

vfd b

Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.

Heft 1/2015

Februar 2015, 64. Jahrgang



Zeitschrift für Forschung,
Technik und Management
im Brandschutz



5077

Sonderdruck für die GENIUS Entwicklungs GmbH

- Realbrandversuche zum sicheren Transport von Lithium-Ionen-Modulen
- Neue Forschungsergebnisse zum Brandschutz für mehrgeschossige Strohballenbauten
- Kann Sicherheit beziffert werden?
- Vorschlag für eine mit Risikomanagement verbindende Definition der Sicherheit

Realbrandversuche zum sicheren Transport von Lithium-Ionen-Modulen

1 Einleitung

Die Bundesregierung erklärte im Oktober 2012 das Ziel, im Jahre 2020 eine Million Elektroautos auf den Straßen zu haben. Ein Schlüsselement ist dabei die Verwendung von leistungsfähigen elektrischen Speichermedien wie den Lithium-Ionen-Batterien.

Dabei wurde bereits frühzeitig erkannt, dass in Bezug auf die Transportsicherheit noch Entwicklungsbedarf, vor allem beim Transport von (beschädigten) Batterien, besteht [1]. Der Grund liegt vor allem darin, dass im Gegensatz zu den klassischen Batterien (Blei-Säure-, Nickel-Cadmium-, Nickel-Metallhydrid-Batterien) für heute übliche Lithium-Batterien, außer der Lade- und Entlade-reaktion, keine Nebenreaktionen per Definition erlaubt sind.

Die Schädigung einer Lithium-Ionen-Batterie kann von verschiedenen Ereignissen ausgelöst werden und kann bis zur Zerstörung der Zelle bzw. der Batterie führen (Abbildung 1). Dies verursacht einen unkontrollierten schnellen Reaktionsablauf der Komponenten. Der Reaktionsablauf

ist gekennzeichnet durch den Ausstoß von Gasen und Materialien (Venting), einer starker Temperaturentwicklung bis hin zur Brandentwicklung.

Beispielsweise kann es bei einer ungenügenden Wärmeabfuhr an der Anode, bei der Lagerung bzw. beim Transport, von Lithium-Ionen-Batterien bereits ab einer Temperatur von über 80 °C unter Umständen erste Zersetzungsreaktionen bis hin zu weiteren exothermen Effekten kommen. Die Kathode hingegen zeigt bei Temperaturen zwischen 240 °C und 250 °C exotherme Zersetzungsprozesse, die bis zum Zellbrand führen können [2].

In Versuchsreihen mit kleineren Lithium-Ionen-Zellen (Bautyp 18650) wurden exotherme Zersetzungsprozesse bei Batterieoberflächentemperaturen von 120 °C bis 190 °C [3] bzw. bei Heizplattentemperaturen von 94 °C bis 130 °C ermittelt [4].

Unabhängig von der Art des Auslösers steigt im Ergebnis meist die Zelltemperatur an. Dies führt zur thermischen Zersetzung weiterer Zellkomponenten und zu zusätzlicher Wärmeentwicklung, die wiederum weitere Zersetzungsreaktionen auslösen kann. Diesen, sich selbst beschleunigenden

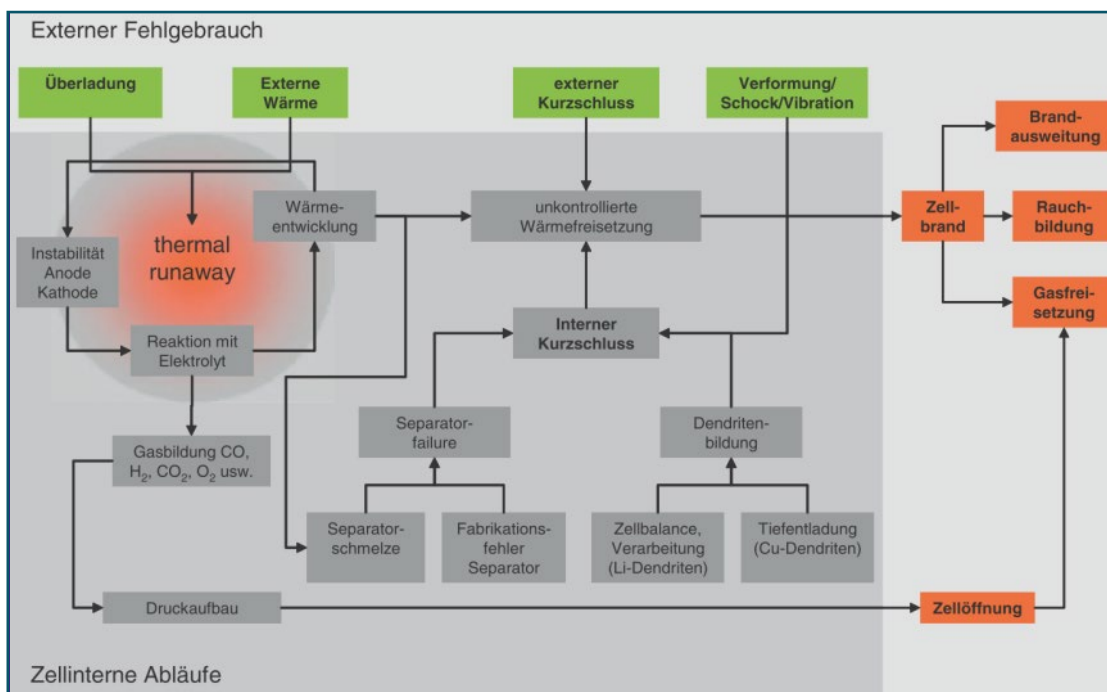


Abbildung 1: Auslöser und Ablauf der thermischen Zersetzung einer Lithium-Ionen-Batterie nach [2].

Vorgang, bezeichnet man als thermisches Durchgehen (Thermal Runaway). Bei dieser exothermen Reaktion konnten bereits Zelltemperaturen von circa 580 °C gemessen werden [2].

