brandschutzkonzept für eine stationäre Batteriespeicheranlage auf Containerbasis zur Genehmigung vorliegen. Das Brandschutzkonzept wies eine Reihe von nicht (eindeutig) geklärten Verfahrensabläufen für den Fall eines TR bzw. Brandes der Anlage auf. Hier konnte der Behörde ebenfalls auf sehr einfache und effiziente Art und Weise mit fachlich fundierten Daten aus den experimentellen Untersuchungen des Vorhabens SEE-2L weitergeholfen werden.

Aktuell wird der Versuchsstand auf experimenteller Ebene für das Projekt BaLU („Auswirkungen von Batteriebränden und deren Löschverfahren auf die Umwelt“) genutzt. Das Projekt ist zum 01.10.2023 gestartet und läuft bis Ende 2024. Gefördert wird das Vorhaben über eine Verwaltungsvereinbarung durch das Umweltbundesamt sowie über die Kommission für Anlagensicherheit (KAS). Im Rahmen des Vorhabens sollen in der ersten Jahreshälfte 2024 eine Reihe von Lösversuchen durchgeführt werden, um im Nachgang die Schadstoffkontamination des Löschwassers zu quantifizieren. Die Ergebnisse sollen unter anderem in Vorgaben für rechtliche Regelungen der KAS einfließen.

Darüber hinaus wird ein Folgevorhaben im Aufruf „Praxisleuchttürme“ des Sicherheitsforschungsprogramms des BMBF beantragt. Ziel der Einreichung der Projektskizze ist 12/2023. In diesem Vorhaben sollen vor allem Untersuchungen zur Wirksamkeit von Löschanlagen und zum abwehrenden Brandschutz (Löschtechniken und -taktiken der Feuerwehr) erfolgen.

## 5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es gibt weltweit eine Vielzahl von Arbeitsgruppen und Forschungseinrichtungen, welche an der Weiterentwicklung der Batterietechnologie im Allgemeinen und der Sicherheit von Batterien im Speziellen forschen. Die bisher vorhandenen wissenschaftlichen Publikationen zur Wärme- und Gasfreisetzung von LIB beim TR, Stand Ende 2022, wurde eingehend in der Metastudie aufbereitet [1]. Die dafür verwendeten Quellen umfassen im Wesentlichen Versuche auf Zellebene. Darüber hinaus gibt es noch einige wenige experimentelle Arbeiten zum TR-Verhalten von LIB in größerem Maßstab. Diese Arbeiten sind in der erfolgten Publikation im Journal „RSC Advances“ aufgeführt (Abschnitt 1, Quellen 30 und 116-119) [2].

## 6. Veröffentlichung der Ergebnisse

### 6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

1. T. Rappsilber, N. Yusfi, S. Krüger, S.-K. Hahn, T.-P. Fellingner, J. Krug von Nidda, R. Tschirschwitz, Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries, *Journal of Energy Storage*, 60 (2023) 106579.
2. R. Tschirschwitz, C. Bernardy, P. Wagner, T. Rappsilber, C. Liebner, S.-K. Hahn, U. Krause, Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules, *RSC Adv.*, 13 (2023) 20761-20779.
3. K.O.A. Amano, S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, T. Rappsilber, U. Krause, An Experimental Investigation of Thermal Runaway and Gas Release of NMC Lithium-Ion Pouch Batteries Depending on the State of Charge Level, *Batteries*, 8 (2022) 41.
4. K.O.A. Amano, S.-K. Hahn, N. Butt, P. Vorwerk, E. Gimadieva, R. Tschirschwitz, T. Rappsilber, U. Krause, Composition and Explosibility of Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries Undergoing Thermal Runaway, *Batteries*, 9 (2023) 300.
5. R. Tschirschwitz, S.-K. Hahn, U. Krause, BEV Accidents – Consequences in Case of a Battery Thermal Runaway, in: 31st Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU), 05.-07.10.2023, Limassol, Cyprus.
6. S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, C. Bernardy, Forschung zur Sicherheit stationärer Energiespeicher - Zwischenspeicher als wichtiger Beitrag für eine erfolgreiche Energiewende, *Behörden-Spiegel*, Sonderheft E-Mobility Magazin 2022.
7. S.-K. Hahn, A. Saupe, R. Tschirschwitz, M. Janßen, U. Krause, Sicherheitsrisiko Batterien – Demonstrator aus dem Projekt SEE-2L bereits im Einsatz, Informationsbrief zur zivilen Sicherheitsforschung, 07/2023.
8. S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher in Second Life Anwendungen (SEE-2L) – Vorstellung des Verbundprojekts und Ergebnisse aus Vorversuchen, ALBERO-Projekttreffen, online, April 2021 (Vortrag)
9. Projekt "SEE-2L – Stationäre elektrische Energiespeicher – Second Life Anwendungen", BAM Homepage, 2021. <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/SEE-2L/see-2l.html> einschließlich Verlinkung von 3 adressatengerecht geschnittene Versuchsvideos auf dem Youtube-Kanal der BAM ([Video 1](#), [Video 2](#), [Video 3](#))