Dahingehend wird deutlich, dass die Sicherheit bei der Lagerung und dem Transport von Lithium-Ionen-Zellen gewährleistet werden muss. Dies gilt vor allem im Bereich der Elektromobilität (Elektroauto), wo mehrere Lithium-Ionen-Zellen zu größeren Modulen oder Modulzusammenschlüssen zusammengefasst und verbaut werden. Auch hier müssen die gültigen Transportvorschriften UN 3480 und UN 3481 eingehalten werden, die eine Überschreitung von 100 °C der Außenwandtemperatur des Transportbehälters nicht zulassen.

Diesbezüglich führte die Genius Entwicklungsgesellschaft GmbH zusammen mit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg eine Reihe von Realbrandversuchen an Lithium-Ionen-Modulen durch, um die Nutzbarkeit ihres Transport- und Lagerungssystems in Bezug auf die Einhaltung der Außenwandtemperatur des Transportbehälters nach UN 3480 und UN 3481 zu untersuchen.

Im Nachfolgenden werden das Versuchskonzept sowie die Ergebnisse der Temperaturmessungen vorgestellt.

2 Versuchskonzept

Es wurden Versuche an zwei verschiedenen Transportbehältern durchgeführt. Die Transportbehälter wurden mit Lithium-Ionen-Modulen bestückt und anschließend mit den „PyroBubbles“ der Genius Entwicklung GmbH gefüllt.

Daten	
Material	Hohlglasgranulat, Hauptbestandteil: Siliziumdioxid
Korngröße	0,5 – 5 mm
Verwendung	Löschmittel für feste und flüssige brennbare Stoffe (Brandklassen A, B, D und F)
Sonstiges	Temperaturbeständig bis ca. 1 050 °C, wiederverwendbar

Tabelle 1: Eigenschaften PyroBubbles [5].

Es wurde ein Einzelmodul und ein Modulzusammenschluss beprobt. Ein Einzelmodul besteht aus 13 Lithium-Ionen-Zellen. Der Modulzusammenschluss umfasst insgesamt acht Einzelmodule. Die elektrischen Eigenschaften geladener Lithium-Ionen-Zellen, die in den Versuchen verwendet wurden, sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Zum Erreichen einer Thermal-Runaway-Reaktion wurden die Batterien jeweils mit einer thermischen Energiequelle beaufschlagt.

Technische Daten	
Zellgewicht [g]	700 bis 800
Spannung/Zelle Versuch [V]	4 bis 5
nom. Kapazität/Zelle [Ah]	mind. 24

Tabelle 2: Eigenschaften der verwendeten Lithium-Ionen-Zellen.

Die Zuleitung der Stromversorgung wurde jeweils über eine Durchörterung realisiert. Durch eine zweite Bohrung wurden die Messleitungen für die Temperaturmessstellen geführt.

2.1 Einzelmodul

Der Versuch mit einem Einzelmodul wurde in einer Transportbox LIONGUARD® Typ SBox X1 durchgeführt, welche ein Volumen von rund 190 l besitzt (Abbildung 2).



Abbildung 2: Transportbox LIONGUARD® Typ SBox X1.

Für den Versuch wurde ein Heizband (1 250 W) als Wärmequelle genutzt. Die Wärmequelle wurde direkt auf der Unterseite des Moduls befestigt, damit eine direkte Wärmeübertragung auf die Lithium-Ionen-Zellen gewährleistet werden konnte (Abbildung 3).



Abbildung 3: Positionierung des Heizbandes auf der Modulunterseite.

Anschließend wurde das Modul mittig in der Transportbox positioniert und mit den „PyroBubbles“ der Genius Entwicklung GmbH umgeben. Die Schichtdicken sind in der Abbildung 4 ersichtlich.

Da es sich bei dem verwendeten Behälter noch um einen Prototypen handelte, war keine Öffnung für das Entweichen des zu erwartenden Gasvolumens vorhanden. Dahingehend wurde eine Bohrung (ca. 11 mm Durchmesser) an der Stirnseite der Behälteraußenwand realisiert.

2.2 Modulzusammenschluss

Die in Elektrofahrzeugen verbauten Lithium-Ionen-Module werden meist zu mehreren zusammengefasst, um die benötigten Leistungen er-

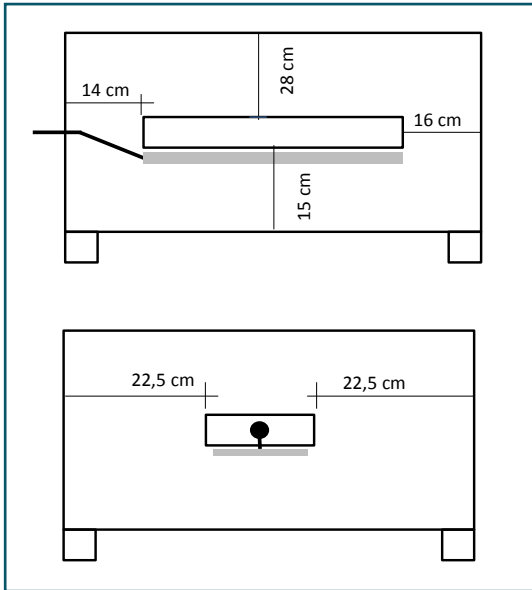


Abbildung 4: Schichtdicken der PyroBubbles in der Transportbox beim Einzelmodul-Versuch.

bringen zu können. Dahingehend wurde in einem zweiten Versuch ein Modulzusammenschluss aus einem Elektrofahrzeug bestehend aus insgesamt acht Einzelmodulen beprobt. Als initiale Wärmequelle wurde eine Heizplatte (HP) mit einer Leistung von maximal 1300 W genutzt. Die Wärmequelle wurde direkt auf der Unterseite eines Einzelmodules befestigt (Abbildung 5).

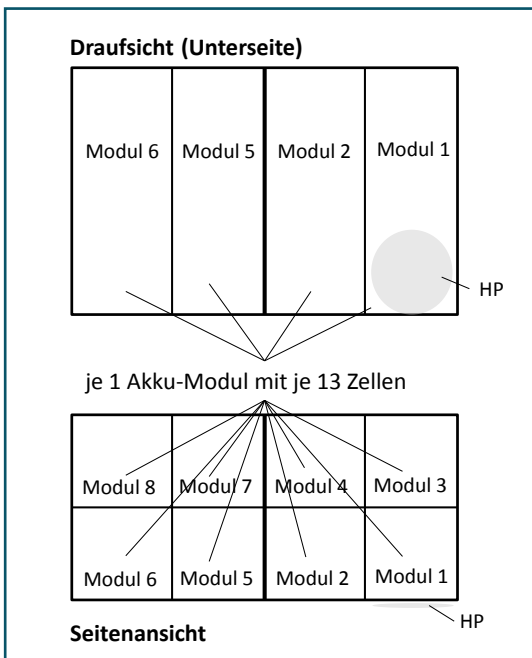


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Modulzusammenschlusses.

Das Bruttogewicht des Modulzusammenschlusses betrug zwischen 130 kg und 150 kg. Es wurde ein Prototyp der LIONGUARD® M Box X2 mit einem Volumen von rund 740 l (Abbildung 6) verwendet.



Abbildung 6: Prototyp des LIONGUARD® M Box X2.

Der Modulzusammenschluss wurde etwa mittig im Transportbehälter positioniert und mit den „PyroBubbles“ umgeben. Die Schichtdicken sind in der Abbildung 7 ersichtlich.

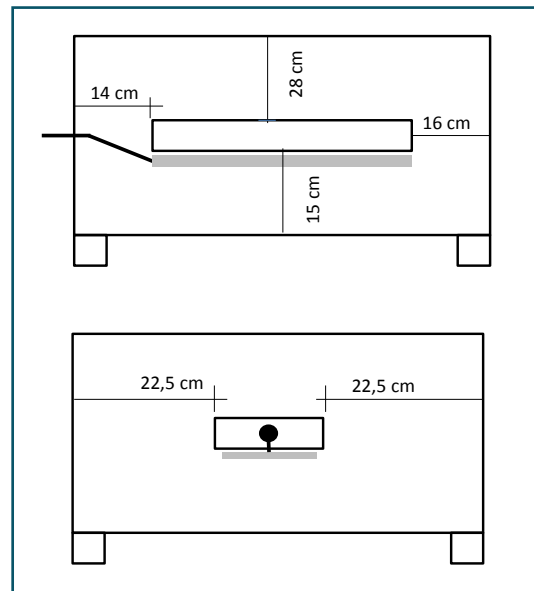


Abbildung 7: Schichtdicke der PyroBubbles im Transportbehälter beim Modulzusammenschluss.

Die Stromzufuhr wurde durch eine Bohrung an der Stirnseite des Behälters realisiert. Weitere Durchörterungen wurden für die Messleitungen der Temperaturmessstellen und zum Entweichen des Gasvolumens geschaffen.

3 Versuchsmesstechnik und -durchführung

Zur Temperaturmessung wurden Mantelthermoelemente vom Typ K (NiCr/Ni) verwendet. Der Anwendungsbereich liegt im Bereich von -270°C bis 1372°C . Die Thermoelemente genügen der Genauigkeitsklasse I gemäß DIN EN 60751, mit einer Toleranz von $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ zwischen -40°C und 375°C [6].

Die Messspitzen der Thermoelemente wurden so positioniert, dass die Temperaturen auf der Modulunterseite sowie an verschiedenen Positionen der Behälterinnenwand aufgezeichnet werden konnten.

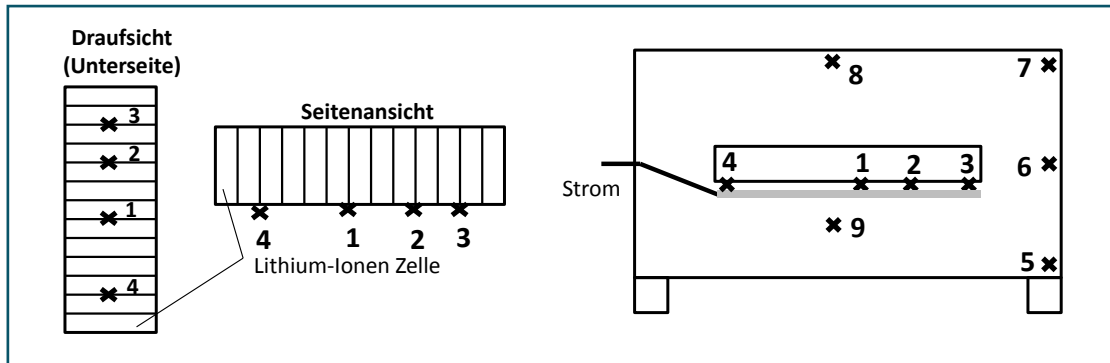


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Messstellen beim Einzelmodul-Versuch.

3.1 Einzelmodul

Bei der Beprobung des Einzelmoduls in der Transportbox LIONGUARD® Typ SBox X1 wurden vier Messstellen auf der Unterseite des Moduls positioniert (TE 1 bis TE 4) und weitere vier Messstellen wurden zur Messung der Behälterinnenwand verwendet (TE 5 bis TE 8). Ein weiteres Thermoelement (TE 9) wurde ca. 5 cm unterhalb des Moduls positioniert (Abbildung 8).

Die Messstellen an TE 5 bis TE 7 befanden sich an der hinteren Stirnseite der Behälterinnenwand. Wobei sich TE 5 in der unteren Behälterecke und TE 7 an der oberen Behälterecke befanden und diese damit auf einer Diagonale lagen. Etwa mittig auf der Diagonale, in Höhe des eingebrachten Batterie-Moduls, war Messstelle TE 6 angeordnet. Die Messspitze des TE 8 befand sich mittig über dem Modul und war etwa 3 cm vom Behälterdeckel entfernt.