## 6.2 Geplante Veröffentlichungen

10. S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, K.O.A. Amano, E. Gimadieva, U. Krause, A Study on Thermal Runaway Propagation in Battery Modules Assembled from Pouch Cells, in: EUSAS conference "Addressing the fire risks of electromobility", ZVEI e.V. (Electro and Digital Industry Association), 10.-11.05.2023, Frankfurt/Main, Germany, angenommen, Publikation Tagungsband bis 12/2023.
11. S.-K. Hahn, C. Bernardy, R. Tschirschwitz, M. Janßen, K.O.A. Amano, U. Krause, Sicherheit elektrochemischer Energiespeicher – Ergebnisse aus dem Projekt SEE-2L, 70. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., 06.-08.05.2024, Magdeburg, angenommen.
12. Eine weitere Veröffentlichung der Ergebnisse ist in 2024 in der vfdb Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, angenommen.

## 7. **Literaturverzeichnis**

- [1] T. Rappsilber, N. Yusfi, S. Krüger, S.-K. Hahn, T.-P. Fellingner, J. Krug von Nidda, R. Tschirschwitz, Meta-analysis of heat release and smoke gas emission during thermal runaway of lithium-ion batteries, *Journal of Energy Storage*, 60 (2023) 106579.
- [2] R. Tschirschwitz, C. Bernardy, P. Wagner, T. Rappsilber, C. Liebner, S.-K. Hahn, U. Krause, Harmful effects of lithium-ion battery thermal runaway: scale-up tests from cell to second-life modules, *RSC Adv.*, 13 (2023) 20761-20779.
- [3] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén, B.-E. Mellander, Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests, *J. Power Sources*, 271 (2014) 414-420.
- [4] P. Ribière, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruelle, G. Marlair, Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry, *Energy & Environmental Science*, 5 (2012) 5271-5280.
- [5] B. Gully, H. Helgesen, J. Skogtvedt, D. Kostopoulos, Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression, *DNV GL*, 1025 (2019).
- [6] P. Liu, C. Liu, K. Yang, M. Zhang, F. Gao, B. Mao, H. Li, Q. Duan, Q. Wang, Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by over heating, *Journal of Energy Storage*, 31 (2020) 101714.
- [7] E. Brandes, S. Dietlen, H. Hieronymus, U. Krause, B. Plewinsky, T. Redeker, V. Schröder, K. Hoyermann, Properties of Reactive Gases and Vapours (Safety Characteristics), in: M. Hattwig, H. Steen (Eds.) *Handbook of Explosion Prevention and Protection*, John Wiley & Sons, Weinheim, 2004.
- [8] Y.-S. Duh, K.H. Lin, C.-S. Kao, Experimental investigation and visualization on thermal runaway of hard prismatic lithium-ion batteries used in smart phones, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 132 (2018) 1677-1692.
- [9] F. Larsson, S. Bertilsson, M. Furlani, I. Albinsson, B.-E. Mellander, Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO<sub>2</sub> cells at different levels of ageing, *J. Power Sources*, 373 (2018) 220-231.
- [10] K.O.A. Amano, S.-K. Hahn, N. Butt, P. Vorwerk, E. Gimadieva, R. Tschirschwitz, T. Rappsilber, U. Krause, Composition and Explosibility of Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries Undergoing Thermal Runaway, *Batteries*, 9 (2023) 300.

- [11] K.O.A. Amano, S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, T. Rappsilber, U. Krause, An Experimental Investigation of Thermal Runaway and Gas Release of NMC Lithium-Ion Pouch Batteries Depending on the State of Charge Level, *Batteries*, 8 (2022) 41.
- [12] R. Tschirschwitz, S.-K. Hahn, U. Krause, BEV Accidents – Consequences in Case of a Battery Thermal Runaway, in: 31st Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU), 05.-07.10.2023, Limassol, Cyprus.
- [13] S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, K.O.A. Amano, E. Gimadieva, U. Krause, A Study on Thermal Runaway Propagation in Battery Modules Assembled from Pouch Cells, in: EUSAS conference "Addressing the fire risks of electromobility", ZVEI e.V. (Electro and Digital Industry Association), 10.-11.05.2023, Frankfurt/Main, Germany.
- [14] S.-K. Hahn, A. Saupe, R. Tschirschwitz, M. Janßen, U. Krause, Sicherheitsrisiko Batterien – Demonstrator aus dem Projekt SEE-2L bereits im Einsatz, Informationsbrief zur zivilen Sicherheitsforschung, 07/2023.
- [15] S.-K. Hahn, R. Tschirschwitz, C. Bernardy, Forschung zur Sicherheit stationärer Energiespeicher - Zwischenspeicher als wichtiger Beitrag für eine erfolgreiche Energiewende, *Behörden-Spiegel, Sonderheft E-Mobility Magazin* 2022.
- [16] Projekt "SEE-2L – Stationäre elektrische Energiespeicher – Second Life Anwendungen", BAM Homepage, 2021, <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/SEE-2L/see-2l.html>.