Zum Erreichen einer durchgehenden thermischen Reaktion wurde ein Heizband mit einer maximalen Leistung von 1250W als thermische Wärmequelle eingebracht. Die thermische Belastung sollte zwischen 250°C und 300°C liegen. Erreicht wurde dies durch die Verwendung eines Stelltrafos.

Sämtliche Durchörterungen wurden so dicht wie möglich mit Glaswolle verschlossen. Die Bohrung zur Gasentweichung wurde so verschlossen, dass diese bei einem leichten Druckanstieg im Behälter herausfallen konnte.

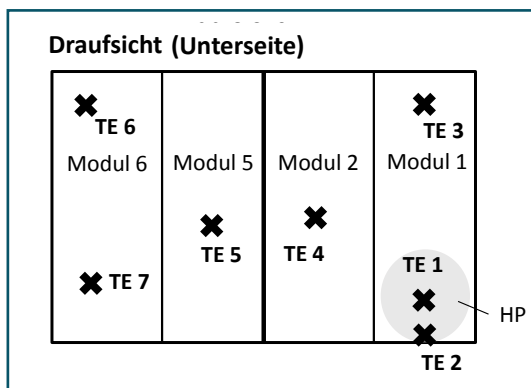


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Platzierung der Messstellen auf der Unterseite.

3.2 Modulzusammenschluss

Beim Versuch mit dem Zusammenschluss von acht Einzelmodulen wurden sieben Messstellen (TE 1 bis TE 7) auf der Unterseite der Module angebracht (Abbildung 9). Hinzu kamen sechs Messstellen (TE 8 bis TE 13) an der Innenwand des Transportbehälterprototyps des LIONGUARD® M Box X2 sowie eine Messstelle (TE 14) circa 17 cm unterhalb des Modulzusammenschlusses.

Die Messstellen TE 8 bis TE 10 befanden sich auf einer Diagonale an der hinteren Stirnseite der Behälterinnenwand. TE 11 befand sich mittig über dem Modul und war etwa 7 cm vom oberen Schichtende entfernt (Abbildung 10).

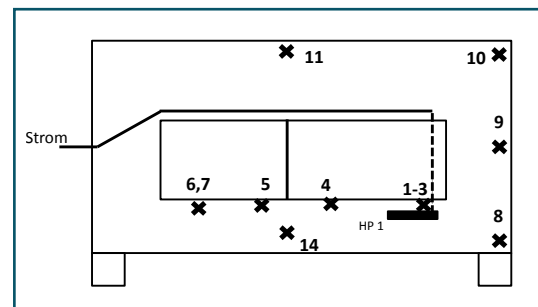


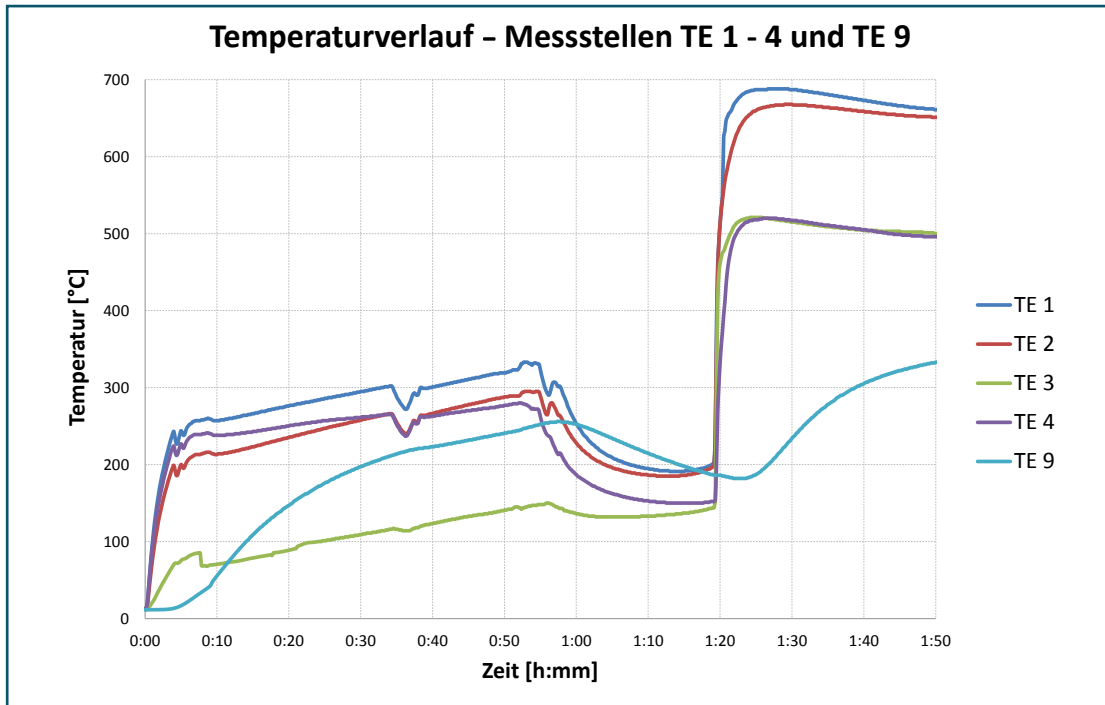
Abbildung 10: Positionen der Thermoelemente in der Seitenansicht.

An den Seiteninnenwänden befanden sich die Messstellen TE 12 und TE 13. Diese wurde mittig zum Modulzusammenschluss platziert. Um gleichzeitig die Isolationswirkung der PyroBubbles in verschiedenen Schichtdicken zu untersuchen, wurde der Abstand zu den Seitenwänden des Behälters ungleichmäßig gewählt. Die Schichtdicke zwischen dem Modulzusammenschluss und der Messstelle TE 12 betrug 15,5 cm. Hingegen lag bei TE 13 lediglich eine Schichtdicke von 8 cm vor (siehe Abbildung 7).

Die thermische Beaufschlagung wurde durch eine Heizplatte (HP) mit einer Leistung von 1300 Watt am Modul 1 realisiert (siehe Abbildung 5). Die Messleitungen der Thermoelemente führten durch eine Bohrung nach außen und waren mit dem Messdatenerfassungs-/Schalt-System Agilent 34970A verbunden.

Die Durchörterungen für die Messtechnik und

Abbildung 11: Einzelmodul, Temperaturmessstellen auf der Modulunterseite (TE 1 – 4) und unter dem Modul (TE 9).



für die Stromzufuhr auf der Behälterstirnseite wurden mit Alufolie verschlossen. Auf der gegenüberliegenden Stirnseite dieser Durchörterungen wurden ebenfalls zwei Bohrungen (11 mm Durchmesser) realisiert, um weitere Druckentlastungsflächen zu schaffen.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Einzelmodul

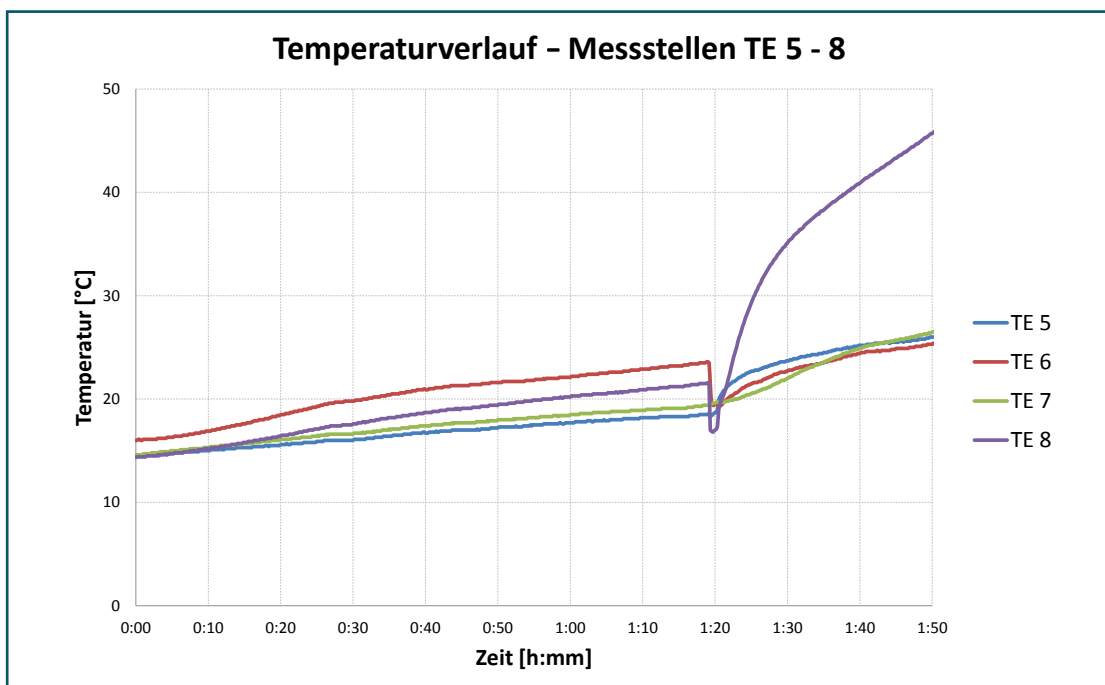
Bei der Verwendung eines Heizbandes zur flächennmäßigen Wärmebeaufschlagung der Unter-

seite des Einzelmoduls konnte ein kontinuierlicher Temperaturanstieg auf etwa 330 °C (TE 1) bis zur 53. Versuchsminute beobachtet werden. Nach diesem Zeitpunkt war der technische Ausfall des Heizbandes zu verzeichnen, was sich in einem Abfall der Temperaturen an der Modulunterseite widerspiegelte (Abbildung 11).

Der Grund dafür lag wahrscheinlich in den bereits geöffneten und auslaufenden Batteriezellen. Denn bis zu diesem Zeitpunkt hatten bereits einige Zellen reagiert und es konnten mehrere ploppende Geräusche wahrgenommen werden.

Die Messstelle TE 1 dokumentierte im weiteren

Abbildung 12: Einzelmodul, Temperaturmessstellen auf der Innenseite der Behälteraußenwand.



Verlauf einen Temperaturabfall auf ca. 200 °C, bis in der 79. Versuchsminute (1:19 h) die Thermal-Runaway-Reaktion eintrat. Bereits zwei Minuten später (1:21) verzeichneten die Messstellen TE 1 und TE 2 Werte von mehr als 600 °C. Das Temperaturmaximum betrug bei TE 1 688 °C (1:26 h bis 1:29 h). Anschließend sanken alle Temperaturen auf der Modulunterseite um etwa 1 Kelvin je Minute. Zum Versuchsende lag an der Messstelle TE 1 eine Temperatur von 660 °C vor.

Zum Zeitpunkt der Thermal-Runaway-Reaktion konnte ein Gasaustritt aus der Entlastungsbohrung an der Stirnseite des Behälters beobachtet werden. Die lose Abdichtmasse fiel dabei aus der Bohrung heraus und das Gas entwich in Intervallen aus der Durchörtung. Der Gasaustritt war hörbar und es konnte ein beißender Geruch festgestellt werden. Nachdem die Temperaturwerte wieder zu sinken begannen, war kein Gasaustritt mehr wahrnehmbar.

Abbildung 12 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe der Messpunkte, welche sich an der Innenseite der Behälterwand befanden. Hier bewirkte die Thermal-Runaway-Reaktion ebenfalls einen Temperaturanstieg bis zum Versuchsende. Auffällig ist jedoch, dass es beim Einsetzen der Thermal-Runaway-Reaktion (1:19 h) zu einem Temperaturabfall von bis zu 4,5 °C kommt. Der Grund liegt dabei wahrscheinlich in der ersten Gasentweichung aus dem Behälter. Zum Versuchsende wiesen die Messstellen TE 5 – 7 (an der Stirnseite) Temperaturen von rund 27 °C auf. Lediglich die Temperatur am TE 8 (3 cm unterhalb der Deckelinnenwand) erreicht zum Versuchsende einen Wert von 46,5 °C.

4.2 Modulzusammenschluss

Durch die Verwendung einer Heizplatte konnte die Thermal-Runaway-Reaktion am Modulzusammenschluss schneller erreicht werden als bei der Verwendung eines Heizbandes am Einzelmodul. Der Grund liegt hierfür in der besseren und punktuelleren Wärmeübertragung auf die einzelnen Lithium-Ionen-Zellen.

Das erste Zellversagen konnte durch ein ploppendes Geräusch in der 22. Versuchsminute festgestellt werden. Eine Minute später (0:23 h) konnte das Einsetzen der Thermal-Runaway-Reaktion am Modul 1 mit gleichzeitiger Gasfreisetzung aus den Durchörtungen des Transportbehälters dokumentiert werden. Es zeigte sich ein Anstieg der Temperatur an der Messstellen TE 1 von 369 °C auf 648 °C.

Anschließend erfolgte eine Ausbreitung auf das gesamte Modul 1 sowie auf das danebenliegende Modul 2. Dies kennzeichneten die ansteigenden Temperaturen an den Messstellen TE 3 (475 °C) und TE 4 (480 °C). Es ist davon auszugehen, dass bis zur 38. Versuchsminute alle Lithium-Ionen-Zellen in den Modulen 1 bis 4 (Modulblock 1) versagt haben, da in der anschließenden Zeitspanne keine weiteren Geräusch- und Gasentwicklung vorlagen. Zudem fielen alle Temperaturen an den Messstellen des ersten Modulblocks kontinuierlich. Es wurde nun abgewartet, ob sich im Modulblock 2 (Module 5 bis 8) ebenfalls eine Thermal-Runaway-Reaktion einstellen würde.

Etwa 28 Minuten nach dem letzten registrierten Zellversagen konnten erneut ein Zellversagen mit anschließendem Gasaustritt dokumentiert werden

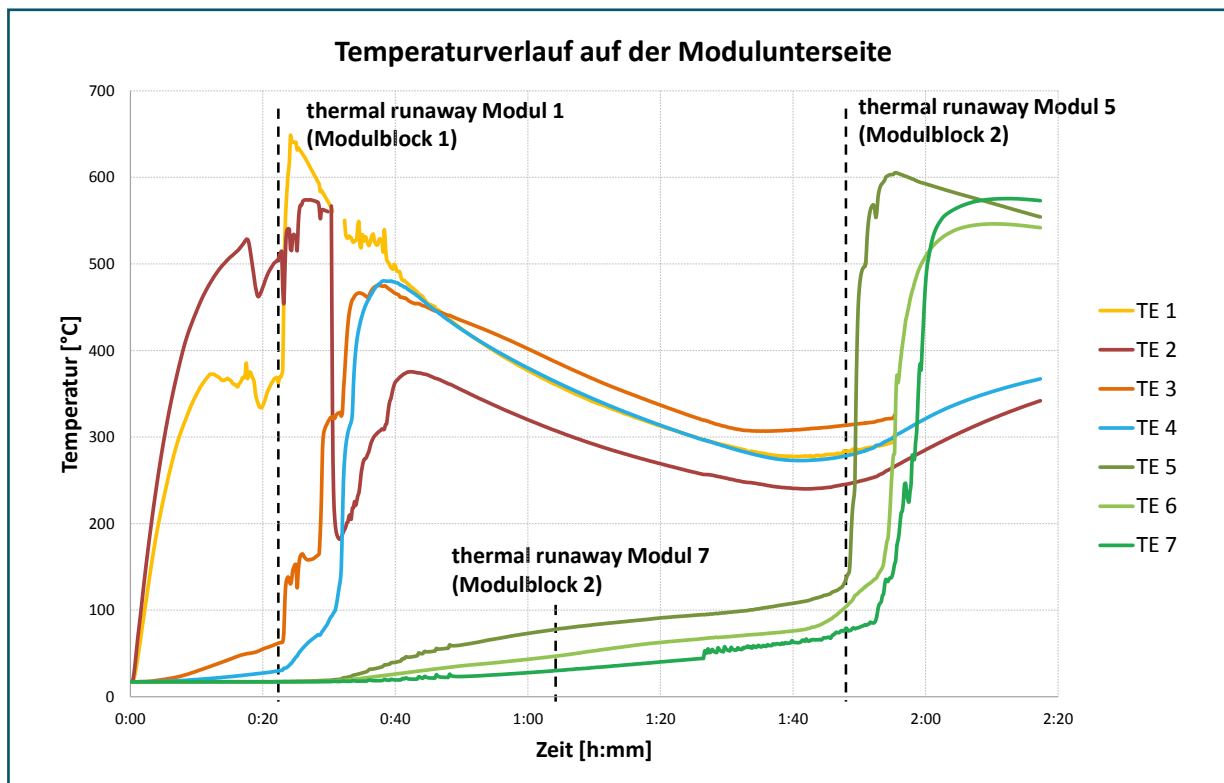
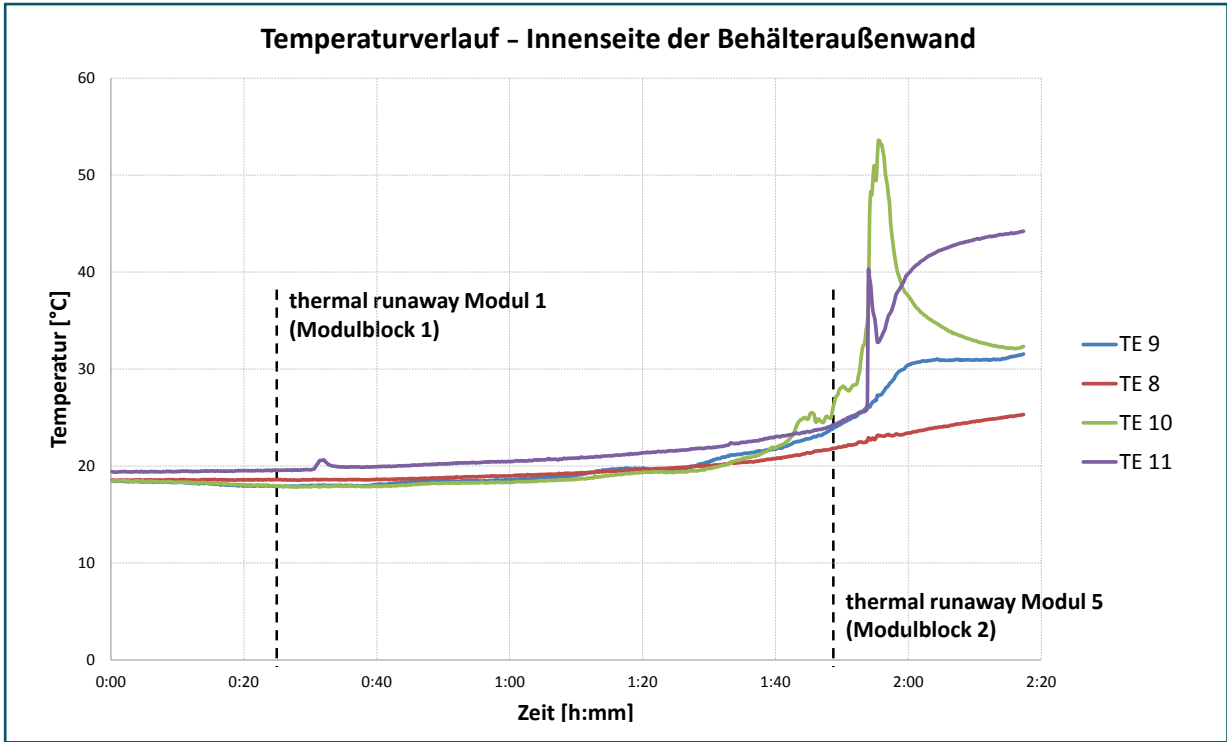


Abbildung 13: Modulzusammenschluss, Temperaturmessstellen auf der Modulunterseite.

Abbildung 14: Modulzusammenchluss, Temperaturmessstellen auf der Innenseite der Behälteraußenwand (Stirnseite).



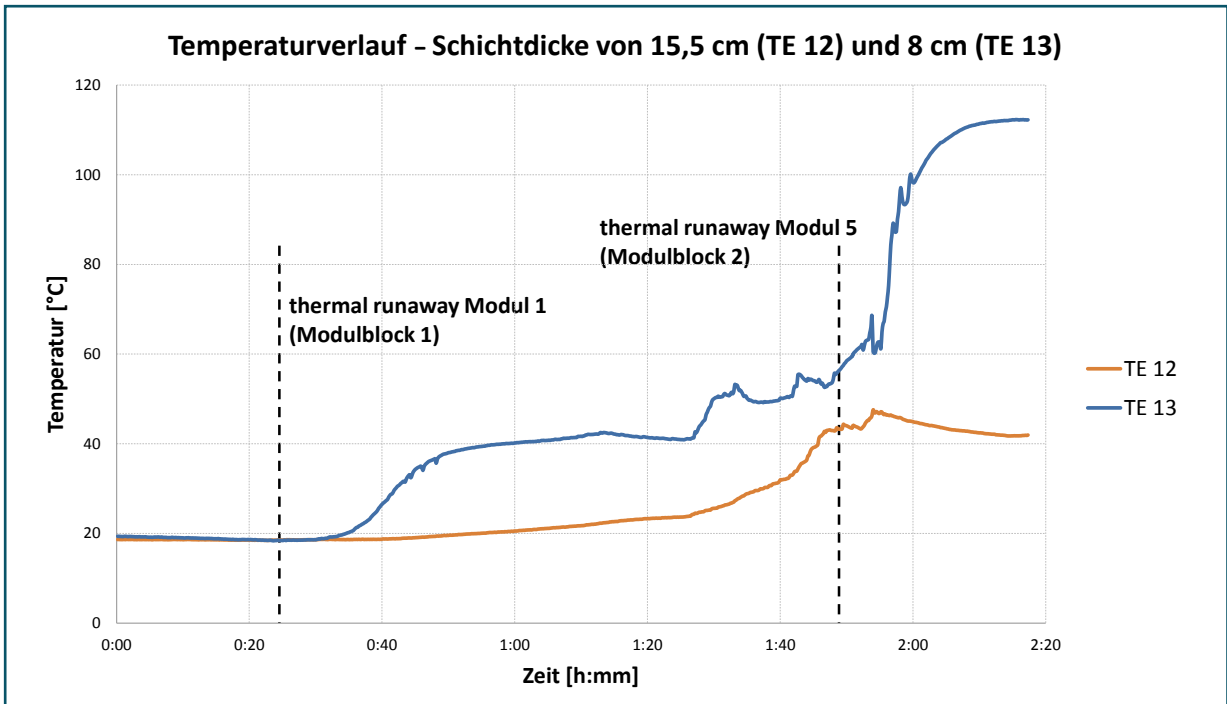
(1:06 h). Es ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt das Modul 7 (Modulblock 2) in Thermal-Runaway-Reaktion übergegangen ist. Der Grund für den Zeitverzug liegt in der konstruktionsbedingten Metallplatte, welche sich zwischen den beiden Modulblöcken befand.

Ab dem Zeitpunkt 1:49 h konnte auch an den Zellen der Module 5 und 6 (Modulblock 2) der Thermal-Runaway-Prozess durch die Messstellen TE 5 bis TE 7 registriert werden. Die maximalen Temperaturwerte auf den Modulen 5 und 6 betru-

gen 605 °C (TE 5 – Modul 5) und 575 °C (TE 7–Modul 6) sowie 546 °C (TE 6 – Modul 6). Zum Zeitpunkt der Thermal-Runaway-Reaktion in den Modulen 5 und 6 stiegen auch die Temperaturen an den Messstellen am Modulblock 1. Ab 1:55 h musste der Ausfall der Messstellen TE 1 und TE 3 verzeichnet werden.

Der Temperaturverlauf in Abbildung 14 zeigt, dass ein nennenswerter Temperaturanstieg an den Innenseiten der Behälteraußenwand erst nach der Thermal-Runaway-Reaktion des zweiten Modul-

Abbildung 15: Modulzusammenchluss, Temperaturmessstellen auf der Innenseite der seitlichen Behälteraußenwand.



blocks (Module 5 bis 8) erfolgt. Der aufgezeichnete Peak an der Messstelle TE 10 ist auf den Entgasungsprozess zurückzuführen, da sich die Messstelle nahe der Durchörterung zur Gasabführung befand.

Die Untersuchung unterschiedlicher Schichtdicken zwischen dem Modulzusammenschluss und der seitlichen Behälteraußenwand zeigte, dass bei einer Schichtdicke von lediglich 8 cm die Temperaturen an der Behälteraußenwand über 100 °C steigen können. Hingegen erreicht die Behälterseitenwand bei einer Schichtdicke von mehr als 15 cm maximal 47 °C (Abbildung 15). In einem weiteren Versuch mit der LIONGUARD® M Box X2 wurde der Modulzusammenschluss mittig platziert, sodass auf beiden Seiten ein Abstand von etwa 12 cm zur Behälteraußenwand vorlag. Hier betrug das Temperaturmaximum 68 °C und lag damit deutlich unter 100 °C. Dieser Sachverhalt wurde auch bereits durch numerische Simulation an der Universität Magdeburg nachgewiesen.

Dies zeigt die Notwendigkeit eines Mindestabstandes zur Behälterwand, der eine feste Anwendungsgrundlage des Transportsystems der Genius Entwicklungs GmbH darstellt.

5 Zusammenfassung und Auswertung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die beprobten Lithium-Ionen-Module in der Thermal-Runaway-Reaktion plausible maximale Temperaturwerte zwischen 700 °C und 600 °C erreichen.

Dabei wird die Thermal-Runaway-Reaktion bei der Nutzung einer Heizplatte schneller erreicht als bei der Verwendung eines Heizbandes als initiale Wärmequelle. Dies ist vor allem mit der direkteren Wärmeübertragung zu begründen.

Bei einem weiteren, hier nicht dargestellten, Versuch an einem Einzelmodul mit einer Heizplatte als initiale Wärmequelle konnte das schnellere Einsetzen der Thermal-Runaway-Reaktion ebenfalls dokumentiert werden. Hierbei wurde die Thermal-Runaway-Reaktion bereits 14 Minuten nach Versuchsstart erreicht (Heizband-Versuch 79 min). Die weiteren Temperaturentwicklungen an den Behälterwänden und am Modul waren ähnlich mit dem Heizband-Versuch.

Sobald die Lithium-Ionen-Zellen eines Moduls oder eines Modulzusammenschlusses versagen und die Thermal-Runaway-Reaktion offensichtlich vorliegt, fallen, bei dem getesteten Transport- und Lagerungssystem, bereits wenige Minuten nach dem Erreichen der Temperaturmaxima die Temperaturen an den Zellen um etwa 1 Kelvin je Minute ab.

Die Temperaturen an den Innenseiten der Behälterwände überschreiten zu keinem Zeitpunkt die gemäß UN 3480 und UN 3481 maximal zulässige Außenwandtemperatur von 100 °C. Die Ursache darin liegt in der hohen Wärmekapazität und der

niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Sonderlöschmittels „PyroBubbles“ der Firma Genius Entwicklungs GmbH.

Die Ausnahme bildet lediglich eine zu geringe Schichtdicke zwischen der Lithium-Ionen-Batterie und der Behälterwand, wie bei dem Versuch am Modulzusammenschluss nachgewiesen. Hier ist jedoch davon auszugehen, wäre der Modulzusammenschluss mittig und damit mit gleichen Abständen zur Behälterseitenwand platziert worden, würde keine Behälterwandtemperatur von mehr als 100 °C erreicht werden. Dies wurde auch bereits durch eine numerische Simulation an der Universität-Magdeburg nachgewiesen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das beprobte Genius-Transport- und Lagerungssystem die Anforderungen der UN 3480 und UN 3481 bei einem Thermal Runaway eines Lithium-Ionen-Modules oder Modulzusammenschlusses hinsichtlich des Temperaturgrenzwertes von 100 °C hinreichend erfüllt.

Autoren

Alexander Saupe, M. Sc., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik

Alexander Lehmann, Genius Entwicklungsgesellschaft GmbH, Königs Wusterhausen

Kathrin Hebbeler, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik

Ulrich Krause, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik

Abbildungsnachweis

Abbildung 2, 3, 6: Eigenaufnahmen durch Mitarbeiter der Genius Entwicklungs GmbH.

Literaturverzeichnis

- [1] Internationale Plattform Elektromobilität (NPE), Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2011.
- [2] R. Korthauer, Hrsg., Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [3] Qiaoyan Pan, Reiner Weyhe, Albrecht Melber, Ieva Klavina, Bernd Friedrich, Investigation on packaging materials for safe transport of spent Li-ion batteries, ACCUREC Recycling GmbH, Mülheim an der Ruhr: RWTH Aachen University.
- [4] K. Keutel, M. Koch und E. Jahn, Lithium-Ionen-Akkumulatoren – Abbrandverhalten und Gasfreisetzung, Dortmund: vfdB-Jahresfachtagung 2014 Tagungsband, 2014.
- [5] Genius Entwicklungsgesellschaft mbH, „Löschen mit Glas,“ in Feuerwehrmagazin, Bremen, Ebner Verlag GmbH & Co. KG, 02/2012, pp. 28-29.
- [6] DIN EN 60584 Thermopaare Teil 1-3, Teil 1: Grundwerte der Thermospannung, Teil 2: Grenzabweichung der Thermospannung, Teil 3: Thermoleitung und Ausgleichsleitung, Beuth Verlag, 1993-2008.